



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued



Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés & Pétrochimie

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de
Master Académique

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Industries Pétrochimiques
Spécialité : Génie Pétrochimique

Présenté par:

Ghedeir Amar Yazid

Thème :

Utilisation du déchet de palmier dattier dans la fabrication des
composites polymères et son exploitation pour le
traitement des eaux usées

Soutenu le : 24/09/2025

Devant le jury compose de:

Mr. Chaabia Nacer	Président	Université d'El Oued
Mr. Khaled Bilal	Examineur	Université d'El Oued
Mr. Boughezal Abdeslam	Encadreur	Université d'El Oued

Année universitaire : 2024/2025

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur la valorisation des déchets du palmier dattier, ressource abondante dans la région d'El Oued, pour la fabrication de membranes composites à base de polymères thermoplastiques. L'objectif est d'exploiter ces matériaux dans le traitement des eaux usées, particulièrement contaminées par des colorants industriels.

Le travail présente les propriétés des thermoplastiques, le potentiel des fibres de palmier dattier et les différentes méthodes de traitement membranaire.

Selon la bibliographie consultée, il en résulte que l'intégration des déchets du palmier dattier améliore les propriétés des membranes et leur efficacité pour l'élimination des polluants. Ce travail met ainsi en évidence une voie durable et écologique pour la valorisation des déchets agricoles et le traitement des eaux usées.

Mots clés : Déchets du palmier dattier, membranes composites, thermoplastiques, filtration, eaux usées, Colorants industriels.

ملخص:

تتأول هذه الدراسة تحويل نفايات نخيل التمر، وهو مورد وفير في منطقة الوادي، لتصنيع أغشية مركبة قائمة على بوليمرات لدنة حرارية. يهدف العمل إلى استغلال هذه المواد في معالجة المياه الملوثة، وخاصة تلك الملوثة بالأصبغ الصناعية.

يعرض البحث خصائص اللدائن الحرارية، وإمكانات ألياف نخيل التمر، والطرق المختلفة لمعالجة الأغشية. وفقاً للمراجع التي تم استعراضها، فإن دمج نفايات نخيل التمر يحسن من خصائص الأغشية وفعاليتها في إزالة الملوثات. وبذلك، يسلط هذا العمل الضوء على مسار مستدام وصديق للبيئة لتحويل النفايات الزراعية ومعالجة المياه العادمة.

الكلمات المفتاحية: نفايات نخيل التمر، أغشية مركبة، لدائن حرارية، ترشيح، مياه عادمة، أصبغ صناعية.



DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts, de persévérance et de patience :


À mes chers parents, qui ont toujours été ma source d'amour, de courage et de soutien inconditionnel. Leur confiance, leurs prières et leurs sacrifices silencieux ont été la lumière qui a guidé chacun de mes pas sur le chemin de la réussite.

À ma famille bien-aimée, frères et sœurs, qui m'ont entouré d'encouragements, de conseils et de chaleur humaine dans les moments de doute comme dans les moments de joie.

À mes amis, compagnons de route, avec qui j'ai partagé les difficultés et les réussites, et dont la présence a rendu ce parcours plus riche et plus agréable.

À mes enseignants et formateurs, qui m'ont transmis non seulement le savoir, mais aussi la passion de l'apprentissage et le sens de l'effort.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce que ce rêve devienne aujourd'hui une réalité.





REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont en premier lieu à mes enseignants et encadreurs, pour leurs précieux conseils, leur patience et leurs orientations qui ont enrichi ma réflexion et guidé mes recherches.

Je remercie également mes parents et ma famille pour leur soutien indéfectible, leur confiance et leurs encouragements permanents tout au long de mon parcours académique.

Ma reconnaissance va aussi à mes amis et camarades de promotion, pour leur esprit de solidarité, leur aide et les moments de partage qui resteront gravés dans ma mémoire.

À toutes les personnes qui ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à la réalisation de ce travail, je vous exprime mes plus vifs remerciements et toute ma considération.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
:الملخص.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
DÉDICACE.....	IV
REMERCIEMENTS	V
TABLE DES MATIÈRES.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	X
Introduction générale	2
Chapitre 1 : Littérature sur les thermoplastiques, les déchets du palmier dattier et leurs composites (propriétés)	3
1. Introduction du Chapitre 1.....	4
2. Les thermoplastiques – Définition, types et propriétés générales	5
3. Les déchets du palmier dattier – Nature, valorisation et potentialités	7
3.1 : Composites à base de thermoplastiques et de déchets du palmier dattier – Propriétés et applications.....	9
3.2 : Les défis techniques et environnementaux liés à l’utilisation des composites thermoplastiques à base de fibres de palmier dattier	10
4. Conclusion du Chapitre 1	12
Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées	13
1. Introduction du chapitre 2 :	14
2. Nature et classification des colorants industriels.....	15
2.1. Définition et nature chimique	15
2.2. Usage industriel et dispersion environnementale	16
2.3 Effets des colorants industriels sur les écosystèmes aquatiques.....	17
2.3.1 Dégradation et formation de sous-produits toxiques.....	18

2. Les méthodes physiques de traitement des eaux contaminées par les colorants industriels	19
2.1 Introduction générale aux traitements physiques	19
2.2 Filtration membranaire (MF, UF, NF, RO)	200
3. Les méthodes chimiques de traitement des eaux contaminées.....	21
3.1 Généralités sur les traitements chimiques.....	21
3.2 Réduction chimique	22
4. Conclusion	24
Chapitre 3 : Les méthodes expérimentales pour la préparation des filtres composites	25
1. Introduction.....	26
2. Les principes fondamentaux des filtres composites.....	27
3. Les méthodes expérimentales de synthèse des filtres composites	29
4. Les propriétés physico-chimiques des filtres composites.....	32
5. Les applications environnementales des filtres composites dans le traitement des eaux	34
6. Les défis et perspectives des filtres composites dans le futur du traitement des eaux.....	37
7. Conclusion du chapitre 3	40
8. Conclusion générale	41
Conclusion	42
Bibliographie	43
Bibliographie	46/44

LISTE DES FIGURES

Liste des figures	Pages
Image d'un palmier-dattier	07
Structure schématique d'une fibre végétale	10
Schéma d'un matériau composite	11
Exemple des interactions dans une chaîne alimentaire aquatique	17
Chemical structure of the GFP chromophore	18
Exemple de dispositif expérimental lors de l'élaboration d'un charbon actif	19
Coagulation-floculation à chambre	21
Principe de l'ultrafiltration assistée par complexation et modules discontinu (batch) et continu (module plan à membrane organique) utilisés à l'échelle laboratoire	23
Filtres à sable continus : applications	37
Filtres à charbon actif	39

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX	Pages
Les différents types de matrices utilisées dans la fabrication des filtres composites.	27
Types de charges actives utilisées dans les filtres composites et leurs applications.	28
la diversité des mécanismes en fonction du matériau composite utilisé.	28
les principales méthodes expérimentales de préparation des filtres Composites	30
les paramètres expérimentaux typiques selon la méthode utilisée.	31
les principales propriétés physico-chimiques de quelques filtres composites utilisés dans le traitement des eaux.	33
Quelques applications environnementales typiques des filtres composites.	36
les principaux défis et les avancées technologiques correspondantes	39

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- **PET : Polyéthylène Téréphtalate**
- **PP : Polypropylène**
- **PE : Polyéthylène**
- **PVC : Polychlorure de Vinyle**
- **PS : Polystyrène**
- **ABS : Acrylonitrile Butadiène Styène**
- **FTIR : Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier)**
- **SEM : Scanning Electron Microscopy (Microscopie Électronique à Balayage)**
- **XRD : X-Ray Diffraction (Diffraction des Rayons X)**
- **TGA : Thermogravimetric Analysis (Analyse Thermogravimétrique)**
- **DSC : Differential Scanning Calorimetry (Calorimétrie Différentielle à Balayage)**
- **COD : Chemical Oxygen Demand (Demande Chimique en Oxygène)**
- **BOD : Biochemical Oxygen Demand (Demande Biochimique en Oxygène)**
- **UF : Ultrafiltration**
- **NF : Nanofiltration**
- **RO : Reverse Osmosis (Osmose Inverse)**
- **pH : Potentiel Hydrogène**
- **CF : Colorants Fonctionnels (dans le contexte des eaux contaminées par les colorants industriels)**

Introduction générale

Introduction générale.

La problématique de la pollution de l'eau constitue l'un des défis environnementaux les plus pressants auxquels le monde est confronté aujourd'hui, notamment en raison de l'augmentation continue des activités industrielles qui génèrent d'importantes quantités de polluants chimiques, en particulier les colorants industriels, connus pour leur stabilité et leur résistance à la dégradation. Cette réalité menace à la fois les écosystèmes et la santé publique, ce qui rend la recherche de solutions efficaces et durables pour le traitement des eaux usées une nécessité absolue.

Par ailleurs, l'environnement agricole en Algérie, et plus spécifiquement dans la région d'El Oued, regorge de ressources naturelles importantes, dont le palmier dattier qui constitue un pilier essentiel de l'identité économique et sociale de la région. Toutefois, cette ressource vitale génère de grandes quantités de déchets agricoles (palmes, fibres, résidus...) souvent éliminés de manière non contrôlée, ce qui représente une charge environnementale supplémentaire.

Dans le cadre de l'orientation vers une économie circulaire, la valorisation de ces déchets agricoles est devenue une option stratégique pour réduire la pollution et transformer les rejets en matériaux à forte valeur ajoutée.

Ainsi, ce travail s'inscrit dans une démarche scientifique et appliquée visant à exploiter les déchets du palmier dattier pour l'élaboration de membranes composites à base de polymères thermoplastiques et à évaluer leur efficacité dans l'élimination des polluants, en particulier les colorants industriels.

Ce manuscrit est réparti en trois chapitres, dont le premier focalise sur les matières plastiques ainsi que les déchets du palmier dattier. Le deuxième chapitre est consacré aux colorants industriels et les méthodes de filtration des eaux contaminées par ces colorants. Le dernier chapitre décrit quelques méthodes expérimentales de fabrication des filtres membrane à partir de la matrice polymère et d'un déchet végétale.

**Chapitre 1 : Littérature sur les
thermoplastiques, les déchets du
palmier dattier et leurs composites**

1. Introduction du Chapitre 1

Au fil des décennies, la recherche scientifique a connu un intérêt croissant pour les matériaux composites, notamment ceux à base de matrices thermoplastiques renforcées de fibres naturelles. Cette évolution découle de la nécessité de développer des matériaux plus durables, plus légers et respectueux de l'environnement. Parmi les fibres naturelles explorées, les déchets du palmier dattier représentent une ressource prometteuse, particulièrement dans les régions sahariennes et méditerranéennes où l'activité agricole génère d'importantes quantités de résidus organiques. La valorisation de ces déchets dans des applications industrielles innovantes offre non seulement une solution écologique, mais aussi une opportunité économique pour les communautés locales

Ce chapitre vise ainsi à dresser un état de l'art détaillé autour des thermoplastiques, des caractéristiques physico-chimiques des déchets du palmier dattier, ainsi que des propriétés mécaniques et fonctionnelles de leurs composites. Dans un premier temps, il sera question d'explorer les principales classes de polymères thermoplastiques et leur pertinence dans le domaine des composites. Ensuite, l'accent sera mis sur les propriétés intrinsèques des fibres issues du palmier dattier, leur composition et leur potentiel de renforcement. Enfin, seront abordés les défis techniques, environnementaux et économiques qui accompagnent l'utilisation industrielle de ces composites naturels.

En s'appuyant sur une littérature scientifique récente, cette analyse permettra de mieux comprendre les avantages, les limites et les perspectives d'avenir de l'intégration des déchets agricoles dans la fabrication de matériaux composites. Une attention particulière sera portée aux traitements chimiques et physiques nécessaires pour améliorer l'interface fibre-matrice, ainsi qu'aux implications environnementales liées à la production et à la fin de vie de ces matériaux composites.

2. : Les thermoplastiques – Définition, types et propriétés générales

Le terme « thermoplastique » désigne une catégorie de polymères capables de se ramollir lorsqu'ils sont chauffés et de durcir lorsqu'ils sont refroidis, ce processus pouvant être répété plusieurs fois sans dégradation chimique notable. Ce comportement s'explique par la structure moléculaire particulière de ces matériaux, constituée principalement de longues chaînes polymériques linéaires ou faiblement ramifiées, sans liaisons transversales permanentes entre elles. Ainsi, les thermoplastiques possèdent une malléabilité exceptionnelle, ce qui facilite leur traitement par des techniques telles que l'injection, l'extrusion ou encore le thermoformage [1].

Il existe une grande variété de thermoplastiques, chacun ayant des propriétés spécifiques qui déterminent ses applications Industrielles.

Parmi les plus connus figurent le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC). Le polyéthylène, par exemple, est réputé pour sa résistance chimique et sa flexibilité, tandis que le polypropylène est apprécié pour sa rigidité et sa résistance à la fatigue [2]. Chaque type de thermoplastique présente un profil de performance unique, rendant leur sélection critique selon les exigences du produit final.

Les propriétés thermomécaniques des thermoplastiques varient grandement en fonction de leur nature chimique et de leur degré de cristallinité. Un thermoplastique amorphe, tel que le polystyrène, présente généralement une transparence et une fragilité accrues, alors qu'un thermoplastique semi- cristallin, comme le polyéthylène haute densité (PEHD), offre une meilleure résistance mécanique et chimique. Ces caractéristiques sont déterminées par des facteurs tels que la masse moléculaire, les interactions intermoléculaires et la présence éventuelle de charges ou d'additifs [3].

Le comportement thermique des thermoplastiques, notamment leur température de transition vitreuse (T_g) et leur température de fusion (T_m), est un paramètre fondamental pour définir leurs domaines d'application. Par exemple, un thermoplastique avec une faible T_g sera plus souple à température ambiante, ce qui est recherché dans les applications nécessitant de la flexibilité, tandis qu'un matériau avec une haute T_g conviendra mieux aux environnements exigeants en termes de température [4].

Chapitre 1 : Littérature sur les thermoplastiques, les déchets du palmier dattier et leurs composites (propriétés).

Enfin, les enjeux liés au recyclage des thermoplastiques prennent aujourd'hui une importance grandissante. Leur capacité à être refondus sans altération majeure permet d'envisager des cycles de vie prolongés pour de nombreux produits plastiques, ce qui représente un atout majeur dans le contexte des stratégies de développement durable. Cependant, les défis liés à la contamination, à la dégradation thermique et à la perte de propriétés mécaniques lors de multiples cycles de recyclage demeurent importants [5].

3 Les déchets du palmier dattier – Nature, valorisation et potentialités

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.), cultivé principalement dans les régions arides et semi-arides, génère une quantité considérable de déchets agricoles chaque année. Ces résidus comprennent les feuilles, les tiges, les gaines foliaires et les noyaux de dattes. Traditionnellement peu valorisés, ces déchets constituent pourtant une biomasse riche en fibres cellulosiques, en lignine et en hémicelluloses, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour leur utilisation dans des applications industrielles [6].

La composition chimique des déchets du palmier dattier leur confère des propriétés mécaniques notables. Les fibres extraites des résidus de palmier présentent une bonne résistance à la traction, une faible densité et une biodégradabilité naturelle, des atouts précieux pour les industries cherchant à réduire l'empreinte carbone de leurs matériaux⁷. Ces fibres peuvent être utilisées telles quelles ou après traitement (chimique ou mécanique) afin d'améliorer leur compatibilité avec les matrices polymériques.

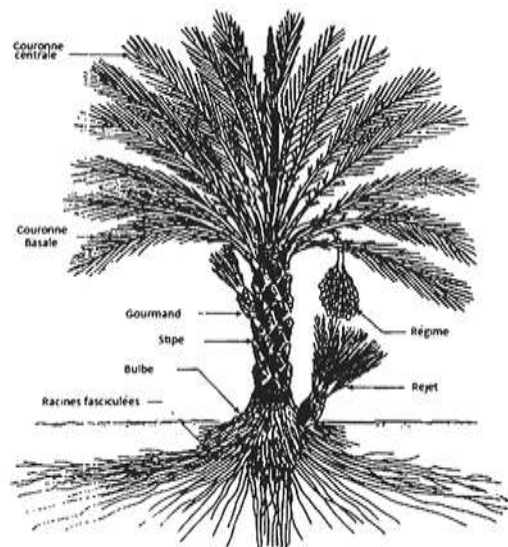


Figure (01) Image d'un palmier [7].

Plusieurs études récentes se sont intéressées aux méthodes de valorisation des déchets de palmier dattier. Parmi les approches les plus prometteuses figurent la production de biocarburants, la fabrication de panneaux composites pour le bâtiment, ainsi que leur incorporation dans des matériaux plastiques renforcés. Le recours à ces résidus permet non seulement de réduire la quantité de déchets agricoles mais aussi de proposer des alternatives écologiques aux matériaux traditionnels [8].

La valorisation des déchets du palmier dattier s'inscrit pleinement dans les démarches

Chapitre 1 : Littérature sur les thermoplastiques, les déchets du palmier dattier et leurs composites (propriétés).

d'économie circulaire. En effet, au lieu d'être brûlés ou abandonnés, causant des nuisances environnementales, ces déchets trouvent de nouvelles utilités industrielles. Ce processus contribue à la diversification des sources de matières premières, limite l'épuisement des ressources fossiles et favorise une agriculture plus durable [9].

Enfin, l'une des principales contraintes rencontrées lors de l'utilisation des déchets de palmier dans des matériaux composites reste la faible adhésion entre la fibre naturelle et la matrice polymérique. Plusieurs techniques de traitement de surface, telles que l'alcalinisation ou la greffe chimique, sont à l'étude afin d'améliorer l'interface fibre-matrice, essentielle pour obtenir des performances mécaniques optimales [10].

3.1 Composites à base de thermoplastiques et de déchets du palmier dattier – Propriétés et applications

Les composites associant des thermoplastiques à des fibres naturelles, notamment celles issues du palmier dattier, connaissent un intérêt croissant dans la recherche et l'industrie. Ces matériaux combinent les avantages des matrices polymériques (légèreté, traitement aisé, résistance chimique) aux bénéfices écologiques et mécaniques des fibres naturelles.

Ils se positionnent ainsi comme des solutions durables et performantes pour de nombreuses applications [11].

Les propriétés mécaniques des composites dépendent fortement de la qualité de l'interface fibre-matrice, divers traitements préalables des fibres ont été développés pour optimiser l'adhésion. Il a été démontré que des traitements alcalins, en éliminant certaines impuretés et en augmentant la rugosité de la surface fibreuse, peuvent améliorer significativement la résistance à la traction, au cisaillement et à la flexion des composites produits [12].

En termes de propriétés thermiques, les composites renforcés par des fibres de palmier dattier montrent une meilleure stabilité thermique par rapport aux polymères non renforcés. Ceci est attribué à la présence de lignine et de cellulose dans les fibres, qui offrent une certaine résistance à la dégradation thermique. Toutefois, une dégradation prématurée peut survenir si le traitement des fibres n'est pas correctement optimisé, d'où l'importance d'une préparation adéquate.

Les applications des composites à base de thermoplastiques et de déchets de palmier dattier couvrent un large spectre. On les retrouve dans l'automobile (panneaux intérieurs, tableaux de bord), le bâtiment (panneaux d'isolation, cloisons légères) ainsi que dans les produits de consommation courante (meubles, équipements sportifs). Leur utilisation permet non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de minimiser l'impact environnemental des produits finis [13].

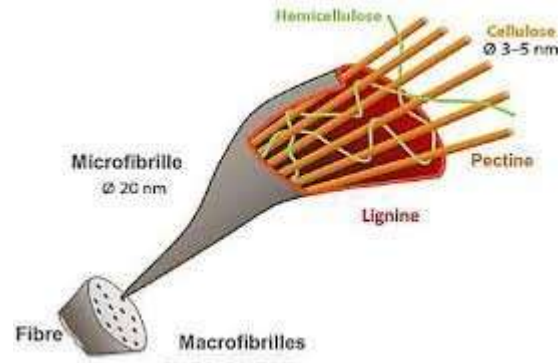


Figure (02) : Structure schématique d'une fibre végétale [14].

Malgré ces nombreux avantages, certains défis persistent, notamment en termes de durabilité en environnement humide, de compatibilité chimique à long terme et de reproductibilité des propriétés mécaniques. La recherche actuelle se concentre sur l'optimisation des formulations, l'ajout de compatibilisants chimiques et l'innovation dans les méthodes de traitement pour surmonter ces limitations et élargir les possibilités d'application [15].

3.2 Les défis techniques et environnementaux liés à l'utilisation des composites thermoplastiques à base de fibres de palmier dattier

L'un des défis majeurs dans l'utilisation des composites à base de fibres de palmier dattier est lié à la variabilité naturelle des fibres. Contrairement aux fibres synthétiques standardisées, les fibres naturelles présentent des variations significatives de diamètre, de longueur et de composition chimique selon l'origine, les conditions de croissance et les méthodes de traitement.

Cette hétérogénéité affecte directement les propriétés mécaniques finales du composite, rendant plus difficile la prévision précise des performances [16].

La durabilité à long terme des composites en conditions réelles d'utilisation représente également un défi critique. Les fibres naturelles, y compris celles du palmier dattier, ont une affinité pour l'humidité en raison de leur caractère hydrophile.

Chapitre 1 : Littérature sur les thermoplastiques, les déchets du palmier dattier et leurs composites (propriétés).

Cette absorption d'eau peut entraîner un gonflement des fibres, une perte d'adhérence avec la matrice polymérique et, à terme, une dégradation des propriétés mécaniques du composite. Des traitements hydrophobes ou l'utilisation de compatibilisants sont souvent nécessaires pour pallier cet inconvénient [17].

Sur le plan environnemental, même si les composites renforcés de fibres naturelles sont plus écologiques que ceux renforcés de fibres synthétiques, leur fin de vie soulève des questions. Le recyclage mécanique des composites thermoplastiques est théoriquement possible, mais la séparation des fibres naturelles de la matrice reste complexe. De plus, la biodégradabilité des fibres ne signifie pas nécessairement que l'ensemble du composite est biodégradable, surtout lorsque la matrice est un polymère synthétique traditionnel [18].

L'optimisation du traitement de surface des fibres est une autre problématique majeure. Bien que des méthodes telles que l'alcalinisation, le traitement au silane ou la modification enzymatique aient montré leur efficacité pour améliorer l'adhésion fibre-matrice, elles peuvent être coûteuses, énergivores et potentiellement génératrices de déchets chimiques. Le développement de traitements plus écologiques et économiques demeure donc une priorité pour la viabilité industrielle des composites naturels [18].

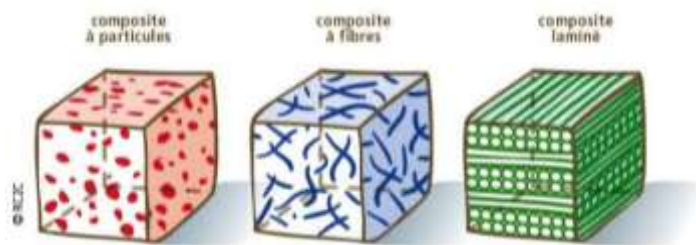


Figure (03) : Schéma d'un matériau composite [19].

Enfin, sur le plan socio-économique, la chaîne d'approvisionnement en fibres de palmier dattier reste à structurer. La collecte, le tri, le traitement et la distribution des fibres nécessitent des infrastructures adaptées et des investissements. La valorisation industrielle des déchets de palmier pourrait représenter une opportunité pour les régions productrices de dattes, en créant des emplois locaux et en augmentant la valeur ajoutée de la production agricole, à condition que des modèles économiques viables soient mis en place [20].

Conclusion du Chapitre 1

À travers ce chapitre, nous avons exploré en profondeur les principales caractéristiques des polymères thermoplastiques, les propriétés spécifiques des déchets issus du palmier dattier, ainsi que les performances mécaniques et environnementales des composites qui en résultent. L'étude de la littérature a révélé que les thermoplastiques offrent une matrice polyvalente et recyclable, idéale pour l'intégration de fibres naturelles, tandis que les fibres de palmier dattier, par leur abondance et leur composition riche en cellulose, représentent une alternative écologique et économiquement viable aux renforts synthétiques traditionnels.

Malgré les nombreux avantages identifiés, plusieurs défis techniques subsistent, notamment la variabilité des fibres naturelles, leur sensibilité à l'humidité et la nécessité de traitements de surface adaptés pour optimiser l'adhésion fibre-matrice. Ces contraintes imposent une approche rigoureuse dans la conception et le traitement des composites pour garantir leur stabilité, leur durabilité et leurs performances en usage réel.

D'un point de vue environnemental, l'utilisation des déchets du palmier dattier dans la fabrication de composites contribue à la réduction des déchets agricoles et à la promotion d'une économie circulaire. Toutefois, il reste crucial de développer des méthodes de recyclage efficaces et de veiller à la biodégradabilité globale des matériaux composites, afin d'assurer leur pleine intégration dans une perspective de développement durable.

En conclusion, les composites thermoplastiques renforcés par des fibres de palmier dattier représentent une voie prometteuse pour l'avenir des matériaux biosourcés. Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour surmonter les limitations actuelles et exploiter pleinement leur potentiel dans des applications industrielles variées.

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

1.Introduction du chapitre 2 :

Au cours des dernières décennies, l'expansion rapide de l'industrie textile et des autres secteurs utilisant des colorants synthétiques a entraîné une augmentation significative de la pollution des ressources en eau. En effet, les colorants industriels sont largement employés dans les industries textiles, du papier, du cuir, des plastiques et des cosmétiques. Leur structure chimique complexe, souvent à base d'anneaux aromatiques substitués, leur confère une grande stabilité physico-chimique, une résistance à la dégradation naturelle et une forte affinité pour les fibres, ce qui complique considérablement leur élimination des effluents aqueux.

Les eaux usées chargées de colorants posent un danger considérable pour l'environnement et la santé humaine. Leur présence dans les milieux aquatiques nuit à la pénétration de la lumière solaire, affecte les processus de photosynthèse, et compromet ainsi l'équilibre biologique des écosystèmes aquatiques. De plus, plusieurs colorants présentent des propriétés mutagènes, cancérigènes ou toxiques, rendant leur rejet sans traitement préalable particulièrement préoccupant.

Face à cette problématique, la recherche scientifique s'est intensifiée autour du développement de méthodes efficaces pour le traitement des eaux contaminées par les colorants industriels. Ces techniques se classent principalement en quatre grandes catégories : les procédés physiques (comme l'adsorption ou la filtration membranaire), les procédés chimiques (oxydation avancée, coagulation- floculation), les procédés biologiques (utilisant des micro-organismes capables de dégrader les colorants) et les méthodes combinées ou intégrées). Chaque méthode présente des avantages, des limites, et une efficacité variable selon la nature du colorant traité.

Ce chapitre vise à étudier en profondeur les effets des colorants industriels sur les eaux de traitement, en décrivant leurs caractéristiques chimiques et toxicologiques, ainsi que les différentes approches technologiques mises en œuvre pour leur élimination.

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

2. Nature et classification des colorants industriels.

2.1 Définition et nature chimique

Les colorants industriels sont des composés organiques aromatiques largement utilisés dans diverses industries, notamment le textile, le cuir, le plastique, le papier, la cosmétique et la pharmacie. Ils possèdent des structures chimiques complexes qui comprennent des systèmes conjugués d'électrons π , permettant l'absorption de certaines longueurs d'onde de la lumière visible, ce qui confère une couleur spécifique au composé. Ces structures sont composées de deux types de groupes fonctionnels essentiels : les chromophores, qui sont responsables de la couleur (tels que $-\text{N}=\text{N}-$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{NO}_2$), et les auxochromes, qui modifient l'intensité de la couleur et améliorent la solubilité (comme $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$). Par exemple, le groupe azoïque $-\text{N}=\text{N}-$ est typique des colorants azoïques, les plus utilisés à l'échelle industrielle [21].

Les colorants industriels peuvent être classifiés en plusieurs catégories selon leur structure chimique et leur mode d'application. On distingue principalement : (1) les colorants azoïques, qui représentent environ 60 à 70 % du marché mondial et sont caractérisés par la présence de liaisons azoïques ($-\text{N}=\text{N}-$) ; (2) les colorants anthraquinoniques, dérivés de l'anthraquinone ($\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_2$), utilisés pour les bleus et violets ; (3) les colorants à base de triphénylméthane, utilisés en teinturerie de papier et de soie ; (4) les colorants réactifs, qui forment des liaisons covalentes avec les fibres textiles ; (5) les colorants dispersés, non ioniques, utilisés pour les fibres hydrophobes ; (6) les colorants acides et basiques, utilisés respectivement pour les fibres protéiques et synthétiques. Chaque type présente des propriétés physico-chimiques spécifiques influençant sa fixation et sa persistance dans l'environnement [22].

Les colorants présentent une très grande stabilité chimique, thermique et photolytique. Cette stabilité est requise pour garantir la durabilité de la couleur sur les produits finis, mais elle complique aussi leur élimination lors du traitement des eaux usées. Par exemple, le Bleu de méthylène ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}$), un colorant cationique, résiste à une large gamme de pH (3 à 10), est peu biodégradable, et présente une solubilité élevée dans l'eau. Ces propriétés limitent l'efficacité des traitements conventionnels, notamment les procédés biologiques classiques, et nécessitent le recours à des méthodes plus avancées telles que l'oxydation chimique ou l'adsorption [23].

2.2 Usage industriel et dispersion environnementale

À l'échelle mondiale, plus de 10 000 types de colorants sont commercialisés, avec une production annuelle qui dépasse les 700 000 tonnes. Dans l'industrie textile, seulement 85 % des colorants sont fixés aux fibres, le reste (environ 10 à 15 %) étant rejeté dans les effluents. Ce taux élevé de rejet s'explique par les méthodes de teinture inefficaces, la nature des substrats et la mauvaise fixation des colorants. Ces rejets contiennent des colorants dissous ou partiellement hydrolysés, augmentant la charge polluante des eaux usées industrielles.

L'importance économique de ces substances contraste avec leur impact environnemental, qui est considérable et difficile à contrôler [24].

La nature chimique des colorants industriels entraîne plusieurs conséquences environnementales. Premièrement, leur présence dans les milieux aquatique réduit la pénétration de la lumière solaire, ce qui entrave la photosynthèse des plantes aquatiques. Deuxièmement, certains colorants sont toxiques, mutagènes ou cancérigènes, comme les dérivés de la benzidine, classés par l'IARC (International Agency for Research on Cancer) comme cancérigènes du groupe 2A. De plus, les processus de dégradation peuvent produire des sous-produits encore plus toxiques. Enfin, certains colorants comme les sulfonés résistent à la dégradation biologique, ce qui compromet l'efficacité des stations d'épuration classiques [21].

2.3 Effets des colorants industriels sur les écosystèmes aquatiques

1. Perturbation de la photosynthèse aquatique

Les colorants industriels, en particulier ceux à base d'azote et de structures aromatiques complexes, ont un impact significatif sur la transparence de l'eau. En colorant l'eau, ces substances réduisent considérablement la pénétration de la lumière solaire dans les zones profondes, limitant ainsi la capacité des plantes aquatiques à effectuer la photosynthèse. Ce phénomène provoque une diminution de la production primaire aquatique, avec pour conséquence un déséquilibre dans les chaînes trophiques. Par exemple, la présence de colorants comme le Rouge Congo ($C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$) a été associée à une réduction de la concentration d'oxygène dissous dans certaines rivières industrielles [21].

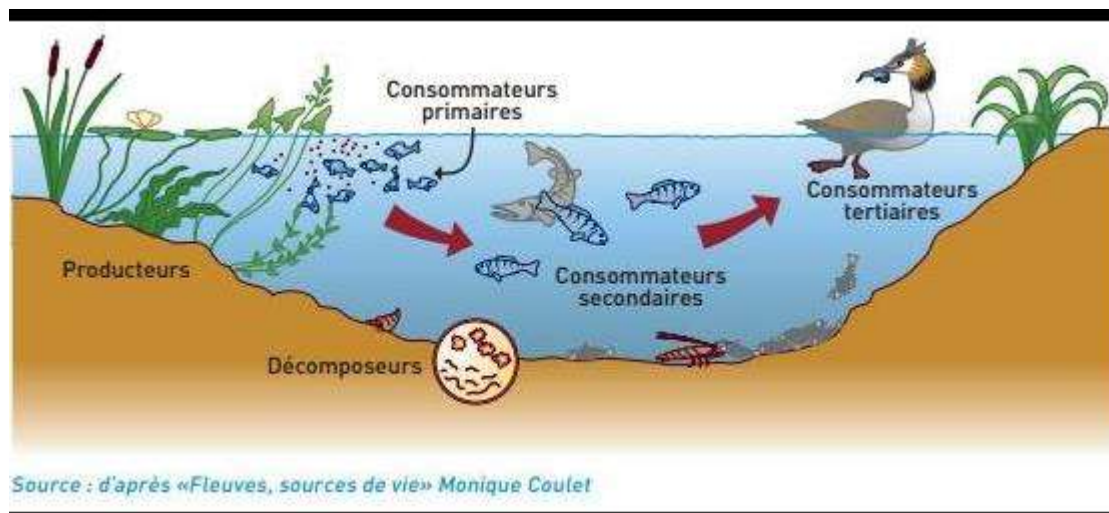


Figure (04) : Exemple des interactions dans une chaîne alimentaire aquatique [25].

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

De nombreux colorants industriels sont toxiques pour les organismes aquatiques, même à faibles concentrations. Leur toxicité varie selon la structure chimique, le pH, et le temps d'exposition. Certains colorants azoïques, une fois métabolisés, peuvent libérer des amines aromatiques, substances connues pour leur mutagénicité. Des études ont démontré que l'exposition au Bleu de méthylène ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) peut provoquer des troubles respiratoires et une réduction du taux de reproduction chez les poissons comme le *Danio rerio*. De plus, les invertébrés benthiques, qui jouent un rôle crucial dans le recyclage des nutriments, sont également affectés par la bioaccumulation des colorants [22].

Les colorants peuvent s'accumuler dans les tissus des organismes aquatiques, en particulier chez les espèces à forte teneur lipidique. Ce phénomène de bioaccumulation est préoccupant, car il permet la transmission de ces polluants dans la chaîne alimentaire. Ainsi, les prédateurs supérieurs, y compris les oiseaux piscivores et les mammifères, peuvent être indirectement exposés.

L'accumulation chronique peut induire des effets génotoxiques, des perturbations endocriniennes et une mortalité accrue. Certains colorants comme le Disperse Orange 1 ($C_{12}H_{10}N_4O_2$) ont montré des effets tératogènes chez les embryons de poissons lors d'études en laboratoire [23].

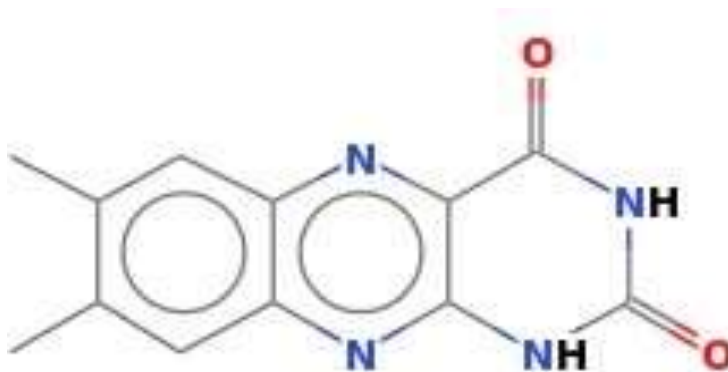


Figure (05): Chemical structure of the GFP chromophore [26].

2.3.1 Dégradation et formation de sous-produits toxiques

Lorsqu'ils sont soumis à la dégradation (photolytique, chimique ou biologique), les colorants peuvent donner naissance à des sous-produits encore plus toxiques que les composés initiaux. Par exemple, la dégradation anaérobie de certains colorants azoïques libère des amines aromatiques comme la benzidine ($C_{12}H_{12}N_2$), classée comme substance cancérigène par l'IARC. Ces sous-produits sont non seulement persistants, mais également difficiles à éliminer

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

par des procédés conventionnels. Ils peuvent interagir avec les composants organiques naturels et former des complexes stables, augmentant ainsi leur toxicité et leur persistance dans les sédiments aquatiques [24].

Les microorganismes présents dans les écosystèmes aquatiques jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques. Les colorants peuvent inhiber l'activité enzymatique de ces microbes, affectant des processus tels que la nitrification, la dénitrification et la décomposition de la matière organique. Cela se traduit par une réduction de l'autoépuration naturelle des milieux aquatiques. Par exemple, dans les bassins recevant des effluents textiles, on observe une diminution de la diversité bactérienne et une perturbation du microbiote aquatique. Cette altération microbienne a des effets en cascade sur l'ensemble de la biodiversité aquatique [21].

2. Les méthodes physiques de traitement des eaux contaminées par les colorants industriels

2.1 Introduction générale aux traitements physiques

Les méthodes physiques de traitement des eaux usées colorées reposent sur des principes de séparation sans modification chimique des polluants. Ces méthodes sont souvent utilisées comme étapes préliminaires ou complémentaires à d'autres traitements. Leur efficacité dépend des propriétés physico-chimiques des colorants : taille moléculaire, solubilité, polarité et affinité avec les surfaces adsorbantes. Ces techniques incluent l'adsorption, la filtration membranaire, la coagulation/floculation physique et les techniques électrocinétiques. Elles sont particulièrement indiquées dans le traitement des eaux contenant des colorants résistants à la dégradation biologique [21].

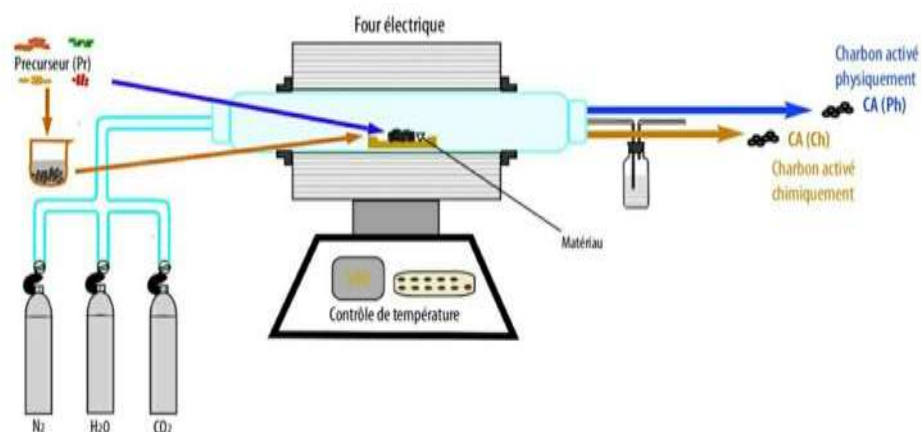


Figure (06) : Exemple de dispositif expérimental lors de l'élaboration d'un charbon actif
[27].

L'adsorption est l'une des méthodes les plus répandues pour éliminer les colorants des

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

effluents. Elle repose sur la capacité de certains matériaux solides, comme le charbon actif (composé majoritairement de C, surface poreuse $> 1000 \text{ m}^2/\text{g}$), à retenir les molécules organiques dissoutes à leur surface. L'adsorption est influencée par le pH, la température, la concentration initiale en colorants et la nature de l'adsorbant. Outre le charbon actif, d'autres matériaux tels que la zéolite, les argiles modifiées, ou les biomasses (coques de noix de coco, résidus agricoles) ont été étudiés pour leur efficacité d'adsorption. Par exemple, l'adsorption du Bleu de méthylène a montré une capacité allant jusqu'à 200 mg/g selon le type de charbon utilisé.

2.2 Filtration membranaire (MF, UF, NF, RO)

La technologie membranaire consiste à faire passer les eaux usées à travers des membranes semi-perméables permettant de séparer les colorants en fonction de leur taille moléculaire. On distingue plusieurs types : la microfiltration (MF, pores de $0.1\text{--}1 \mu\text{m}$), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (RO), cette dernière étant la plus efficace pour les colorants solubles. Les membranes en polyéthersulfone (PES) ou en acétate de cellulose sont couramment utilisées. Bien que cette technique offre un excellent taux d'élimination ($> 90 \%$ pour de nombreux colorants), elle est limitée par le colmatage des membranes, le coût élevé et la gestion des concentrats [22].

Cette méthode repose sur l'ajout de coagulants (comme $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3) qui déstabilisent les charges électriques des particules colorées, entraînant leur agglomération en floccs plus lourds qui se déposent par gravité. Bien que cette technique soit plus physico-chimique, sa composante physique (décantation, flottation) la rend essentielle dans le prétraitement des effluents textiles. La combinaison avec des polymères organiques (polyacrylamides) améliore la floculation. Les performances dépendent du pH (optimal souvent entre 6 et 8) et de la dose de coagulant. Elle est cependant moins efficace pour les colorants solubles à très faible concentration [24].

Les procédés électrocinétiques impliquent l'application d'un champ électrique à travers une cellule contenant les eaux contaminées. Les colorants chargés migrent vers les électrodes (électromigration) où ils peuvent être réduits, oxydés ou précipités. L'électrocoagulation, en utilisant des électrodes en aluminium ou fer, permet la libération d'ions métalliques qui agissent comme coagulants in situ. Ce procédé a montré une efficacité supérieure à 80% pour des colorants comme le Rouge Reactive 5 ($\text{C}_{19}\text{H}_{10}\text{C}_{12}\text{N}_7\text{Na}_4\text{O}_{12}\text{S}_3$). Malgré son efficacité, il nécessite une optimisation énergétique et un traitement des boues générées [23].

3. Les méthodes chimiques de traitement des eaux contaminées par les colorants industriels

3.1 Généralités sur les traitements chimiques

Les traitements chimiques constituent une classe importante de technologies visant à décomposer ou transformer les molécules de colorants dans les eaux usées. Contrairement aux méthodes physiques, elles modifient chimiquement les structures organiques des colorants afin de réduire leur toxicité, leur couleur ou leur biodisponibilité. Les principaux procédés comprennent l'oxydation avancée, la décoloration par agents chimiques, la réduction chimique, la précipitation et les réactions de complexation. Ces techniques sont souvent appliquées lorsque les colorants présentent une résistance élevée à la biodégradation et à l'adsorption [28].

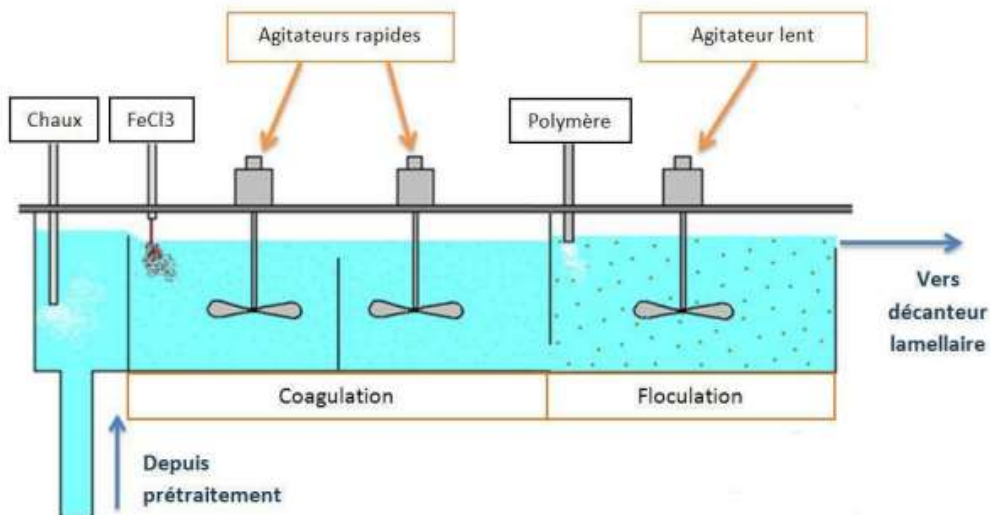


Figure (06) : Coagulation-floculation à chambre [29].

Les procédés d'oxydation avancée (AOP) incluent l'utilisation d'agents oxydants puissants comme le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), l'ozone (O₃), les radicaux hydroxyles (•OH), ou les systèmes combinés UV/H₂O₂ ou Fenton (Fe₂+/H₂O₂). Ces radicaux très réactifs attaquent les doubles liaisons et les structures aromatiques des colorants, entraînant leur dégradation en sous-produits moins toxiques ou en minéraux inoffensifs (CO₂, H₂O). Par exemple, le système Fenton a montré une efficacité de dégradation de 98 % pour le colorant Reactive Black 5 (C₂₆H₂₁N₅Na₄O₁₉S₆) après 60 minutes de traitement [30].

Toutefois, ces procédés nécessitent une optimisation stricte du pH (souvent acide, pH = 3) et de la dose de réactifs pour éviter la formation de sous-produits dangereux.

L'ozonation est une technique puissante d'oxydation qui repose sur l'injection d'ozone

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

gazeux dans l'eau contaminée. L'ozone (O_3) réagit directement avec les groupements chromophores des colorants, en particulier les doubles liaisons $C=C$ et les cycles aromatiques, ce qui provoque la rupture des structures responsables de la couleur. L'ozonation est particulièrement efficace pour les colorants azoïques et anthraquinoniques. Par exemple, le traitement à l'ozone du colorant Disperse Blue 79 ($C_{18}H_{15}NO_2$) permet une dégradation $> 90\%$ en moins de 20 minutes [31]. Cette méthode ne produit pas de boues chimiques, mais elle nécessite des équipements coûteux et un contrôle rigoureux de la sécurité à cause de la réactivité élevée de l'ozone.

.2 Réduction chimique

La réduction chimique vise à transformer les groupements azo ($-N=N-$) en amines aromatiques par des agents réducteurs tels que le dithionite de sodium ($Na_2S_2O_4$), l'hydrogène ou le fer zéro valent (Fe_0). Bien que cette méthode permette une décoloration rapide des colorants azoïques, les produits formés – comme la benzidine ou la naphtylamine – sont souvent toxiques et potentiellement cancérogènes. Par conséquent, la réduction chimique est généralement utilisée en combinaison avec une étape d'oxydation secondaire ou un traitement biologique pour éviter la persistance des sous-produits nocifs [32].

Les méthodes chimiques sont parfois combinées avec des procédés physiques ou biologiques pour une efficacité optimale. Par exemple, l'oxydation chimique peut précéder la filtration membranaire pour éviter l'encrassement, ou la coagulation chimique (avec $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$) peut être couplée à l'ozonation pour améliorer l'abattement des colorants. En outre, certaines réactions de précipitation (par exemple avec du calcium ou du magnésium) permettent de faire précipiter les complexes colorants, facilitant leur élimination. Ces combinaisons sont souvent plus coûteuses, mais elles permettent d'obtenir une qualité d'eau conforme aux normes environnementales strictes [24].

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

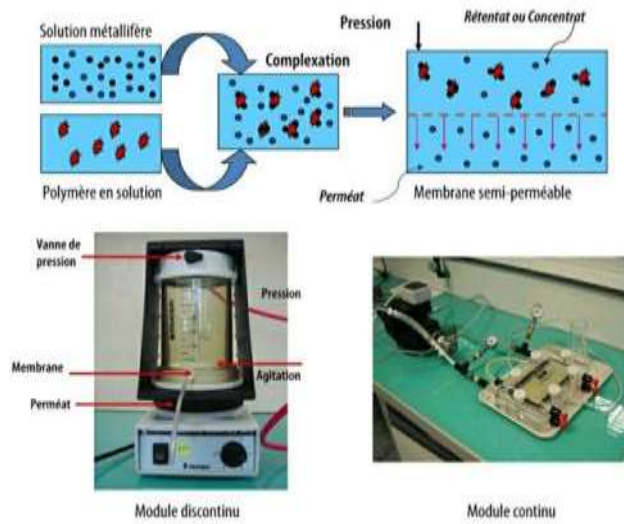


Figure (07) : Principe de l'ultrafiltration assistée par complexation et modules discontinu (batch) et continu (module plan à membrane organique) utilisés à l'échelle laboratoire [33].

Chapitre 2 : Les colorants industriels : leurs effets sur les eaux de traitement et les différentes méthodes de traitement des eaux contaminées

4. Conclusion

Les colorants industriels, bien qu'essentiels pour de nombreuses industries telles que le textile, le cuir et la papeterie, représentent un défi environnemental majeur en raison de leur forte teneur en composés organiques résistants, leur stabilité chimique et leur toxicité potentielle. Leur rejet non contrôlé dans les milieux aquatiques entraîne des perturbations écologiques significatives : inhibition de la photosynthèse, perturbation de la chaîne trophique, effets toxiques sur la faune aquatique, et potentiels risques cancérigènes ou mutagènes pour l'homme. Ces polluants colorés, souvent complexes sur le plan structural (ex. : colorants azoïques ou anthraquinoniques), nécessitent des technologies de traitement avancées et adaptées.

Les méthodes de traitement des eaux colorées se divisent en grandes familles : physiques, chimiques et biologiques. Les procédés physiques comme l'adsorption, la filtration membranaire ou la coagulation-floculation offrent une solution efficace mais parfois coûteuse et productrice de boues. Les traitements chimiques, notamment les procédés d'oxydation avancée (Fenton, ozonation...), permettent une dégradation partielle ou totale des colorants mais exigent un contrôle rigoureux des paramètres opérationnels. Enfin, les procédés biologiques, tels que le traitement par boues activées, par champignons décolorants ou par enzymes spécifiques, présentent une alternative écologique et économique, bien qu'ils soient limités par la nature toxique ou récalcitrante de certains colorants.

En somme, aucun procédé n'offre à lui seul une solution universelle ; une approche intégrée combinant plusieurs méthodes (physico-chimique-biologique) apparaît comme la voie la plus prometteuse pour éliminer efficacement les colorants des eaux usées industrielles. Les avancées récentes dans les nanotechnologies, la catalyse hétérogène et la bioremédiation ouvrent de nouvelles perspectives pour un traitement durable, respectueux de l'environnement et conforme aux réglementations internationales. Toutefois, la généralisation de ces solutions passe par un investissement accru en recherche appliquée, une volonté politique affirmée et une coopération renforcée entre industrie, chercheurs et pouvoirs publics.

Chapitre 3 : Les méthodes de préparation des filtres composites

1. Introduction

Dans le contexte actuel de la raréfaction des ressources en eau potable et de la contamination croissante des eaux naturelles par des polluants industriels, agricoles et domestiques, le développement de technologies innovantes pour le traitement de l'eau est devenu une nécessité urgente. Parmi ces technologies, les filtres composites se présentent comme une solution prometteuse, alliant les propriétés complémentaires de plusieurs matériaux pour améliorer la performance de la filtration et la capacité d'élimination des polluants. Ces filtres hybrides permettent d'optimiser les processus de purification, que ce soit par adsorption, photocatalyse, échange ionique ou filtration physique.

La préparation des filtres composites repose sur un ensemble de méthodes expérimentales rigoureuses, visant à obtenir des matériaux aux propriétés physico-chimiques contrôlées, adaptés aux besoins spécifiques du traitement des eaux. Ces méthodes varient selon la nature des composants utilisés (polymères, nanoparticules, fibres naturelles, etc.), leur combinaison, ainsi que la structure finale recherchée (membranes, mousses, couches minces, etc.). Le choix et la maîtrise de ces techniques expérimentales influencent directement l'efficacité, la durabilité et la fonctionnalité des filtres composites.

Ce travail vise à présenter de manière détaillée les principales méthodes expérimentales employées dans la préparation des filtres composites, en mettant en lumière leurs principes, leurs avantages, leurs limites, ainsi que des exemples concrets issus de la recherche récente. Une attention particulière sera portée aux méthodes physico-chimiques telles que la polymérisation, l'électrofilage, la sol-gel, ainsi qu'aux techniques d'incorporation de charges actives et nanomatériaux.

Par ailleurs, l'étude inclura une analyse comparative de ces méthodes, accompagnée de données expérimentales et de tableaux synthétiques permettant d'évaluer leur impact sur les performances finales des filtres. L'objectif est d'offrir une vision claire et complète des stratégies expérimentales innovantes qui contribuent à l'avancement des filtres composites dans le domaine du traitement des eaux.

2. Les principes fondamentaux de fabrication des filtres composites

Les filtres composites sont des dispositifs multifonctionnels issus de l'ingénierie des matériaux avancés, utilisés principalement pour le traitement des eaux industrielles, domestiques et souterraines. Leur conception repose sur l'intégration de deux matériaux de natures différentes : une matrice (souvent polymère) qui joue un rôle de structure porteuse, et une phase dispersée (souvent minérale ou fonctionnelle) responsable de l'activité spécifique du filtre. Ce couplage permet d'amplifier les performances globales en combinant les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques des deux phases. Ce principe de synergie fonctionnelle constitue la pierre angulaire de l'efficacité des filtres composites modernes [34].

D'un point de vue structurel, la matrice assure la forme, la résistance mécanique et la perméabilité du filtre, tandis que la phase active, comme la zéolithe, les nanoparticules métalliques ou le charbon actif, interagit directement avec les contaminants. Le choix des matériaux dépend des polluants ciblés : les métaux lourds, les substances organiques, les colorants, ou encore les micro-organismes. À titre d'exemple, un filtre composé de polyacrylonitrile (PAN) et de zéolithe est couramment utilisé pour piéger des ions métalliques tels que Pb^{2+} et Cd^{2+} grâce aux capacités d'adsorption ionique de la zéolithe [35]. Voici un tableau qui compare les différents types de matériaux utilisés dans la fabrication des filtres composites :

Tableau (01) : Les différents types de matrices utilisées dans la fabrication des filtres composites

Type de matrice	Exemples	Avantages	Inconvénients
Polymère synthétique	PAN, PSU, PET	Flexible, facile à modeler, chimie contrôlée	Peu biodégradable, parfois coûteux
Biopolymère	Chitosane, PLA	Écologique, biodégradable	Stabilité chimique limitée
Matrice céramique	Alumine, Silice	Résistance thermique élevée	Fragilité, coût de production élevé

Tableau (02) : Types de charges actives utilisées dans les filtres composites et leurs applications

Type de charge active	Exemples	Fonction principale	Polluants ciblés
Zéolithe	ZSM-5, Clinoptilolite	Échange d'ions, adsorption	Métaux lourds, ammonium
Charbon actif	Poudre, granules	Adsorption physique	Substances organiques, pesticides
Nanoparticules métalliques	Fe ₃ O ₄ , TiO ₂ , ZnO	Photocatalyse, réactions redox	Phénols, colorants, bactéries
Argiles	Bentonite, montmorillonite	Adsorption, filtration	Polluants organiques et inorganiques

Les mécanismes mis en jeu dans les filtres composites ne sont pas univoques ; plusieurs phénomènes peuvent coexister dans une même structure. La filtration mécanique, qui repose sur la taille des pores, permet de retenir les matières en suspension. En parallèle, l'adsorption intervient pour capter les polluants dissous à travers des interactions électrostatiques, hydrophobes ou des liaisons chimiques. Certains filtres incluent également des fonctions photocatalytiques, comme ceux intégrant le TiO₂, qui sous exposition à la lumière UV dégradent les contaminants organiques récalcitrants [37].

Tableau (03) : la diversité des mécanismes en fonction du matériau composite utilisé :

Filtre composite	Mécanisme dominant	Exemple de polluant	Remarques techniques
PAN/Zéolithe	Adsorption ionique	Pb ²⁺ , Cd ²⁺	Efficace à pH neutre
Chitosane/Fe ₃ O ₄	Adsorption + magnétisme	Arsenic, phosphates	Récupération facile par champ magnétique
PSU/Charbon actif	Adsorption physique	Phénols, HAPs	Très grande surface spécifique
Fibre de verre/TiO ₂	Photocatalyse	Pesticides, colorants	Nécessite source UV
PLA/Argile	Filtration + adsorption	Matières en suspension	Biodégradable, utile pour systèmes jetables

Ce qu'il faut souligner, c'est que l'efficacité d'un filtre composite dépend de plusieurs paramètres : le rapport entre la matrice et la charge, la disposition tridimensionnelle des matériaux, la taille des pores, ainsi que les conditions environnementales (pH, température, durée de contact). Ces paramètres sont optimisés à travers des expérimentations en laboratoire, à l'aide de techniques de caractérisation comme la microscopie électronique (SEM), la diffraction des rayons X (XRD), ou la spectroscopie infrarouge (FTIR), afin de corréler la structure avec la performance [38].

En conclusion, les filtres composites constituent une solution technologique puissante et adaptable pour faire face à des défis environnementaux variés. Leur conception, inspirée par la complémentarité des matériaux, permet une efficacité accrue en matière de rétention, de sélectivité et de durabilité. La compréhension approfondie de leurs principes fondamentaux est donc essentielle pour orienter les choix de matériaux et de procédés dans les applications réelles de traitement de l'eau.

3. Les méthodes expérimentales de synthèse des filtres composites

La fabrication expérimentale des filtres composites repose sur une panoplie de méthodes scientifiques visant à obtenir des matériaux aux structures contrôlées, dotés de propriétés spécifiques pour le traitement des eaux. Ces méthodes se déclinent selon la nature des composants utilisés (polymères, charges actives, additifs) ainsi que la finalité d'usage (adsorption, filtration, photocatalyse). Chaque méthode expérimentale est choisie pour sa capacité à favoriser une dispersion homogène des phases, une interconnexion des pores, et une stabilité chimique de l'ensemble. Les techniques les plus courantes sont : la méthode de moulage par voie humide (phase inversion), l'électrofilage (electrospinning), la synthèse in situ, et le pressage à chaud, chacune ayant ses conditions de mise en œuvre et ses résultats spécifiques [34].

La méthode de moulage par inversion de phase est largement utilisée pour fabriquer des membranes composites à base de polymères comme le polyacrylonitrile (PAN) ou le polysulfone (PSU). Elle consiste à dissoudre le polymère dans un solvant organique (comme le DMF), puis à ajouter la charge active (zéolithe, charbon actif). La solution est ensuite coulée sur une surface plate et immergée dans un bain de coagulation (généralement de l'eau) provoquant la solidification de la membrane par séparation de phase. Cette technique permet de générer une porosité contrôlée et une bonne dispersion de la charge.

Chapitre 3 : Les méthodes expérimentales pour la préparation des filtres composites

Quant à la technique de l'électrofilage, elle permet de produire des nanofibres ultrafines en appliquant un champ électrique sur une solution polymère visqueuse. Ce procédé est particulièrement adapté pour fabriquer des filtres ayant une très grande surface spécifique, ce qui les rend idéaux pour l'adsorption de polluants organiques ou métalliques. Par exemple, une solution de chitosane/Fe₃O₄ peut être électrofilée pour obtenir des filtres composites magnétiques, facilement récupérables après usage [38].

La synthèse in situ, de son côté, consiste à faire croître la charge active directement à l'intérieur de la matrice polymère. Cela permet une meilleure interaction chimique entre les composants. Un exemple concret est la formation de nanoparticules de TiO₂ dans une matrice de polyméthacrylate, conférant au filtre des propriétés photocatalytiques sans nécessiter d'étapes de mélange supplémentaires. Cette méthode est idéale pour les applications nécessitant une forte cohésion chimique entre les phases

Enfin, la méthode de pressage à chaud (hot pressing) est utilisée pour la fabrication de filtres composites à base de céramiques ou de polymères thermoplastiques. Elle permet d'obtenir des formes compactes et robustes, avec un bon contrôle de la microstructure. Cette technique est très répandue dans l'industrie pour la fabrication de cartouches filtrantes.

Tableau (04) : les principales méthodes expérimentales de préparation des filtres Composites :

Méthode de synthèse	Matériaux concernés	Avantages	Inconvénients
Inversion de phase	PAN, PSU, zéolithe, charbon actif	Bonne porosité, reproductibilité	Utilisation de solvants organiques
Électrofilage	Chitosane, PLA, Fe ₃ O ₄ , Ag	Haute surface spécifique, nanostructuration	Temps de fabrication long, optimisation délicate
Synthèse in situ	PMMA/TiO ₂ , PAN/ZnO	Interaction forte entre phases, stabilité	Complexité de contrôle des réactions chimiques
Pressage à chaud	Céramique, polymères thermoplastiques	Solidité mécanique, bon compactage	Température élevée requise
Électrofilage	Chitosane, PLA, Fe ₃ O ₄ , Ag	Haute surface spécifique, nanostructuration	Temps de fabrication long, optimisation délicate

Chapitre 3 : Les méthodes expérimentales pour la préparation des filtres composites

Chaque méthode impose également une série de paramètres expérimentaux critiques à surveiller tels que la viscosité de la solution, la température de cuisson, la vitesse de séchage, ou l'intensité du champ électrique (dans le cas de l'électrofilage). Une mauvaise maîtrise de ces paramètres peut altérer gravement la qualité des filtres, réduire leur efficacité ou entraîner une désagrégation prématurée.

Tableau (05) : Les paramètres expérimentaux typiques selon la méthode utilisée :

Méthode	Paramètre critique	Valeur typique	Effet sur le produit final
Inversion de phase	Température de coagulation	20–25 °C	Contrôle de la taille des pores
Électrofilage	Tension électrique	15–25 kV	Diamètre des nanofibres
Synthèse in situ	pH de la solution	6–8	Formation stable des nanoparticules
Pressage à chaud	Température de compression	120–180 °C	Densité, résistance mécanique

En résumé, la maîtrise des méthodes expérimentales de synthèse est déterminante pour la performance finale des filtres composites. Elle conditionne non seulement la structure du matériau, mais aussi ses capacités fonctionnelles. Le choix de la méthode dépend donc de l'application ciblée, des moyens techniques disponibles, et du niveau de précision souhaité dans les performances du filtre.

4. Les propriétés physico-chimiques des filtres composites

Les filtres composites, du fait de leur structure hybride alliant polymères et charges fonctionnelles (zéolithes, oxydes métalliques, charbon actif, etc.), présentent un éventail complexe de propriétés physico-chimiques qui déterminent leur efficacité dans le traitement des eaux. Ces propriétés incluent notamment la porosité, la surface spécifique, la distribution granulométrique, la stabilité thermique, le pH au point de charge zéro (pHpzc), ainsi que la résistance chimique et mécanique. La maîtrise de ces caractéristiques permet d'adapter le filtre à différentes applications comme l'adsorption des métaux lourds, la rétention des particules colloïdales ou la dégradation photocatalytique des polluants organiques

L'une des propriétés fondamentales est la surface spécifique, généralement mesurée par la méthode BET (Brunauer–Emmett–Teller). Une surface élevée permet une plus grande capacité d'adsorption. Par exemple, un filtre composite contenant du charbon actif peut atteindre jusqu'à 1200 m²/g, ce qui lui confère une forte affinité pour les molécules organiques. À l'inverse, une surface plus faible est souvent liée à des matériaux denses ou mal poreux, réduisant ainsi leur efficacité [34].

La porosité est une autre caractéristique critique, distinguée en micro-, méso- et macropores. Les micropores (<2 nm) sont efficaces pour l'adsorption moléculaire, tandis que les macropores (>50 nm) facilitent le flux d'eau et minimisent la perte de charge. Un bon filtre composite combine généralement les trois types pour un équilibre optimal entre capacité et débit. Une membrane à base de PAN/zéolithe, par exemple, affiche une porosité totale de 70 % avec un diamètre de pore moyen de 5 µm, ce qui est favorable à la filtration des particules en suspension [35].

Le pH au point de charge zéro (pHpzc) constitue un paramètre crucial dans la détermination du comportement de surface du filtre. À un pH inférieur au pHpzc, la surface du filtre est globalement chargée positivement, ce qui favorise l'adsorption des anions. Inversement, au-dessus de ce point, elle devient négativement chargée, attirant alors les cations métalliques comme Cu²⁺ ou Pb²⁺. Un filtre composite à base de chitosane/Fe₃O₄ possède par exemple un pHpzc de 6,2, ce qui le rend efficace dans des eaux légèrement acides [38].

En ce qui concerne la stabilité thermique, elle est évaluée par analyse thermogravimétrique (TGA). Les filtres composites à base de polymères naturels comme le chitosane sont thermiquement stables jusqu'à 250 °C, tandis que ceux à base de polymères synthétiques (comme le polyéthylène sulfone) peuvent résister à des températures supérieures à 350 °C. Cette propriété est essentielle lorsque les filtres sont exposés à des conditions

thermiques fluctuantes ou doivent être régénérés par chauffage.

La résistance mécanique est aussi déterminante pour assurer la longévité du filtre. Elle est souvent mesurée en termes de module de Young ou de résistance à la traction. Les composites renforcés par des charges comme l'oxyde de titane (TiO_2) présentent une augmentation significative de ces propriétés. Une étude a démontré qu'un ajout de 5 % en poids de TiO_2 dans une matrice de PSU permettait une augmentation de 20 % de la résistance à la rupture [37].

Tableau (06) : les principales propriétés physico-chimiques de quelques filtres composites utilisés dans le traitement des eaux :

Type de filtre composite	Surface spécifique (m^2/g)	Porosité (%)	pHpzc	Température de décomposition ($^\circ\text{C}$)	Résistance mécanique (MPa)
PAN/Zéolithe	450	70	6.8	320	3.5
Chitosane/ Fe_3O_4	320	62	6.2	250	2.1
PSU/ TiO_2	390	65	7.1	360	4.2
Charbon actif/polyéthylène	1200	55	6.5	300	3.0

Ces propriétés peuvent être optimisées par des traitements post-fabrication, comme le séchage à haute température, le traitement acide ou l'activation alcaline. Ces traitements modifient les sites actifs, la rugosité de surface et la fonctionnalité chimique des pores, ce qui améliore la sélectivité et la capacité d'adsorption du filtre. Par exemple, une activation alcaline du charbon actif peut accroître sa surface spécifique de 40 %, tout en augmentant son affinité pour les composés phénoliques [34].

Ainsi, la compréhension et le contrôle des propriétés physico-chimiques sont essentiels dans la conception rationnelle des filtres composites. Ces caractéristiques déterminent leur efficacité, leur sélectivité et leur durabilité, faisant de ces matériaux des outils incontournables dans la lutte contre la pollution hydrique.

5. Les applications environnementales des filtres composites dans le traitement des eaux

Les filtres composites se distinguent aujourd'hui comme une technologie de pointe dans le domaine de la dépollution hydrique, en raison de leur capacité à traiter une large gamme de polluants dans des contextes environnementaux variés. Grâce à la combinaison de matrices polymériques (naturelles ou synthétiques) et de charges actives (zéolithes, oxydes métalliques, charbon actif, etc.), ces matériaux permettent d'appliquer plusieurs mécanismes de traitement simultanément : adsorption, filtration, catalyse, ou encore échange d'ions. Cette polyvalence fait des filtres composites une solution stratégique dans les secteurs de l'eau potable, des eaux industrielles et des eaux usées municipales [38].

L'une des applications majeures est l'élimination des métaux lourds (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+} , etc.), présents dans les rejets miniers, métallurgiques et électroniques. Des membranes composites à base de chitosane/ Fe_3O_4 ou de zéolithe/PAN ont montré une efficacité d'élimination supérieure à 95 % pour le plomb et le cadmium à pH neutre, grâce à une forte affinité de leurs sites fonctionnels pour ces ions. Cette capacité est particulièrement recherchée dans les régions où les nappes phréatiques sont contaminées par des résidus industriels non traités.

Un autre champ d'application crucial est la dégradation des polluants organiques persistants (POP), tels que les pesticides, les colorants textiles ou les résidus pharmaceutiques. Les filtres composites dotés de nanoparticules de TiO_2 ou de ZnO peuvent agir comme photocatalyseurs sous irradiation UV ou solaire. Par exemple, un composite TiO_2/PSU exposé à une lumière de 365 nm permet la dégradation de plus de 80 % du colorant méthylène bleu en moins de 60 minutes. Cette approche est respectueuse de l'environnement et évite la production de boues secondaires [34].

Dans les stations d'épuration urbaines, les filtres composites sont aussi utilisés pour la filtration des matières en suspension (MES) et la réduction de la demande chimique en oxygène (DCO). Grâce à leur structure poreuse hiérarchique, ils piègent efficacement les particules colloïdales, les bactéries, et parfois même les virus. Des essais sur le terrain ont démontré qu'un système de filtration à base de PAN/zéolithe pouvait réduire la concentration en MES de 200 mg/L à moins de 5 mg/L après passage à travers une cartouche composite [38].

Par ailleurs, les filtres composites sont employés pour le traitement des effluents textiles, particulièrement riches en colorants azoïques difficiles à dégrader. Des matériaux hybrides contenant du charbon actif ou de l'oxyde de manganèse ont été intégrés dans des colonnes de traitement, permettant d'atteindre des taux de rétention colorimétrique supérieurs à 90 %.

Une étude menée en Inde a montré qu'une usine pilote utilisant des filtres composites pour traiter les rejets d'une fabrique de jeans a pu réutiliser jusqu'à 70 % de l'eau épurée dans son processus industriel [34].

Tableau (07) : Quelques applications environnementales typiques des filtres composites :

Type de filtre composite	Polluant ciblé	Efficacité moyenne (%)	Type d'application
Chitosane/Fe ₃ O ₄	Pb ²⁺ , Cd ²⁺	96 %	Traitement des eaux industrielles (mines, batteries)
PSU/TiO ₂	Méthylène bleu, pesticides	85–90 %	Photodégradation de polluants organiques
PAN/Zéolithe	MES, bactéries	97 %	Filtration des eaux usées municipales
Charbon actif/polyéthylène	Phénols, résidus pharmaceutiques	92 %	Traitement tertiaire des effluents urbains
Zéolithe/alginat	NH ₄ ⁺ , ions lourds	88 %	Traitement de lixiviats de décharges

Enfin, il est important de souligner que l'application des filtres composites dans un contexte environnemental doit être accompagnée d'études de régénération et de durabilité. Certains filtres peuvent être régénérés plusieurs fois (jusqu'à 10 cycles) par lavage alcalin ou thermique, ce qui diminue leur coût opérationnel et leur impact environnemental (Singh, 2023, 121). Cette durabilité est un atout majeur pour les pays en développement qui cherchent à implanter des solutions de traitement peu coûteuses, efficaces et facilement maintenables.

En conclusion, les filtres composites constituent aujourd'hui une alternative prometteuse et adaptable pour répondre aux enjeux croissants de la pollution hydrique. Leur intégration dans les systèmes de traitement environnementaux offre une solution durable, multifonctionnelle et évolutive.



Figure (13) : Filtres à sable continus : applications [41].

6. Les défis et perspectives des filtres composites dans le futur du traitement des eaux

Les filtres composites représentent aujourd'hui une technologie clé dans le traitement des eaux grâce à leur capacité à combiner les propriétés de différents matériaux pour une meilleure élimination des contaminants. Toutefois, malgré les progrès significatifs réalisés, plusieurs défis subsistent quant à leur mise en œuvre à grande échelle et leur efficacité à long terme.

Le premier défi majeur est lié à la stabilité et la durabilité des matériaux composites utilisés dans la filtration. En effet, certaines matrices polymériques ou nanocomposites peuvent se dégrader sous l'effet des agents chimiques présents dans les eaux usées ou lors d'expositions prolongées aux rayonnements UV. Par exemple, les filtres à base de polymères modifiés par des nanoparticules de TiO_2 peuvent perdre leur efficacité photocatalytique après plusieurs cycles de traitement, ce qui limite leur réutilisation [42]. La gestion de cette dégradation nécessite le développement de matériaux plus robustes ou des stratégies de régénération efficaces, afin d'assurer un fonctionnement durable.

Un autre obstacle concerne le coût de fabrication. Les filtres composites incorporant des nanomatériaux avancés (argent, graphène, oxyde de zinc) impliquent souvent des procédés complexes et coûteux, ce qui limite leur utilisation dans les régions à ressources limitées.

De plus, le contrôle précis des propriétés physico-chimiques des matériaux composites demande des équipements spécialisés, rendant la production industrielle difficile à grande échelle. Des recherches récentes portent sur l'utilisation de matériaux naturels ou recyclés, comme les fibres végétales ou le biochar, afin de réduire les coûts tout en maintenant une bonne performance [43].

Sur le plan environnemental, la libération potentielle de nanomatériaux toxiques dans les milieux aquatiques est un sujet préoccupant. Des études ont montré que certaines nanoparticules peuvent migrer hors de la matrice composite et provoquer des effets nocifs sur la faune et la flore aquatiques. Cela implique de développer des systèmes où les composants actifs sont fortement ancrés dans la matrice, ou d'utiliser des nanomatériaux biodégradables et moins toxiques [45].

Malgré ces défis, les perspectives technologiques sont très encourageantes. L'intégration de matériaux à fonctionnalité multiple, tels que les composites à réponse stimuli (température, pH, lumière), permet de concevoir des filtres intelligents capables d'adapter leur activité en fonction des conditions de traitement [46]. Par exemple, des membranes composites thermo-réversibles peuvent moduler leur porosité selon la température, facilitant ainsi le nettoyage automatique et prolongeant leur durée de vie.

Enfin, la combinaison des filtres composites avec d'autres procédés innovants, comme la photocatalyse assistée par LED ou l'électrofiltration, ouvre la voie à des systèmes hybrides hautement performants et économes en énergie [47]. Ces systèmes sont particulièrement adaptés pour traiter des eaux industrielles complexes ou pour une utilisation dans des zones isolées, où l'autonomie énergétique est cruciale.

Tableau (08) : les principaux défis et les avancées technologiques correspondantes :

Défis	Solutions actuelles / Perspectives	Références
Dégradation des matériaux	Développement de matériaux robustes et régénération cyclique	Kumar et al. 2022
Coût élevé de production	Utilisation de matériaux naturels et recyclés	Martinez et al. 2021
Toxicité et migration des nanomatériaux	Matrices à forte immobilisation et nanomatériaux biodégradables	Singh & Sharma, 2022
Adaptabilité aux conditions variables	Composites stimuli-réactifs (thermo, photo, pH)	Zhao et al. 2024
Intégration dans des systèmes hybrides	Combinaison avec photocatalyse LED, électrofiltration	García et al. 2023

En conclusion, les filtres composites continuent de montrer un potentiel considérable dans le traitement des eaux, à condition que les défis techniques, économiques et environnementaux soient abordés avec des approches multidisciplinaires. Les innovations en matériaux intelligents et en systèmes hybrides offrent un avenir prometteur pour une filtration plus efficace, durable et respectueuse de l'environnement.



Figure (15) : Filtres à charbon actif [48].

7. Conclusion du chapitre 3

Les méthodes expérimentales de préparation des filtres composites constituent aujourd'hui un champ de recherche dynamique et multidisciplinaire, au croisement de la science des matériaux, de la chimie environnementale et du génie des procédés. L'exploration de techniques telles que la synthèse sol-gel, l'électrofilage, l'immobilisation des agents actifs ou encore la fabrication par voie verte, a permis d'élargir les possibilités de conception de filtres plus performants, plus sélectifs et plus durables.

Ce chapitre a permis de mettre en lumière non seulement la diversité des approches expérimentales disponibles, mais aussi les paramètres critiques qui influencent directement les propriétés finales des matériaux filtrants : taille des pores, stabilité chimique, affinité des surfaces, conductivité, etc. Chaque méthode présente ses propres avantages en fonction du type de polluants à traiter (métaux lourds, colorants, pesticides, microplastiques...), et des contraintes d'application (traitement en continu, en milieu rural, en industrie, etc.).

Cependant, comme nous l'avons souligné dans la dernière section, de nombreux défis subsistent, qu'ils soient liés à la toxicité potentielle de certains nanomatériaux, à la reproductibilité des méthodes, à l'optimisation des coûts de production ou encore à la durabilité des filtres dans des conditions réelles. Ces limites appellent à une poursuite des recherches en direction de matériaux plus écocompatibles, de procédés de fabrication plus simples, et d'une meilleure intégration des filtres composites dans des systèmes hybrides intelligents.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que la problématique de la pollution environnementale et de l'accumulation des déchets agricoles constitue l'un des défis majeurs de notre époque, nécessitant des solutions innovantes et durables. À travers ce mémoire, nous avons mis en évidence le potentiel considérable qu'offre la valorisation des résidus du palmier dattier, particulièrement abondants dans la région d'El Oued, pour le développement de nouveaux matériaux à forte valeur ajoutée, tels que les membranes composites à base de polymères thermoplastiques.

Néanmoins, il subsiste des perspectives de recherche afin de surmonter certaines limites, notamment la stabilité des membranes dans diverses conditions de fonctionnement, l'optimisation de leur performance à long terme, ainsi que l'élargissement de leurs applications à d'autres types de polluants.

Ce travail se veut ainsi une première étape vers le renforcement de la culture de l'économie circulaire et de l'innovation environnementale. Il ouvre de nouvelles perspectives pour les chercheurs et les praticiens dans le domaine du génie de l'environnement et des technologies durables, contribuant à la fois au développement local et national et à la préservation de l'équilibre écologique.

Bibliographie

Bibliographe

- [1] Calliste, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (p. 45).
- [2] Ashby, W. D., & Jones, D. (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design* (p. 67). Elsevier.
- [3] F. R., & J. R. (2006). *Polymer Science and Technology* (p. 88). Pearson.
- [4] Strong, A. B. (2006). *Plastics: Materials and Processing* (p. 88). Pearson.
- [5] Hopewell, J., Dvorak, R., & Nelles, E. (2019). Plastics recycling Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1526-2115.
- [6] El Hadrami, A., & Al-Khayri, J. M. (2012). Socioeconomic and traditional importance of date palm. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 371.
- [7] Aquaportail. (s.d.). *Phyllophore*. Consulté le 13 novembre 2025, sur <https://www.aquaportail.com/fiche-phylophore.html>.
- [8] Bensalah, N., et al. (2015). Valorization of date palm waste for sustainable applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47-202.
- [9] Kaabi, K., & Al-Maadeed, M. (2016). Date palm fiber composites. In *Handbook of Polymer Composites for Engineers* (p. 10).
- [10] Hassan, E. A. (2018). Potential utilization of date palm fibers in composites. *Industrial Crops and Products*, 111, 334.
- [11] Khalil, H. (2010). Natural fibre reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 495.
- [12] Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press.
- [13] Sanjay, M. (2016). Applications of natural fiber composites: An overview. *Natural Resources*, 7, 4.
- [14] Álvarez, C. F. M., Reyes-Sosa, F., & Díez, B. (2016). Enzymatic hydrolysis of biomass from wood. *Microbial Biotechnology*, 149-156.
- [15] Pickering, K. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98.
- [16] Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24, 221.
- [17] Almansour, F. (2017). Moisture absorption characteristics and their effect on mechanical properties of date palm fibre reinforced composites. *Construction and Building Materials*, 978.
- [18] Dittenber, D. B., & GangaRao, H. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and*

Manufacturing, 1419.

[19] Gharbi, A. (s.d.). *Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électriques* [Mémoire de master, Université X]. Consulté le 13 novembre 2025, sur URL_du_document

[20] Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 25.

[21] Robinson, T. (2007). Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 36.

[22] Waring, D. R., & Hallas, G. (1990). *The Chemistry and Application of Dyes* (p. 51). Springer.

[23] Forgacs, E., Cserháti, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review. *Environment International*, 316.

[24] Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., & Govindwar, S. P. (2011). Ecofriendly decolorization and degradation of industrial textile dyes by newly isolated *Pseudomonas sp.* *Journal of Hazardous Material*, 185.

[25] Mickaël. (2018, March 12). Les 2 rôles de la carpe commune dans la chaîne alimentaire.

[26] Khrenova, M., Collins, J., Topol, I., & Nemukhin, A. (2013, February 26). Quantum chemistry in studies of fluorescent and photosensing proteins.

[27] Jeanne-Rose, V., Durimel, A., Passé-Courtin, N., & Gaspard, S. (2020). Les charbons actifs pour le traitement des eaux usées. *books.openedition*, 241-273.

[28] Sharma, Y. C., Srivastava, V., & Singh, V. K. (2020). *Green chemistry for dyes removal from wastewater: Advances and applications* (p. 213). Elsevier.

[29] Aicha, O. (2018). Elimination d'un composé pharmaceutique (amoxicilline) par coagulation floculation en eau distillée (p. 17).

[30] Kansal, S. K., Singh, M., & Sud, D. (2007). Studies on photodegradation of two commercial dyes in aqueous phase using different photocatalysts. *Journal of Hazardous Materials*, 1023.

[31] Kuo, W. G. (1992). Decolorizing dye wastewater with Fenton's reagent. *Water Research*, 455.

[32] Slokar, Y. M., & Marechal, A. M. L. (1998). Methods of decoloration of textile wastewaters. *Dyes and Pigments*, 109.

[33] Desbrières, J., & Guibal, É. (2020). Eaux industrielles contaminées. 275-306.

[34] Ahmed, S. (2021). *Nanocomposite Materials for Water Purification* (p. 152). Woodhead Publishing.

[35] Zhang, X., & Li, Y. (2021). Development of PAN/Zeolite composite membranes for

removal of heavy metal ions. *Journal of Membrane Science*, 91.

[36] Strainer-filter. (s.d.). Strainer-filter. Consulté le 13 novembre 2025, sur <https://www.exemple.com/strainer-filter>

[37] Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, 238, 38.

[38] Singh, R. K. (2023). *Composite Materials for Wastewater Treatment* (p. 118).

[39] Usine de purificateur d'eau personnalisée Koyo, 2018, https://fr.made-in-china.com/co_koyomachinery/product_Koyo-Customized-Water-Purifier-Plant_uonuggyuug.html .

[40] Sanchez, C. (2013). Chimie des matériaux hybrides (p. 88).

[41] Kumar, R. (2022). *Advanced Nanocomposite Materials for Water Purification* (p. 214).

[42] Liu, W., & Wang, H. (2023). Cost-effective composite filters using natural fibers for water treatment. *Sustainable Materials and Technologies*, 57.

[43] Guillosoy, R., Le Roux, J., Mailler, R., Vulliet, E., Morlay, C., Nauleau, F., Gasperi, J., & Rocher, V. (2019). Micropolluants dans les eaux usées: qu'apporte un traitement avancé par adsorption sur charbon actif après un traitement conventionnel. *TSM / Qualité des eaux*, 69.

[44] Martinez, A. (2021). Utilization of biochar in composite filters: A sustainable approach. *Environmental Science & Technology*, 102.

[45] Zhao, Y. (2024). Stimuli-responsive composite membranes for smart water treatment applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 345.

[46] García, L. (2023). Hybrid filtration systems using composite membranes and LED photocatalysis for industrial wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 220.

[47] Sajid, M. (2023). *Industrial Applications of Activated Carbon* (p. 29). The Royal Society of Chemistry.