



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعرييرج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Aménagement Hydro-Agricole

Intitulé :

**Optimisation de la coagulation-floculation par le mucilage
et la poudre d'Opuntia ficus-indica pour l'élimination de
la turbidité : cas du barrage d'Ain Zada (Algérie)**

Présenté par :

AICI Aya

BELARBI Amira

Soutenu le 11/06/2025, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Présidente :	Mme. MAHLEB Anissa	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Encadrant :	M. TIAIBA Mohammed	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Examinatrice :	Mme. CHOURGHAL Nacira	Pr	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

*Avant tout, nous rendons grâce à **Dieu Tout-Puissant**, qui nous a donné la force, la patience et la capacité d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, **Monsieur Taïba Mohammed**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ainsi que pour son accompagnement tout au long de ce travail. Son encadrement rigoureux et bienveillant a grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions également **l'ensemble des enseignants** qui nous ont transmis leur savoir tout au long de notre parcours universitaire. Leur engagement et leurs efforts constants ont été essentiels dans notre formation.*

*Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, **Madame Chourghal Nacira** et **Madame Mahleb Anissa**, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Leur présence nous honore et nous motive profondément.*

Enfin, nous n'oublions pas de remercier toutes les personnes qui nous ont soutenues, de près ou loin, que ce soit par leur aide, leurs conseils ou leurs encouragements tout au long de ce parcours.

Dédicace

Il est des personnes dont la présence éclaire nos chemins, dont l'amour, le soutien et la foi en nous transforment les défis en réussites.

A vous, piliers de mon cœur, je dédie cette modeste œuvre...

*A ma chère mère **Abas Samira**, lumière de ma vie, pour son amour infini, ses sacrifices silencieux et sa présence rassurante tout au long de mon parcours. Merci pour ton soutien discret mais inestimable.*

*A mon père bien-aimé **Ismail**, pour sa force tranquille, son soutien indéfectible et ses conseils précieux.*

*A mes sœurs adorées **Chifaa, Meriem et Maria**, pour leur tendresse, leurs encouragements et leur présence chaleureuse.*

A mes cousins, mes cousines, mes tantes et mes oncles, pour leur affection sincère et leurs encouragements constants.

*A mon grand-père **Abas Rabeh**, pour sa sagesse, sa bonté et ses prières.*

*A la mémoire de mon grand-père **Ali** et ma grand-mère **Khadidja** que Dieu leur accorde Sa miséricorde, votre souvenir reste vivant en moi, à jamais.*

*A mon encadrant **Monsieur Tiaiba Mohammed**, pour sa bienveillance, sa disponibilité et ses conseils éclairés qui ont guidé ce travail vers sa maturité.*

*A mes amies fidèles **Meriem Sid Ali** et **Nour El Imene Ben Mayouf**, pour leur amitié vraie, leur écoute et leur soutien dans les moments les plus intenses.*

*Et à ma binôme **Amira Belarbi**, bien plus qu'une partenaire de travail, une sœur d'âme, une confidente, une alliée fidèle. Merci pour ta patience, ta force, ton humour, et toutes ces heures partagées entre doutes et victoires. Ce mémoire porte aussi ton empreinte.*

A vous tous, je vous offre cette œuvre avec toute ma reconnaissance, mon respect et mon amour le plus sincère.

AICI AYA

Dédicace

Dans chaque réussite, il y a des cœurs discrets qui en ont été le souffle et l'élan. Ils n'étaient pas sous les projecteurs, mais ils étaient la véritable lumière en arrière-plan. A ceux qui ont cru en moi quand moi-même j'en doutais, à ceux qui m'ont élevé par une parole, un silence, ou une prière en secret... A vous, qui avez été l'énergie d'espoir sur mon chemin, je dédie ce travail avec une gratitude que les mots ne sauraient contenir.

*A ma mère **Ghouila Toufaha**. Fleur de patience et racine d'espoir, je t'offre mon cœur et ma profonde gratitude, car ta présence a été la lumière qui a illuminé mon chemin.*

*A mon père **Hassen**, mon soutien et ma force, merci pour ton appui constant et ta sagesse.*

*A mon frère et à ma sœur **Malak** et **Mahdi** bien-aimés, merci pour votre encouragement et votre soutien à chaque instant.*

*Je dédie avec fierté ces précieux moments de ma vie à chaque membre des familles **Belarbi** et **Ghouila « Tergui »**.*

*A mon professeur respecté **Tiaïba Mohammed**, pour son soutien constant, son temps précieux, et ses conseils précieux qui ont été la clé du succès de ce projet.*

*A la mémoire de ma grand-mère **Belaamri Fatima** et **Fatma**, que Dieu ait son âme.*

*A ma binôme et sœur **Aïci Aya**, qui a été une compagne précieuse et une source d'inspiration dans les moments difficiles, merci pour ta présence constante, ta bonté, ta sincérité et ta patience. Ce travail reflète une part de notre parcours commun et l'accomplissement que nous avons construit ensemble avec dévouement.*

A tous ceux qui ont partagé ce parcours avec moi, je dédie ce travail avec tout mon respect, ma fidélité et ma gratitude.

BELARBI AMIRA

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Matériels et Méthodes

I.1. Introduction.....	4
I.2. Site d'étude et échantillonnage.....	4
I.2.1. Présentation du barrage d'Ain Zada.....	4
I.2.2. Protocole d'échantillonnage.....	4
I.3. Caractérisation physico-chimique de l'eau brute.....	5
I.3.1. Paramètres physico-chimiques.....	5
I.4. Préparation des coagulants à base d'Opuntia ficus-indica.....	7
I.4.1. Collecte et préparation du matériel végétal.....	7
I.4.2. Extraction du mucilage.....	8
I.4.3. Préparation de la poudre de cladodes.....	9
I.5. Essais de coagulation-floculation.....	10
I.5.1. Préparation des solutions de coagulants.....	10
I.5.2. Protocole des essais Jar-test.....	10
I.6. Optimisation des paramètres opératoires.....	11
I.6.1. Effet de la dose du coagulant.....	11
I.6.2. Influence du pH.....	11
I.6.3. Effet du temps de sédimentation.....	11
I.6.4. Analyse comparative avec le sulfate d'aluminium.....	11
I.7. Méthodes d'évaluation de l'efficacité du traitement.....	12
I.7.1. Mesure de la turbidité résiduelle.....	12
I.7.2. Détermination des matières en suspension résiduelles.....	12
I.7.3. Mesure du volume de boues produites.....	12
I.8. Conclusion.....	12

Chapitre II : Résultats et discussions

II.1. Introduction.....	14
II.2. Caractérisation physico-chimique des eaux du barrage d'Ain Zada.....	14

II.2.1. Paramètres physico-chimiques de l'eau brute	14
II.3. Optimisation des paramètres de coagulation-floculation	15
II.3.1. Effet du temps et de la vitesse d'agitation	15
II.3.2. Effet de la dose du coagulant	16
II.3.3. Influence de la pré-chloration sur l'élimination de la turbidité	18
II.3.4. Effet du pH initial	20
II.3.5. Effet de la dose du flocculant (polyélectrolytes anionique)	22
II.4. Évaluation comparative de l'efficacité des biocoagulants et du sulfate d'aluminium.....	25
II.4.1. Comparaison des performances globales de coagulation	26
II.4.2. Efficacité comparative pour l'élimination des (MES) et de la (TH)	27
II.5. Conclusion.....	28

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Chapitre II : Résultats et discussions		
Tableau II.1	Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute du barrage d'Ain Zada	14
Tableau II .2	Comparaison des performances des biocoagulants avec le sulfate d'aluminium en présence d'un flocculant anionique	26

Liste des figures

N°	Titre	Page
Chapitre I : Matériels et méthodes		
Figure I.1	Localisation géographique et points d'échantillonnage sur le barrage d'Ain Zada	05
Figure I.2	(a) pH Mètre "InoLab pH7110" ; (b) Conductimètre "InoLab Cond7110"	06
Figure I.3	Turbidimètre Lovibond "TB 300 IR"	06
Figure I.4	Appareil de filtration et papier filtre de 0.45 µm	07
Figure I.5	Cactus Opuntia Ficus Indica au M'Sila	07
Figure I.6	Processus d'extraction du mucilage d'Opuntia ficus-indica	08
Figure I.7	Préparation de la poudre de cladodes d'Opuntia ficus-indica	08
Figure I.8	Dispositif de Jar-test utilisé pour les essais de coagulation-floculation	10
Chapitre II : Résultats et discussions		
Figure II.1	Effet de volume (OFI mucilage) et du temps de décantation sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 95.5$ NTU, pH initial = 7.2, conductivité $\kappa = 1.544$ ms/cm	16
Figure II.2	Effet de la dose du coagulant (OFI Poudre) et du temps de décantation sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 95.5$ NTU, pH initial = 7.2, conductivité $\kappa = 1.544$ ms/cm	17
Figure II.3	Effet de la dose du coagulant (OFI mucilage) et de la prè-chloration sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 72.2$ NTU, pH initial = 7.6, $\kappa = 1.558$ ms/cm	19
Figure II.4	Effet de la dose du coagulant (OFI poudre) et de la prè-chloration sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 96.4$ NTU, pH initial = 7.01, $\kappa = 1.558$ ms/cm	20
Figure II.5	Effet du pH initial sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 15.7$ NTU, $C(\text{OFI mucilage}) = 2$ ml conductivité $\kappa = 1.345$ ms/cm	21
Figure II.6	: Effet du pH initial sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 15.7$ NTU, $C(\text{OFI Poudre}) = 200$ mg/l conductivité $\kappa = 1.345$ ms/cm	21
Figure II.7	Effet de la dose du flocculant anionique en présence du (OFI mucilage) sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 75.9$ NTU, $C_{(\text{OFI, Gel})} = 2$ ml, pH initial = 10, $\kappa = 1.345$ ms/cm	23
Figure II.8	Effet de la dose du flocculant anionique en présence du (OFI, Poudre) sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 84.5$ NTU, $C_{(\text{OFI, Poudre})} = 200$ mg/l, pH initial = 10, $\kappa = 1.345$ ms/cm	24
Figure II.9	Efficacité comparative des biocoagulants d'Opuntia ficus-indica et du sulfate d'aluminium pour l'élimination de MES et TH	27

Liste des abréviations

AFNOR	Association Française de Normalisation
ANBT	Agence Nationale des Barrages et Transferts
C-F	Coagulation – Flocculation
EDTA	Acide Ethylène – Dimine – Tétracétique
MES	Matière En Suspension
MON	Matière Organique Naturelle
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
OFI	Opuntia Ficus Indica
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
pH	Potentiel d'Hydrogène
TH	Titre Hydrométrique
THM	Trihalométhanes

Introduction générale

Introduction générale

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable à la vie et au développement socio-économique. Dans un contexte de croissance démographique et d'industrialisation accélérée, la demande en eau ne cesse d'augmenter, tandis que sa qualité se dégrade progressivement. En Algérie, comme dans plusieurs pays méditerranéens, la rareté des ressources hydriques représente un défi majeur, accentué par les changements climatiques et la pollution des eaux disponibles (**Remini, 2018**). Le barrage d'Ain Zada, situé dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj, constitue l'une des principales sources d'approvisionnement en eau pour la région, d'où l'importance cruciale de sa préservation et du traitement adéquat de ses eaux. La qualité des eaux de surface, notamment celles des barrages, est souvent compromise par divers types de pollution. Les activités agricoles intensives, l'urbanisation croissante et les rejets industriels contribuent à l'accumulation de polluants dans les réservoirs d'eau (**Bouafia-Chafai et al., 2020**). Parmi les problèmes les plus préoccupants figure la turbidité, généralement causée par la présence de matières en suspension et de particules colloïdales, qui affecte non seulement l'aspect esthétique de l'eau mais compromet également son traitement et sa désinfection. Les matières colloïdales, caractérisées par leur taille microscopique (entre 1 nm et 1 µm) et leur charge électrique négative, sont particulièrement difficiles à éliminer par simple sédimentation (**Djerba et al., 2019**). Ces particules maintiennent une stabilité dans l'eau due aux forces de répulsion électrostatique. Selon (**Azzouz et al., 2023**), la présence de ces colloïdes dans l'eau de consommation est un support à des microorganismes pathogènes, réduisant ainsi l'efficacité des traitements de désinfection. La matière organique naturelle (MON), également présente dans les eaux de surface, contribue significativement à la dégradation de la qualité de l'eau. D'après les études de (**Kettab et al., 2016**), la MON peut réagir avec le chlore utilisé pour la désinfection, formant des sous-produits potentiellement cancérigènes comme les trihalométhanés (THM). Par ailleurs, (**Boukrouma et Ladjel, 2019**) ont démontré que les eaux du barrage d'Ain Zada présentent une turbidité variable selon les saisons, pouvant atteindre des valeurs élevées pendant les périodes pluvieuses, ce qui intensifie les défis liés à son traitement. Face à ces problèmes, les procédés de traitement des eaux destinées à la consommation humaine doivent être optimisés pour garantir une eau potable répondant aux normes sanitaires. Parmi ces procédés, la coagulation-floculation occupe une place centrale, particulièrement pour l'élimination de la turbidité et des matières organiques naturelles

(Boucherit et al., 2018). Le processus de coagulation-floculation vise à déstabiliser les particules colloïdales par neutralisation de leurs charges, permettant leur agrégation en floccs plus denses qui peuvent être éliminés par sédimentation ou filtration **(Ghernaout, 2020)**. Ce traitement physico-chimique constitue souvent la première étape significative dans les filières de potabilisation des eaux de surface. Traditionnellement, ce processus repose sur l'utilisation de coagulants inorganiques comme le sulfate d'aluminium (alun), le chlorure ferrique ou le sulfate ferrique. Cependant, plusieurs études, dont celle de **(Kadouche et al., 2017)**, ont mis en évidence les inconvénients associés à ces coagulants chimiques, notamment la production de volumes importants de boues difficiles à traiter, le risque de présence d'aluminium résiduel dans l'eau traitée potentiellement associé à des maladies neurodégénératives, la modification du pH nécessitant souvent des ajustements supplémentaires, et les coûts élevés d'importation et de transport pour les pays en développement comme l'Algérie. Ces limitations ont stimulé la recherche d'alternatives plus durables et écologiques, notamment l'exploration de coagulants d'origine naturelle, issus de ressources localement disponibles. Dans cette perspective, l'utilisation de biopolymères naturels comme coagulants représente une alternative prometteuse. L'*Opuntia ficus-indica* (figuier de Barbarie), plante xérophyte largement répandue dans les régions arides et semi-arides d'Algérie, présente un potentiel considérable comme agent coagulant **(Betatache et al., 2022)**. Cette plante, adaptée aux conditions climatiques rigoureuses du pays, est caractérisée par sa richesse en mucilage, substance visqueuse composée principalement de polysaccharides (pectine, hémicellulose) et de protéines possédant des propriétés coagulantes naturelles. Selon les travaux de **(Bouaouine et al., 2019)**, les composés actifs du mucilage d'*Opuntia*, notamment les groupements carboxyliques et hydroxyles, jouent un rôle essentiel dans le mécanisme d'adsorption et de pontage entre les particules colloïdales. L'utilisation de ce coagulant naturel présente plusieurs avantages significatifs par rapport aux coagulants conventionnels : biodégradabilité et innocuité environnementale, contrairement aux coagulants chimiques, l'*Opuntia ficus-indica* est entièrement biodégradable et ne génère pas de sous-produits toxiques **(Nharingo et Moyo, 2016)** ; disponibilité locale et faible coût, cette plante est abondamment disponible en Algérie, particulièrement dans les régions steppiques et sahariennes, réduisant ainsi les coûts d'importation et contribuant au développement économique local **(Ait Hamou et al., 2021)** ; production de boues biodégradables, les boues issues du traitement par ce coagulant naturel sont moins volumineuses et plus facilement valorisables,

notamment comme amendements agricoles (**Taa et al., 2022**) ; double fonction de coagulation et désinfection, plusieurs études, dont celle de (**Fedala et al., 2019**), ont démontré les propriétés antimicrobiennes du mucilage d'*Opuntia*, conférant au traitement une action supplémentaire de désinfection. Les recherches de (**Bouatay et al., 2020**) ont révélé que l'efficacité de ce biopolymère peut varier selon sa forme d'utilisation. La poudre, obtenue par séchage et broyage des cladodes (raquettes), présente l'avantage d'une conservation prolongée et d'une facilité de dosage, tandis que le mucilage frais ou gel contient davantage de composés actifs mais nécessite une préparation plus complexe et une utilisation immédiate. Malgré ces avantages prometteurs, l'optimisation des conditions opératoires (dosage, pH, température, temps de contact) reste essentielle pour maximiser l'efficacité du traitement. C'est précisément dans cette optique que s'inscrit notre travail de recherche, visant à déterminer les conditions optimales d'utilisation du mucilage et de la poudre d'*Opuntia ficus-indica* pour le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada. Le présent mémoire s'articule autour de deux chapitres principaux : le premier chapitre (Matériels et Méthodes) expose la démarche expérimentale adoptée, incluant la caractérisation physico-chimique des eaux du barrage d'Ain Zada, les méthodes de préparation du mucilage et de la poudre d'*Opuntia ficus-indica*, les protocoles des essais de jar-test pour l'optimisation des paramètres de coagulation-floculation, et les techniques analytiques employées pour évaluer l'efficacité du traitement ; le deuxième chapitre (Résultats et Discussion) présente et analyse les résultats obtenus concernant l'influence des différents paramètres (dosage, pH, temps de contact) sur l'efficacité d'élimination de la turbidité, la comparaison des performances entre les deux formes du biofloculant (poudre et mucilage), les mécanismes d'action supposés du coagulant naturel, et la discussion des résultats à la lumière des travaux antérieurs dans ce domaine. Cette étude s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources naturelles locales et de développement de technologies de traitement des eaux adaptées au contexte algérien, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable, notamment en matière d'accès à l'eau potable et de préservation des écosystèmes aquatiques.

Chapitre I

Matériels et méthodes

Chapitre I : Matériels et Méthodes

I.1. Introduction

Ce chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour évaluer l'efficacité du mucilage et de la poudre d'*Opuntia ficus-indica* comme agents coagulants naturels dans le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada. Nous détaillons les protocoles d'échantillonnage, les méthodes de préparation des biofloculants, ainsi que les techniques analytiques employées pour caractériser l'eau brute et évaluer les performances du traitement.

I.2. Site d'étude et échantillonnage

I.2.1. Présentation du barrage d'Ain Zada

Le barrage Ain Zada est situé dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj à 25 km à l'ouest de Sétif et à 40 km à l'est de Bordj Bou Arreridj (36° 10' 28" N, 5° 08' 58" E) (Figure 1). Mis en service en 1986, ce barrage a une capacité de stockage de 121.4 millions de m³ et une superficie de 1100 hectares au niveau normale de stockage 855m (ANBT, 2013). Il est alimenté principalement par l'Oued Bousselam et constitue la source principale d'approvisionnement en eau potable pour les wilayas de Bordj Bou Arreridj et Sétif.

Le barrage est situé dans une zone caractérisée par un climat semi-aride avec des précipitations annuelles moyennes de 392 mm. La température moyenne annuelle est de 17°C, avec un été chaud (moyenne de 28°C en juillet-août) et un hiver froid (moyenne de 7°C en décembre-janvier) (Station météorologique de BBA, 2010-2020).

I.2.2. Protocole d'échantillonnage

Les échantillons d'eau ont été prélevés en février 2025 sur trois points différents du barrage (Figure I.1) :

- Point P1 : Près de la digue, à une profondeur de 1 m
- Point P2 : Au centre du réservoir, à une profondeur de 1 m
- Point P3 : À proximité de l'entrée du principal affluent, à une profondeur de 1 m



Figure I.1 : Localisation géographique et points d'échantillonnage sur le barrage d'Ain Zada

Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une bouteille de 2 litres, trois échantillons de 5 litres chacun ont été collectés dans des bidons en polyéthylène préalablement lavés à l'acide nitrique dilué (10%) puis rincés à l'eau distillée. Les échantillons ont été conservés à 4°C dans une glacière pendant le transport jusqu'au laboratoire de la faculté des Sciences et de la Technologie (Génie des procédés), où ils ont été analysés dans les 24 heures suivant le prélèvement.

I.3. Caractérisation physico-chimique de l'eau brute

I.3.1. Paramètres physico-chimiques

La détermination des paramètres physico-chimiques a été réalisée selon les méthodes de dosage standards décrites par (Rodier, 2005) et conformément aux catalogues des instruments de mesure.

Pour le suivi du traitement de l'eau brute, nous avons mesuré en continu les caractéristiques des effluents (pH, conductivité) et analysé la phase clarifiée après décantation. Ces analyses incluent les indicateurs de dépollution tels que la turbidité, les matières en suspension et la dureté totale.

Les paramètres physiques suivants ont été mesurés au laboratoire :

- **pH** : Mesuré au laboratoire à l'aide d'un pH-mètre portable (InoLab pH7110) préalablement étalonné avec des solutions tampons de pH 4,01, 7,01 et 10,01.
- **Conductivité électrique** : Déterminée au laboratoire à l'aide d'un conductimètre portable (InoLab Cond7110) étalonné avec une solution standard de 1413 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

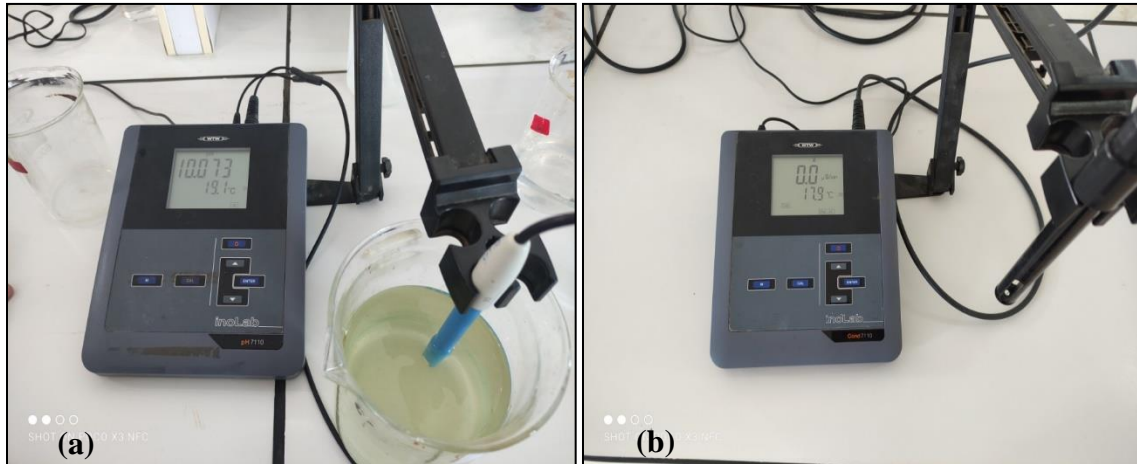


Photo I.2 : (a) pH Mètre "InoLab pH7110" ; (b) Conductimètre "InoLab Cond7110"

- **Turbidité** : Mesurée au laboratoire à l'aide d'un turbidimètre (Lovibond TB 300 IR) selon la méthode néphélométrique. Les résultats sont exprimés en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

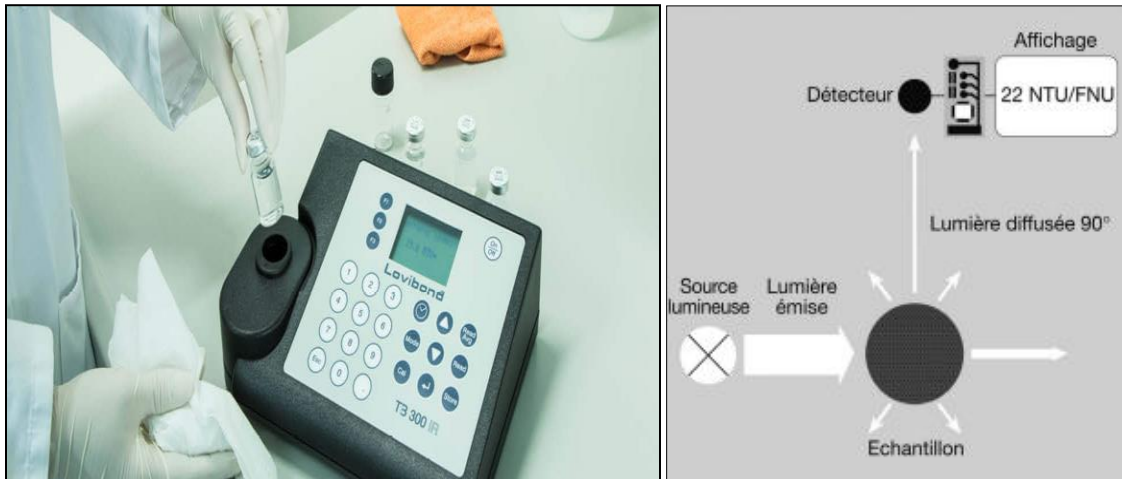


Figure I.3 : Turbidimètre Lovibond "TB 300 IR"

- **Matières en suspension (MES)** : Déterminées par filtration d'un volume connu d'échantillon sur membrane en fibre de verre (porosité 0,45 μm), séchage à 105°C pendant 2 heures et pesée selon la méthode standard AFNOR NF T90-105.



Photo I.4 : Appareil de filtration et papier filtre de 0.45 μm

- **Dureté totale :** Mesurée par titration complexométrique avec l'EDTA en présence de noir d'ériochrome T comme indicateur, selon la méthode standard AFNOR NF T90-003.

Toutes les analyses physico-chimiques ont été réalisées en triplicata et les résultats sont exprimés sous forme de moyenne \pm écart-type.

I.4. Préparation des coagulants à base d'*Opuntia ficus-indica*

I.4.1. Collecte et préparation du matériel végétal

Les cladodes (raquettes) d'*Opuntia ficus-indica* ont été récoltés dans la région de M'Sila (latitude 35°42'N, longitude 4°33'E), située à environ 80 km du barrage d'Ain Zada. La collecte a été effectuée au mois de février 2025, en sélectionnant des cladodes sains de différentes tailles.



Figure I.5 : Cactus *Opuntia Ficus Indica* au M'Sila

Les cladodes récoltés ont été nettoyés à l'eau distillée pour éliminer les impuretés et les épines, puis transportés au laboratoire dans des sacs en polyéthylène.

I.4.2. Extraction du mucilage

Le mucilage d'*Opuntia ficus-indica* a été extrait selon le protocole adapté de (Adjroud *et al.*, 2018) avec quelques modifications. La procédure d'extraction comprend les étapes suivantes (Figure I.6) :



Figure I.6 : Processus d'extraction du mucilage d'*Opuntia ficus-indica*

Étape 1 : Les cladodes ont été soigneusement nettoyés avec de l'eau du robinet suivie d'eau distillée pour éliminer les impuretés. Les taches noires ont été soigneusement enlevées, et la cuticule superficielle a été éliminée selon la méthode décrite par (Adjroud *et al.*, 2018) car cette couche agit comme une barrière à l'extraction des biomolécules.

Étape 2 : Les cladodes nettoyés ont été séchés à l'air à température ambiante ($22 \pm 2^\circ\text{C}$) pendant 30 minutes, puis coupés en petits morceaux (environ 2×2 cm).

Étape 3 : Les tissus végétaux découpés ont été homogénéisés pendant 45-50 secondes à l'aide d'un mixeur domestique jusqu'à l'obtention d'une consistance homogène semblable à une pâte.

Étape 4 : L'homogénat a été dilué à un ratio de 1 :10 (v/v) avec de l'eau distillée. La suspension résultante, à viscosité réduite, a été ensuite filtrée à travers un tamis conventionnel (maille de 1 mm) pour obtenir le filtrat final destiné à l'analyse ultérieure.

I.4.3. Préparation de la poudre de cladodes

La poudre de cladodes a été préparée selon le protocole adapté de (Betatache *et al.*, 2022) avec quelques modifications. La procédure comprend les étapes suivantes (Figure I.7) :

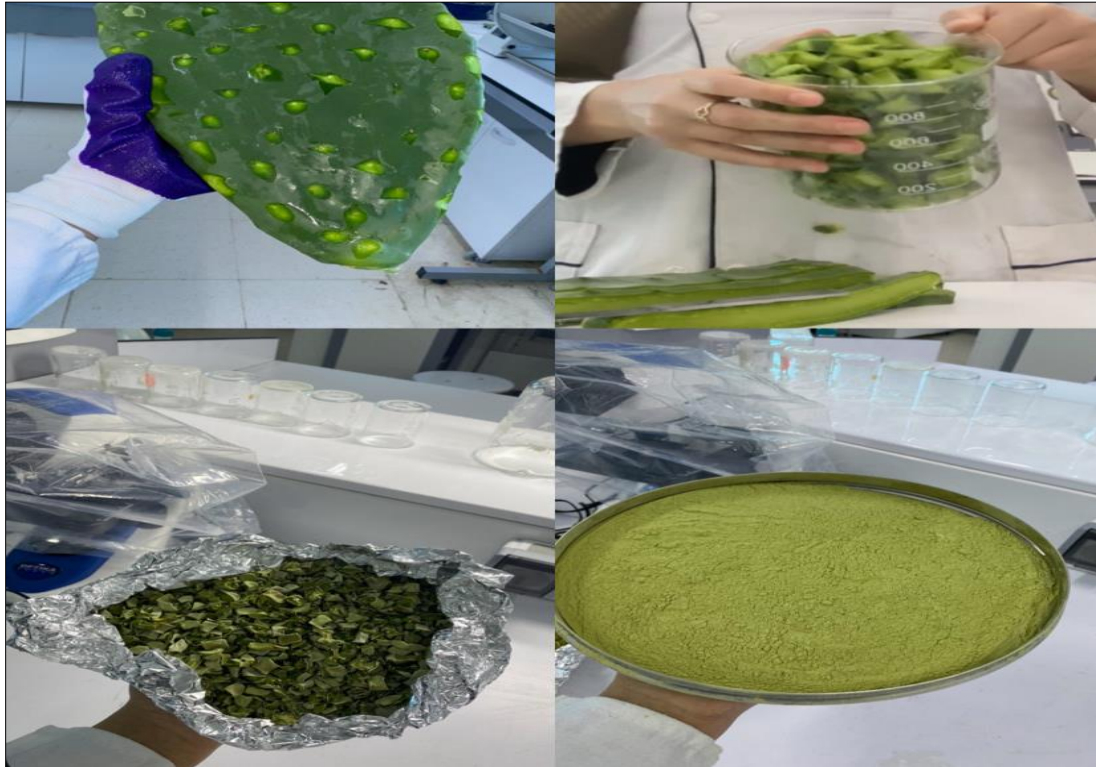


Figure I.7 : Préparation de la poudre de cladodes d'*Opuntia ficus-indica*

1. Les cladodes nettoyés sont découpés en fines tranches d'environ 5 mm d'épaisseur.
2. Ces tranches sont séchées à l'étuve à 60°C pendant 72 heures jusqu'à obtention d'une masse constante.
3. Les tranches séchées sont broyées à l'aide d'un broyeur à couteaux pour obtenir une poudre grossière.
4. Cette poudre grossière est tamisée à travers un tamis de 125 μm pour obtenir une granulométrie uniforme.
5. La poudre fine obtenue est conservée dans un flacon hermétique à température ambiante jusqu'à utilisation.

I.5. Essais de coagulation-floculation

I.5.1. Préparation des solutions de coagulants

I.5.1.1. Solution de mucilage

La solution de mucilage a été préparée en diluant 25 ml de mucilage dans 250 ml d'eau distillée sous agitation magnétique pendant 2 heures à température ambiante. Cette solution diluée a été ajoutée à différentes concentrations pour étudier l'effet de la concentration initiale lors des essais de coagulation-floculation.

I.5.1.2. Suspension de poudre

La suspension de poudre de cladodes a été ajoutée directement dans l'eau brute à traiter à différentes concentrations pour étudier l'effet de la concentration initiale lors des essais de coagulation-floculation.

I.5.2. Protocole des essais Jar-test

Les essais de coagulation-floculation ont été réalisés à l'aide d'un appareil de Jar-test (VELP Scientifica JLT6) équipé de six béciers de 1 litre. Le protocole standard comprend les étapes suivantes (Figure 5) :

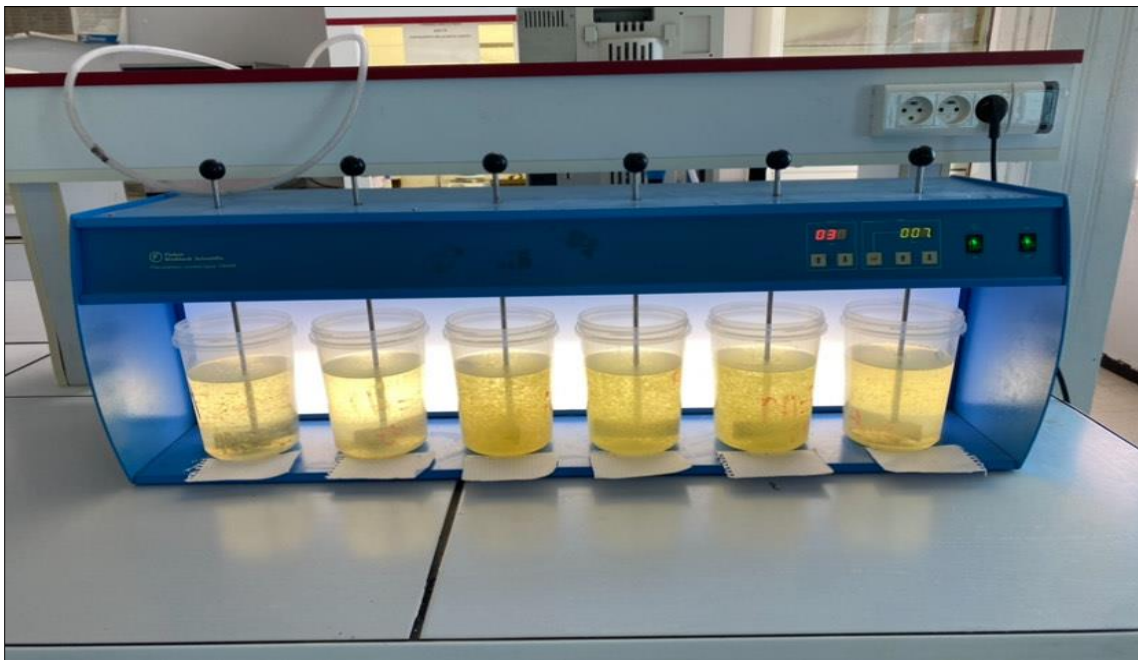


Figure I.8 : Dispositif de Jar-test utilisé pour les essais de coagulation-floculation

1. 800 ml d'échantillon d'eau brute sont placés dans chaque bécher.
2. Le pH initial est ajusté si nécessaire à l'aide de solutions de HCl 0,1 N ou NaOH 0,1 N.
3. La quantité appropriée de coagulant est ajoutée dans chaque bécher pendant une agitation rapide (200 rpm).
4. Une phase d'agitation rapide (200 rpm) est maintenue pendant 2 minutes pour assurer la dispersion homogène du coagulant (phase de coagulation).
5. L'agitation est réduite à 30 rpm pendant 20 minutes pour favoriser la formation des floccs (phase de floculation).
6. Après arrêt de l'agitation, une période de sédimentation de 30 à 60 minutes est observée.
7. Des échantillons de 25 ml sont prélevés à 2 cm sous la surface de l'eau pour l'analyse de la turbidité résiduelle et autres paramètres.

I.6. Optimisation des paramètres opératoires

Une série d'essais Jar-test a été réalisée pour optimiser les différents paramètres opératoires affectant l'efficacité de la coagulation-floculation.

I.6.1. Effet de la dose du coagulant

Pour déterminer la dose optimale de coagulant, des essais ont été effectués avec des doses variables de mucilage (1, 2, 5, 10, 20 et 50 ml) et de poudre (20, 50, 100, 200, 500 et 1000 mg/l) à pH naturel de l'eau brute (pH \approx 7).

I.6.2. Influence du pH

L'effet du pH sur l'efficacité de coagulation a été étudié en ajustant le pH initial de l'eau brute à différentes valeurs (4, 7 et 10) à l'aide de solutions de HCl 0,1 N ou NaOH 0,1 N, tout en maintenant la dose de coagulant à sa valeur optimale déterminée précédemment.

I.6.3. Effet du temps de sédimentation

L'influence du temps de sédimentation a été évaluée en mesurant la turbidité résiduelle à différents intervalles de temps (10, 20 et 30 minutes) après l'arrêt de l'agitation, en maintenant constants la dose de coagulant et le pH à leurs valeurs optimales.

I.6.4. Analyse comparative avec le sulfate d'aluminium

Une étude comparative entre les biofloculants (mucilage et poudre) et le sulfate d'aluminium (**Bahfir et Benbouzid, 2023**) a été réalisée dans les conditions optimales déterminées pour chaque coagulant. Les paramètres suivants ont été évalués :

- Efficacité d'élimination de la turbidité
- Réduction des matières en suspension
- Réduction de la dureté totale
- Volume de boues produites
- Plage de pH efficace

I.7. Méthodes d'évaluation de l'efficacité du traitement

I.7.1. Mesure de la turbidité résiduelle

La turbidité résiduelle a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre (HACH 2100N) selon la méthode néphélométrique. L'efficacité d'élimination de la turbidité a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{Élimination de la turbidité (\%)} = [(\text{Turbidité initiale} - \text{Turbidité résiduelle}) / \text{Turbidité initiale}] \times 100$$

I.7.2. Détermination des matières en suspension résiduelles

Les matières en suspension résiduelles ont été déterminées par filtration sur membrane en fibre de verre (0,45 µm), selon la méthode décrite précédemment. L'efficacité d'élimination de MES a été calculée selon la formule :

$$\text{Élimination de MES (\%)} = [(\text{MES initiales} - \text{MES résiduelles}) / \text{MES initiales}] \times 100$$

I.7.3. Mesure du volume de boues produites

Le volume de boues produites a été déterminé à l'aide de cônes Imhoff après 24 heures de sédimentation. Les résultats sont exprimés en mL de boues par litre d'eau traitée.

I.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail la méthodologie adoptée pour évaluer l'efficacité du mucilage et de la poudre d'*Opuntia ficus-indica* comme agents coagulants naturels dans le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada. Les protocoles expérimentaux décrits permettent de caractériser l'eau brute, de préparer les biofloculants, d'optimiser les paramètres opératoires du processus de coagulation-floculation et d'évaluer l'efficacité du traitement en comparaison avec les coagulants conventionnels. Cette approche méthodologique rigoureuse vise à fournir des résultats fiables et reproductibles pour évaluer le potentiel d'utilisation de ces biofloculants comme alternative durable aux coagulants chimiques importés.

Chapitre II

Résultats et discussions

Chapitre II : Résultats et discussions

II.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de notre étude sur l'optimisation de la coagulation-floculation par le mucilage et la poudre d'*Opuntia ficus-indica* pour l'élimination de la turbidité des eaux du barrage d'Ain Zada. L'analyse et l'interprétation de ces résultats permettent d'évaluer l'efficacité de ce biofloculant naturel et de comprendre les mécanismes impliqués dans le processus de clarification.

II.2. Caractérisation physico-chimique des eaux du barrage d'Ain Zada

II.2.1. Paramètres physico-chimiques de l'eau brute

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute du barrage d'Ain Zada, échantillonnée pendant les périodes de notre étude, sont présentées dans le Tableau II.1.

Tableau II.1: Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute du barrage d'Ain Zada

Paramètre	Valeur moyenne	Écart-type	Norme algérienne
pH	7,2	±0,3	6,5-8,5
Température (°C)	22,5	±2,1	25
Turbidité (NTU)	95,5	±6,4	5
Conductivité (µs/cm)	1544	±45	2800
Matières en suspension (mg/l)	160	±8,2	-
Dureté totale (mg/l CaCO ₃)	100	±18	500

L'eau brute du barrage d'Ain Zada présente une turbidité moyenne de 95,5 NTU, largement supérieure à la norme algérienne fixée à 5 NTU pour l'eau potable. Cette turbidité élevée s'explique principalement par la présence importante de matières en suspension (160 mg/l) et de particules colloïdales. Ce qui justifie la nécessité d'un traitement approprié. Le pH légèrement alcalin (7,2) se situe dans la plage optimale pour les processus de coagulation-floculation (**Lamia Cherif et al., 2024**).

II.3. Optimisation des paramètres de coagulation-floculation

II.3.1. Effet du temps et de la vitesse d'agitation

La coagulation et la floculation sont des étapes essentielles dans le traitement des eaux, notamment pour l'élimination des particules colloïdales responsables de la turbidité. Ces processus reposent sur deux phases complémentaires, chacune nécessitant des conditions hydrauliques spécifiques pour garantir une performance optimale.

a) Coagulation et mélange rapide

La coagulation est initiée par un mélange rapide, également appelé mélange instantané, qui permet une dispersion homogène du coagulant dans toute la masse d'eau. Ce processus favorise la formation immédiate d'espèces coagulantes actives, responsables de la déstabilisation des colloïdes présents dans l'eau (Chichuan *et al.*, 2002). Ces espèces favorisent l'agrégation initiale des particules, formant ainsi les premiers noyaux de floes. Selon (Amirtharajah et Jones, 2000), le gradient de vitesse (ou valeur G) est un paramètre clé de ce processus, car il traduit l'intensité des turbulences et des contacts entre les particules. Une valeur minimale de 1500 s^{-1} est généralement recommandée pour assurer une dispersion efficace du coagulant.

b) Floculation et mélange lent

La phase de floculation intervient immédiatement après la coagulation. Elle consiste à maintenir un mélange lent et contrôlé permettant aux particules déstabilisées de s'agglomérer progressivement pour former des floes de taille suffisante. Ces floes pourront ensuite être efficacement retirés par décantation. Le temps de floculation, également appelé temps de séjour hydraulique, est un paramètre critique du processus, car il conditionne la croissance et la densité des floes (Wang *et al.*, 2005). Le gradient de vitesse, bien que plus faible que dans la coagulation, doit rester suffisant pour maintenir les particules en suspension sans casser les floes formés (Sahu *et al.*, 2013).

Dans le cadre de ce travail, les **conditions d'agitation** ont été fixées en s'appuyant sur les résultats de (Lamia Cherif *et al.*, 2024). Ainsi, une **agitation rapide** a été réalisée à une **vitesse de 200 tr/min pendant 2 minutes**, suivie d'une **agitation lente** à **30 tr/min pendant 20 minutes** afin de favoriser la croissance des floes tout en minimisant leur rupture.

II.3.2. Effet de la dose du coagulant

Le dosage du coagulant représente un facteur critique pour déterminer les conditions optimales d'une C-F efficaces. Comme le soulignent (Mirzaiy *et al.*, 2012), un dosage insuffisant ou

excessif peut entraîner de mauvaises performances de floculation, d'où l'importance de déterminer la dose optimale afin de réduire les coûts chimiques et la formation de boues. Dans cette étude, nous avons évalué l'efficacité de l'*Opuntia ficus-indica* sous forme de mucilage et de poudre comme coagulant naturel pour le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada.

II.3.2.1. Le volume de mucilage d'*Opuntia ficus-indica*

L'effet du volume d'*Opuntia ficus-indica* (mucilage) ajoutées est illustré dans la figure II.1. Tous les paramètres ont été maintenus constants ($v_{\text{coag.}} = 200$ tr/min, Temps d'agitation rapide = 2 min, $v_{\text{floc.}} = 30$ tr/min, Temps d'agitation lente = 20 min), excepté la concentration du coagulant.

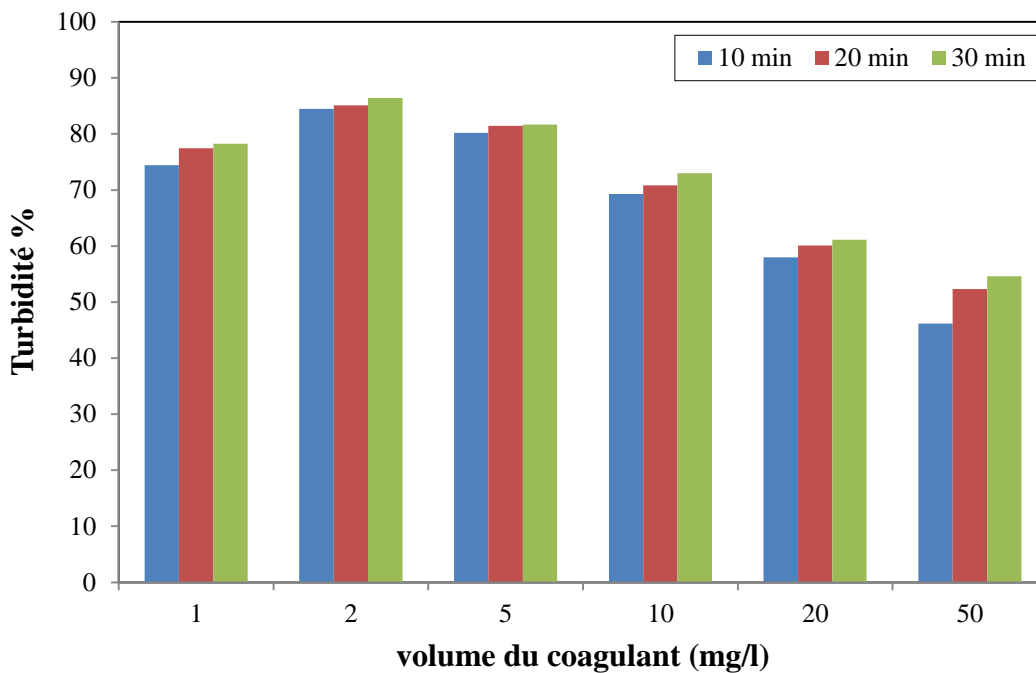


Figure II.1 : Effet de volume (OFI mucilage) et du temps de décantation sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 95.5$ NTU, pH initial = 7.2, conductivité $\kappa = 1.544$ ms/cm

L'analyse des résultats révèle que le mucilage d'*Opuntia ficus-indica* présente une efficacité maximale d'élimination de la turbidité (86,4%) à un volume optimal de 2 ml, avec une diminution progressive de l'efficacité au-delà de ce volume, tandis que l'augmentation du temps de décantation de 10 à 30 minutes améliore systématiquement les performances pour toutes les volumes testés, ce qui corrobore les observations de (Sethu *et al.*, 2019) qui attribuent la capacité de coagulation de l'*Opuntia* à la présence d'acide galacturonique qui, en solution aqueuse, existe

comme un polymère anionique fournissant des sites actifs chargés pour l'adsorption des particules colloïdales dans l'eau brute.

II.3.2.2. La dose de la poudre d'*Opuntia ficus-indica*

L'effet de la dose de coagulant (*Opuntia ficus-indica* poudre) est illustré dans la figure II.2. Tous les paramètres ont été maintenus constants, excepté la concentration du coagulant.

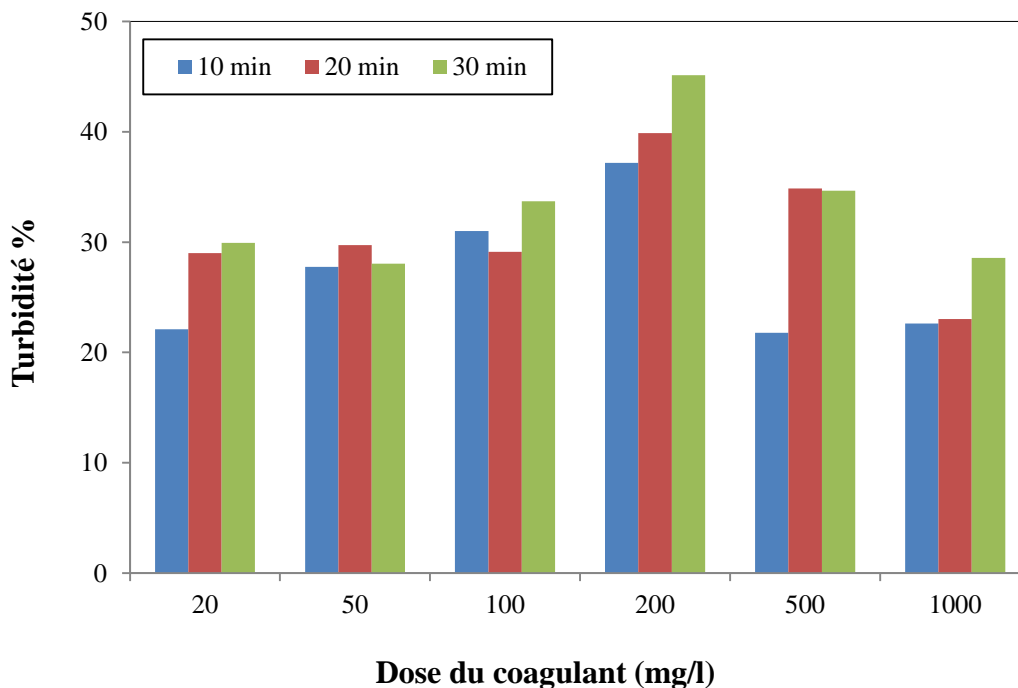


Figure II.2 : Effet de la dose du coagulant (OFI Poudre) et du temps de décantation sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 95.5$ NTU, pH initial = 7.2, conductivité $\kappa = 1.544$ ms/cm

Les résultats montrent que la poudre d'*Opuntia ficus-indica* atteint une efficacité maximale d'élimination de la turbidité plus modeste (45,13%) à une dose optimale de 200 mg/l après 30 minutes de décantation, avec une performance qui, bien qu'inférieure à celle du mucilage, s'inscrit dans la tendance observée par (Hayelom *et al.*, 2016) qui ont rapporté une augmentation du taux d'élimination de la turbidité de 23,9% à 54% avec l'augmentation de la dose de poudre de cactus de 0,50 à 3,50 g.

Le mucilage d'*Opuntia ficus-indica* démontre une efficacité de C-F nettement supérieure à la poudre pour l'élimination de la turbidité dans les mêmes conditions de traitement, probablement en raison d'une meilleure biodisponibilité des composés actifs, ce qui rejoint les résultats impressionnants rapportés par (Shilpa *et al.*, 2012) qui ont obtenu une efficacité maximale

d'élimination de la turbidité de 89,03% pour l'eau d'un lac traitée avec du cactus, et par (**Bouaouine et al., 2018**) qui ont constaté que la poudre d'*Opuntia ficus-indica* pouvait éliminer 90% de la turbidité de l'eau synthétique chargée de kaolin à un pH de 10, grâce à des mécanismes d'adsorption et de pontage entre les particules; par ailleurs, la diminution d'efficacité observée à doses élevées pour les deux formes suggère un phénomène de restabilisation des particules colloïdales, ce que confirme (**Marobhe et al., 2007**) qui ont noté qu'une augmentation du dosage du coagulant au-delà de 25 mg/l provoquait une augmentation de la turbidité due à la déstabilisation des particules neutralisées par l'excès de particules de coagulant, augmentant ainsi les particules en suspension.

II.3.3. Influence de la pré-chloration sur l'élimination de la turbidité

La pré-chloration est une pratique courante dans le traitement des eaux qui vise principalement la désinfection et l'oxydation de certains composés organiques et inorganiques (**Chowdhury et al., 2009**). Bien que son efficacité antimicrobienne soit bien établie, son impact sur les processus physico-chimiques ultérieurs comme la coagulation-floculation mérite une attention particulière (**Zhang et al., 2015**). Dans cette étude, nous avons cherché à évaluer son influence sur le processus de C-F utilisant l'*Opuntia ficus-indica* comme coagulant naturel, une alternative prometteuse aux coagulants chimiques conventionnels (**Miller et al., 2008**). Pour isoler spécifiquement l'effet de la pré-chloration, tous les autres paramètres opératoires ont été maintenus constants, notamment les vitesses d'agitation (vitesse de coagulation à 200 tr/min pendant 2 minutes et vitesse de floculation à 30 tr/min pendant 20 minutes). La dose de chlore utilisée (12 mg/l) a été déterminée sur la base d'essais préliminaires visant à obtenir un résiduel de chlore libre de 0,8 mg/l après deux heures de contact, conformément aux pratiques courantes de traitement recommandées par l'OMS (**WHO, 2017**). Cette approche méthodologique, nous a permis d'évaluer précisément comment la pré-chloration modifie l'efficacité des deux formes d'*Opuntia ficus-indica* et d'identifier les ajustements nécessaires pour optimiser le processus de traitement dans ces conditions.

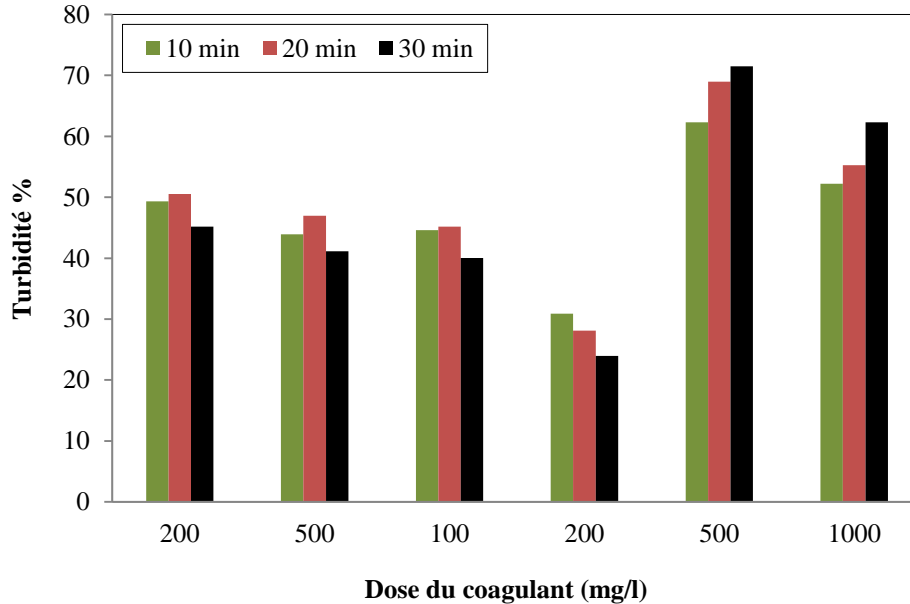


Figure II.3 : Effet de la dose du coagulant (OFI mucilage) et de la pré-chloration sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 72.2$ NTU, pH initial = 7.6, $\kappa = 1.558$ ms/cm

L'analyse comparative des résultats montre que la pré-chloration modifie significativement l'efficacité du mucilage d'*Opuntia ficus-indica*, sans pré-chloration, la dose optimale de mucilage était de 20 ml avec un rendement maximal d'élimination de la turbidité de 86,43% après 30 minutes de décantation, ce qui correspond aux performances rapportées par (Miller *et al.*, 2008) pour les extraits de cactus. En revanche, avec la pré-chloration, la dose optimale passe à 500 mg/l, avec un rendement maximal de 71,47% après 30 minutes. Cette modification suggère que la pré-chloration altère les propriétés coagulantes du mucilage, nécessitant ainsi une dose plus importante pour atteindre l'efficacité maximale.

Par ailleurs, on observe une diminution générale des rendements d'élimination de la turbidité en présence de pré-chloration. Le rendement maximal passe de 86,43% (sans pré-chloration) à 71,47% (avec pré-chloration), ce qui représente une réduction d'environ 15%. Cette baisse d'efficacité pourrait s'expliquer par une oxydation partielle des composés actifs du mucilage (principalement les polysaccharides) par le chlore, réduisant ainsi leur capacité à former des ponts entre les particules colloïdales, comme l'ont démontré (Zhang *et al.*, 2015) dans leurs travaux sur l'impact du chlore sur les macromolécules organiques.

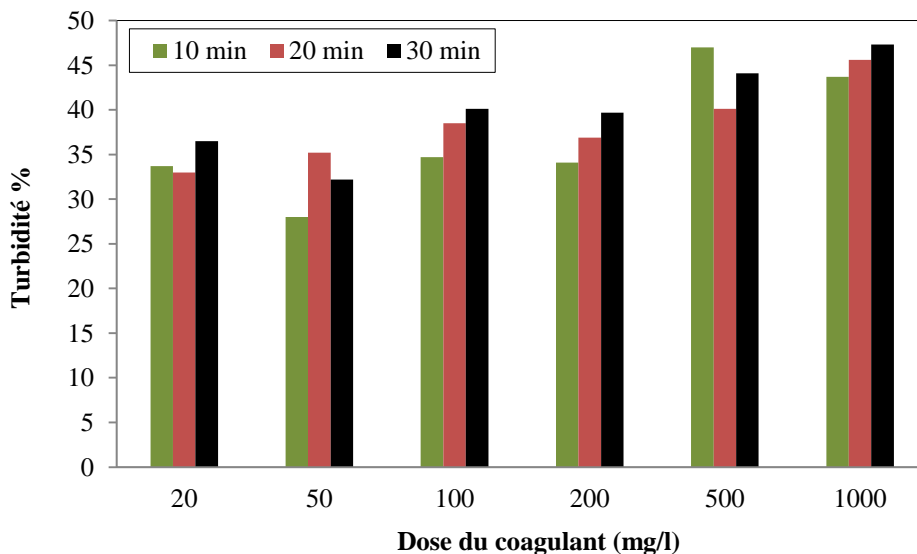


Figure II.4 : Effet de la dose du coagulant (OFI poudre) et de la pré-chloration sur l'élimination de la turbidité : $Turb_1 = 96.4$ NTU, pH initial = 7.01, $\kappa = 1.558$ ms/cm

Pour la poudre d'*Opuntia ficus-indica*, l'impact de la pré-chloration est également notable. Sans pré-chloration, la dose optimale était de 200 mg/l avec un rendement maximal de 45,13% après 30 minutes, avec la pré-chloration, le rendement maximal augmente à 47,3% pour une dose de 1000 mg/l, illustrant le phénomène de modification de la dose optimale également documenté par (Freitas *et al.*, 2018) pour d'autres coagulants naturels soumis à une pré-oxydation.

Cependant, on observe une tendance différente par rapport au mucilage : bien que la dose optimale soit plus élevée avec la pré-chloration, les rendements d'élimination pour les faibles doses (20-200 mg/l) sont généralement supérieurs en présence de chlore par rapport aux conditions sans pré-chloration. Ceci suggère que la pré-chloration pourrait faciliter l'accès aux composés actifs contenus dans la poudre en dégradant partiellement la matrice végétale, une hypothèse corroborée par les travaux de (Ndabigengesere et Narasiah, 2010) ; sur l'amélioration de l'extraction des composés coagulants par prétraitement oxydatif.

II.3.4. Effet du pH initial

Le pH représente un paramètre déterminant dans l'efficacité des processus de coagulation-floculation, influençant directement les interactions électrostatiques entre coagulants et particules colloïdales (Duan et Gregory, 2003). Pour les coagulants naturels comme l'*Opuntia ficus-indica*, le pH modifie la conformation structurale et la charge des biomolécules actives, affectant leur capacité d'adsorption et de pontage (Miller *et al.*, 2008). Comme l'ont démontré (Yin, 2010) et

(Bouatay et Mhenni, 2014) ; les groupements fonctionnels des polysaccharides et protéines présents dans ces extraits naturels subissent différents degrés de protonation selon le milieu, ce qui altère significativement leurs mécanismes d'action. L'optimisation de ce paramètre constitue donc une étape essentielle pour maximiser l'utilisation des coagulants d'origine végétale dans le traitement des eaux, participant au développement de technologies plus respectueuses de l'environnement (Nharingo & Moyo, 2016).

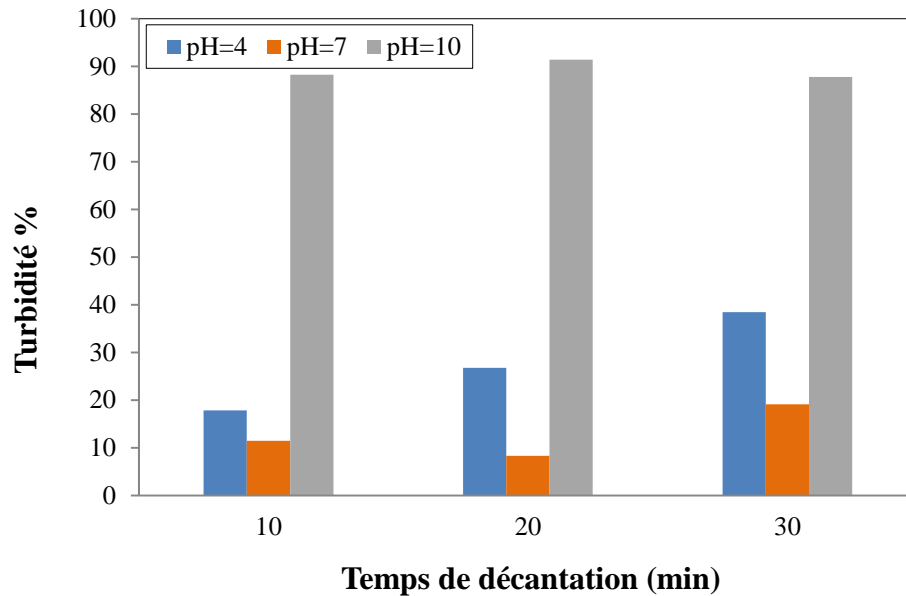


Figure II.5 : Effet du pH initial sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 15.7$ NTU, $C(\text{OFI mucilage}) = 2$ ml conductivité $\kappa = 1.345$ ms/cm

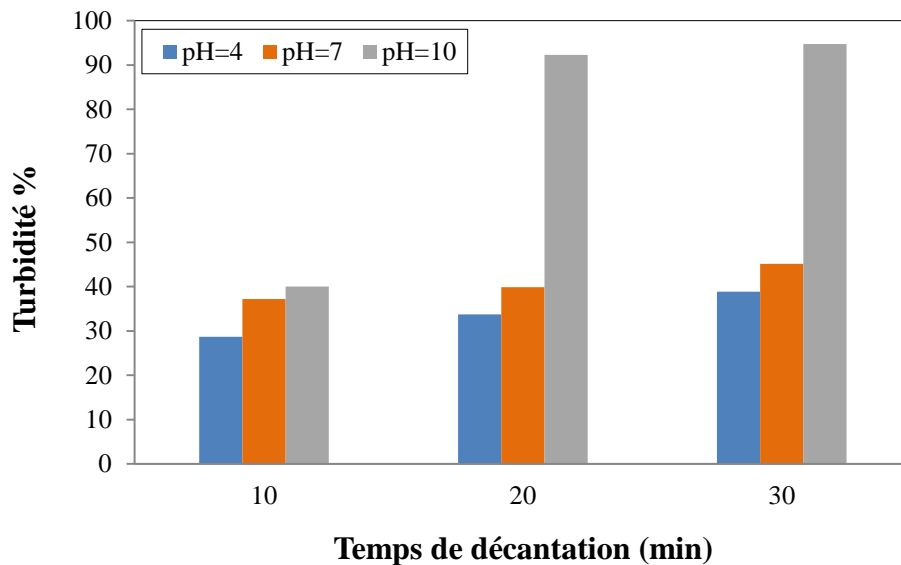


Figure II.6 : Effet du pH initial sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 15.7$ NTU, $C(\text{OFI Poudre}) = 200$ mg/l conductivité $\kappa = 1.345$ ms/cm

L'analyse des résultats concernant l'effet du pH sur l'abattement de la turbidité révèle une influence déterminante des conditions alcalines sur l'efficacité coagulante des dérivés d'*Opuntia ficus-indica*. Le mucilage manifeste une performance remarquable à pH 10 avec un abattement atteignant 91,4% après 20 minutes, vraisemblablement dû à la déprotonation des groupements fonctionnels des polysaccharides qui favorise une meilleure conformation moléculaire pour l'adsorption et le pontage entre particules colloïdales, phénomène également observé par (Miller *et al.*, 2008) et (Yin, 2010) ; dans leurs études sur les polysaccharides naturels. Parallèlement, la poudre d'*Opuntia ficus-indica* démontre une efficacité supérieure dans les mêmes conditions basiques, culminant à 94,7% d'élimination de la turbidité après 30 minutes, tout en présentant une cinétique différente et une meilleure adaptabilité aux variations de pH que le mucilage. Cette supériorité à pH 10 pourrait s'expliquer par une synergie entre les divers composés bioactifs de la poudre, conformément aux travaux de (Nharingo et Moyo, 2016) ; qui ont identifié la contribution multiple des protéines et polysaccharides dans les mécanismes de coagulation des extraits de cactus. Ces observations corroborent les études de (Bouatay et Mhenni, 2014) ; sur l'optimisation des paramètres de coagulation des biopolymères naturels et mettent en évidence l'importance cruciale d'optimiser le pH lors de l'utilisation de ces coagulants biologiques dans le traitement des eaux, avec une préférence marquée pour les conditions alcalines qui maximisent leur potentiel coagulant-floculant, permettant ainsi d'envisager ces dérivés comme alternatives écologiques prometteuses aux coagulants chimiques conventionnels (Yin *et al.*, 2018; Yessenia *et al.*, 2021).

II.3.5. Effet de la dose du floculant (polyélectrolytes anionique)

Dans les processus de traitement des eaux, les coagulants naturels comme l'*Opuntia ficus-indica* présente un potentiel prometteur pour la déstabilisation initiale des particules en suspension, leur action peut être significativement optimisée par l'ajout de floculant, particulièrement les polyélectrolytes anioniques (Bratby, 2016).

Les polyélectrolytes anioniques sont des polymères synthétiques à longue chaîne portant des groupements chargés négativement. Leur mécanisme d'action complète celui des coagulants en facilitant la formation de floes plus volumineux et plus résistants aux forces de cisaillement grâce à un phénomène de pontage entre les particules préalablement déstabilisées (Lee *et al.*,

2014). Cette synergie entre coagulants naturels et flocculants synthétiques est particulièrement intéressante dans une perspective de développement durable, permettant de réduire les quantités de produits chimiques tout en maintenant une haute efficacité de traitement.

L'optimisation de la dose de flocculant représente cependant un défi majeur, car un surdosage peut provoquer une restabilisation des particules, tandis qu'un sous-dosage limite l'efficacité du traitement (Nharingo et Moyo, 2016). Cette étude vise donc à déterminer les doses optimales de polyélectrolytes anionique en combinaison avec deux formes d'*Opuntia ficus-indica* pour maximiser l'abattement de la turbidité dans les eaux à traiter, contribuant ainsi au développement de technologies de traitement plus efficaces et respectueuses de l'environnement.

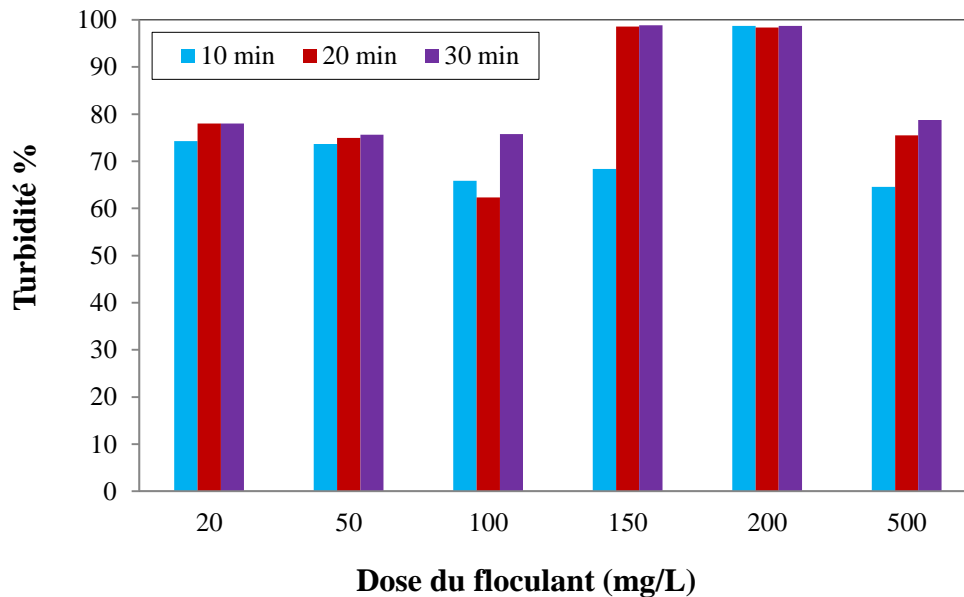


Figure II.7 : Effet de la dose du flocculant anionique en présence du (OFI mucilage) sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 75.9$ NTU, $C_{(OFI, Gel)} = 2$ ml, pH initial = 10, $\kappa = 1.345$ ms/cm

L'analyse des résultats concernant l'utilisation combinée du mucilage d'OFI avec un polyélectrolyte anionique révèle des tendances significatives dans l'abattement de la turbidité. À faible dose (20-50 mg/l), le flocculant anionique permet déjà une élimination substantielle de la turbidité (environ 74-78% après 10-30 minutes), démontrant une synergie initiale avec le mucilage. Toutefois, l'efficacité fluctue de manière inattendue à des doses intermédiaires (100 mg/l), où l'on observe une légère diminution de performance (65,9% à 10 minutes).

La dose optimale se situe clairement à 150-200 mg/l, où l'abattement de la turbidité atteint des valeurs remarquables, particulièrement à 200 mg/l avec une élimination quasi-complète (98,7%) dès 10 minutes de décantation. Cette performance exceptionnelle pourrait s'expliquer par une interaction optimale entre les chaînes polymériques du polyélectrolyte anionique et les composés actifs du mucilage, favorisant la formation de floccs plus volumineux et plus stables.

Un phénomène intéressant est observé à forte dose (500 mg/l), où l'efficacité diminue significativement (64,6% à 10 minutes), suggérant un possible effet de surdosage. Ce phénomène, également rapporté par (Lee *et al.*, 2014) pourrait être attribué à une restabilisation des particules colloïdales due à la saturation des sites d'adsorption ou à une répulsion électrostatique accrue entre les chaînes polymériques en excès.

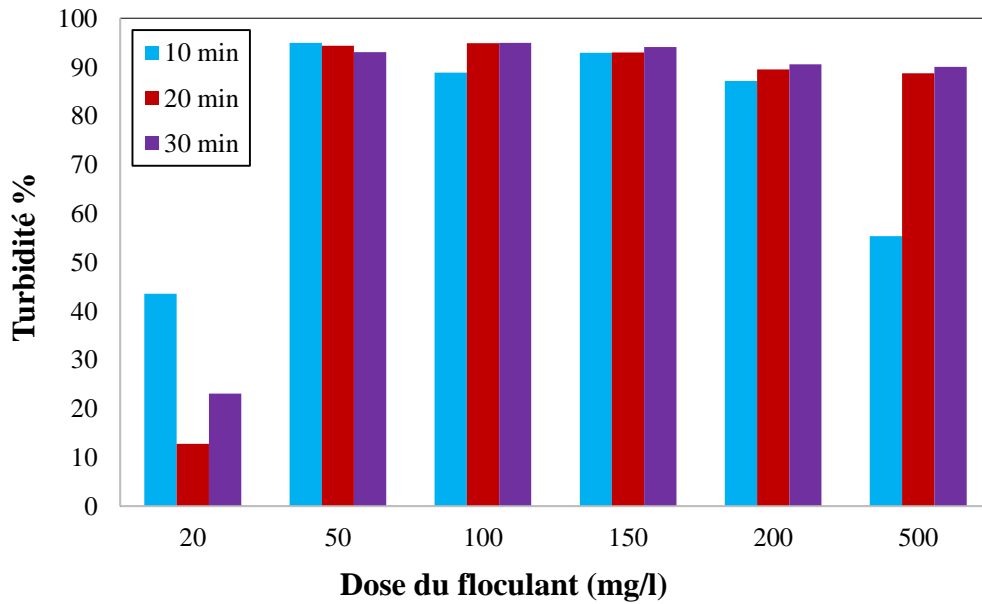


Figure II.8 : Effet de la dose du flocculant anionique en présence du (OFI, Poudre) sur l'élimination de la turbidité : $Turb_i = 84,5$ NTU, $C_{(OFI, Poudre)} = 200$ mg/l, pH initial = 10, $\kappa = 1,345$ ms/cm

Pour la poudre d'OFI, l'effet de l'addition du flocculant anionique présente un profil différent. À très faible dose (20 mg/l), l'efficacité est nettement insuffisante, avec seulement 43,6% d'élimination après 10 minutes, puis une chute drastique à 12,8% après 20 minutes, suggérant une déstabilisation des floccs initialement formés.

En revanche, dès 50 mg/l, on observe une amélioration spectaculaire de la performance, avec un abattement de turbidité atteignant 95% après 10 minutes. Ce seuil critique correspond probablement à la concentration minimale nécessaire pour établir des ponts efficaces entre les particules préalablement déstabilisées par la poudre d'OFI, comme l'ont également observé **(Nharingo et Moyo, 2016)** ; dans leurs travaux sur les biofloculants.

Pour la poudre, la plage optimale de dosage du floculant semble plus large (50-200 mg/l) avec des performances excellentes et relativement stables (90-95% d'élimination). Cette stabilité suggère une complémentarité robuste entre les mécanismes de coagulation de la poudre d'OFI et les propriétés de floculation du polyélectrolyte anionique.

À forte dose (500 mg/l), contrairement au mucilage, la poudre maintient une efficacité relativement élevée (90% après 30 minutes), bien qu'inférieure aux dosages optimaux. Cette différence de comportement pourrait s'expliquer par une interaction distincte entre la structure particulaire de la poudre et le polyélectrolyte anionique, limitant les effets négatifs du surdosage.

Il est particulièrement remarquable de constater que les résultats obtenus pour le rendement d'élimination de la turbidité ont permis d'atteindre pleinement l'objectif du traitement par C-F, qui est de réduire la turbidité en dessous de 5 NTU conformément aux recommandations de l'OMS et de nombreuses normes internationales de qualité des eaux potables. En effet, les valeurs finales de turbidité obtenues sont exceptionnellement basses, atteignant 0,88 NTU pour le système utilisant le mucilage et 1,96 NTU pour celui utilisant la poudre. Ces valeurs sont largement inférieures au seuil recommandé et témoignent de l'excellente efficacité de clarification des systèmes hybrides OFI-polyélectrolyte anionique, les rendant particulièrement prometteurs pour des applications réelles dans le traitement des eaux destinées à la consommation humaine, comme l'ont également souligné **(Yessenia et al., 2021)**. Dans leurs études sur les coagulants naturels durables.

II.4. Évaluation comparative de l'efficacité des biocoagulants et du sulfate d'aluminium

L'évaluation des performances des biocoagulants nécessite une approche comparative rigoureuse avec les coagulants conventionnels utilisés dans l'industrie du traitement des eaux. Cette section présente une analyse comparative détaillée entre les extraits d'*Opuntia ficus-indica* sous différentes formes (mucilage et poudre) et le sulfate d'aluminium, coagulant de référence largement utilisé dans les stations de traitement d'eau en Algérie. L'évaluation porte sur plusieurs

paramètres critiques incluant l'efficacité de coagulation, les conditions opérationnelles, l'impact environnemental et la sécurité sanitaire. Cette comparaison permet de déterminer le potentiel réel des biocoagulants comme alternative durable aux coagulants chimiques conventionnels.

II.4.1. Comparaison des performances globales de coagulation

Une comparaison systématique des performances des biocoagulants à base d'*Opuntia ficus-indica* avec celles du sulfate d'aluminium (alun) a été réalisée dans des conditions opérationnelles optimisées pour chaque coagulant, en présence d'un flocculant anionique (polyélectrolyte) pour améliorer l'agrégation des floccs. Les résultats sont présentés dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 : Comparaison des performances des biocoagulants avec le sulfate d'aluminium en présence d'un flocculant anionique

Paramètre	Mucilage	Poudre	Sulfate d'aluminium
Dose optimale du coagulant (mg/l)	2 ml	200	400
Dose optimale du flocculant (Pa) (mg/l)	150	50	50
Réduction de la turbidité (%)	98,84 ± 1,8	94,97 ± 2,1	84,08 ± 1,5
Turbidité résiduelle (NTU)	0,88 ± 0,4	1,96 ± 0,6	6,83 ± 0,3
pH efficace	10,0	10,0	7,0-10
Volume de boues produites en coagulation (absence du flocculant) (ml/l)	1,4 ± 0,1	1,0 ± 0,1	15 ± 1
Aluminium résiduel (mg/l)	Non détecté	Non détecté	0,18 ± 0,05
Biodégradabilité des boues	Élevée	Élevée	Faible

Les résultats révèlent une supériorité remarquable des biocoagulants d'*Opuntia ficus-indica* sur plusieurs aspects critiques, même en présence d'un système de coagulation-floculation optimisé. Le mucilage présente l'efficacité la plus élevée avec une réduction de turbidité de 98,84 ± 1,8%, soit 15% supérieur au sulfate d'aluminium (84,08 ± 1,5%). Cette performance exceptionnelle se traduit par une turbidité résiduelle extrêmement faible de 0,88 ± 0,4 NTU, soit près de 8 fois inférieure à celle obtenue avec l'alun (6,83 ± 0,3 NTU).

L'efficacité dosage-dépendante constitue un autre avantage majeur des biocoagulants. Le mucilage nécessite une dose optimale de seulement 2 ml/l de coagulant, représentant une réduction drastique par rapport aux 400 mg/l requis pour le sulfate d'aluminium. Cependant, il convient de noter que le mucilage nécessite une dose plus élevée de flocculant anionique (150 mg/l) comparé à la poudre et au sulfate d'aluminium (50 mg/l chacun). Cette différence peut

s'expliquer par les interactions spécifiques entre les polysaccharides du mucilage et le polyélectrolyte anionique, nécessitant un ajustement de la charge pour optimiser la floculation.

Malgré cette consommation plus élevée de floculant pour le mucilage, l'ensemble coagulant + floculant reste économiquement avantageux compte tenu de l'efficacité exceptionnelle obtenue. La poudre d'*Opuntia ficus-indica* présente un profil plus équilibré avec une dose modérée de coagulant (200 mg/l) et une consommation de floculant identique au sulfate d'aluminium (50 mg/l).

L'impact environnemental des biocoagulants s'avère également très favorable. La production de boues est réduite de 10 à 15 fois par rapport au sulfate d'aluminium, avec des volumes de 1,0 à 1,4 ml/l contre 15 l/l. De plus, ces boues présentent une biodégradabilité élevée, facilitant leur gestion et réduisant l'impact écologique à long terme.

L'aspect sécurité sanitaire constitue un avantage décisif des biocoagulants, avec l'absence totale d'aluminium résiduel dans l'eau traitée, éliminant les risques de neurotoxicité associés à l'accumulation d'aluminium dans l'organisme.

II.4.2. Efficacité comparative pour l'élimination des matières en suspension (MES) et de la dureté totale (TH)

L'évaluation spécifique de l'efficacité d'élimination des matières en suspension et de la dureté totale permet d'apprécier la polyvalence des biocoagulants pour différents types de pollution.

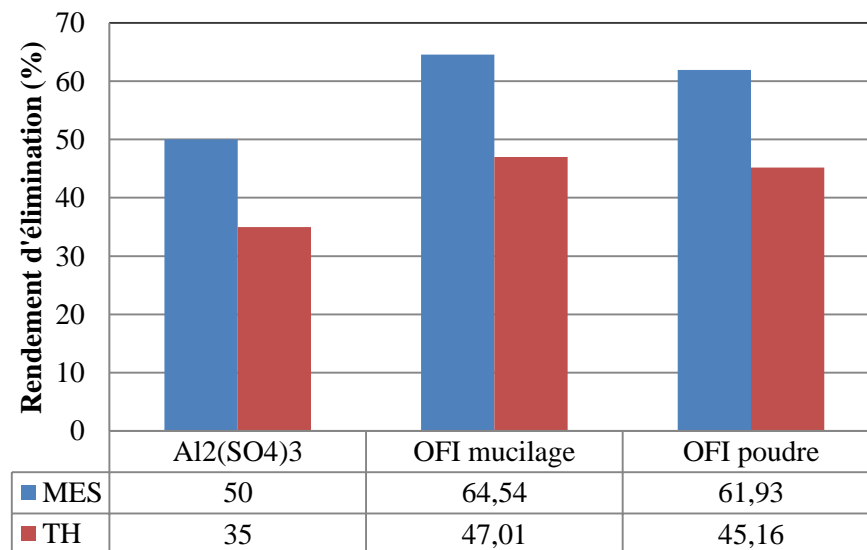


Figure II.9 : Efficacité comparative des biocoagulants d'*Opuntia ficus-indica* et du sulfate d'aluminium pour l'élimination de MES et TH

Les biocoagulants d'*Opuntia ficus-indica* démontrent une efficacité supérieure au sulfate d'aluminium pour l'élimination des matières en suspension et de la dureté totale. Pour les MES, le mucilage atteint un rendement d'élimination de 64,54% contre 50% pour l'alun, soit une amélioration de 29%. La poudre présente également de bonnes performances avec 61,93% d'élimination.

Concernant la dureté totale, les biocoagulants affichent des rendements de 47,01% (mucilage) et 45,16% (poudre) comparés à 35% pour le sulfate d'aluminium, représentant une amélioration de 29 à 34%. Cette efficacité supérieure s'explique par les mécanismes de coagulation spécifiques des polysaccharides d'*Opuntia ficus-indica*, qui favorisent l'agrégation des particules colloïdales et la précipitation des ions responsables de la dureté.

Ces résultats confirment la polyvalence des biocoagulants pour traiter différents types de pollution, avec des performances constamment supérieures au coagulant conventionnel, consolidant leur potentiel comme alternative durable et efficace pour le traitement des eaux.

II.5. Conclusion

Cette étude sur l'optimisation de la coagulation-floculation par l'*Opuntia ficus-indica* pour le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada a démontré le potentiel exceptionnel de ce biocoagulant naturel comme alternative durable aux coagulants chimiques conventionnels. Les résultats révèlent que le mucilage d'*Opuntia ficus-indica* présente une efficacité supérieure avec 86,4% d'élimination de la turbidité dans les conditions optimales (2 ml, pH 10), atteignant même 98,84% en association avec un floculant anionique et générant une turbidité résiduelle de seulement 0,88 NTU, largement inférieure aux normes internationales. La poudre, bien que moins performante individuellement (45,13% à 200 mg/l), atteint également des rendements remarquables de 94,97% avec le floculant. Comparativement au sulfate d'aluminium, les biocoagulants d'*Opuntia ficus-indica* offrent des avantages significatifs : efficacité supérieure (98,84% contre 84,08% pour l'alun), production de boues réduite de 10 à 15 fois, absence totale d'aluminium résiduel éliminant les risques de neurotoxicité, et biodégradabilité élevée des sous-produits. Ces performances exceptionnelles, combinées à la polyvalence du traitement pour l'élimination des matières en suspension et de la dureté totale, positionnent l'*Opuntia ficus-indica*

comme une solution techniquement viable et écologiquement avantageuse pour la purification des ressources hydriques, ouvrant des perspectives prometteuses pour l'implémentation de technologies durables dans le traitement des eaux destinées à la consommation humaine.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Cette étude sur l'optimisation de la coagulation-floculation par l'*Opuntia ficus-indica* pour le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources naturelles locales et de développement de technologies durables adaptées au contexte algérien, confirmant le potentiel exceptionnel de ce biocoagulant comme alternative écologique et performante aux coagulants chimiques conventionnels. L'investigation approfondie des propriétés coagulantes de l'*Opuntia ficus-indica* a révélé des performances remarquables qui dépassent largement celles du sulfate d'aluminium, avec le mucilage présentant une efficacité exceptionnelle d'élimination de la turbidité atteignant 98,84% dans les conditions optimales (2 mL/L, pH 10) en association avec un floculant anionique, générant une turbidité résiduelle de seulement 0,88 NTU, soit huit fois inférieure à celle obtenue avec l'alun (6,83 NTU), plaçant le produit final largement en dessous des normes internationales de potabilité fixées à 5 NTU. Comparativement au sulfate d'aluminium, les biocoagulants d'*Opuntia ficus-indica* offrent des avantages décisifs incluant une efficacité supérieure, une production de boues réduite de 10 à 15 fois (1,0 à 1,4 mL/L contre 15 mL/L pour l'alun), l'absence totale d'aluminium résiduel éliminant les risques de neurotoxicité, et une biodégradabilité élevée des sous-produits permettant leur valorisation comme amendements agricoles. L'optimisation systématique des paramètres opérationnels a identifié le pH alcalin (pH 10) comme déterminant pour l'activation des propriétés coagulantes des biopolymères, favorisant la déprotonation des groupements fonctionnels et optimisant les mécanismes d'adsorption et de pontage entre particules colloïdales. Cette plante xérophyte, parfaitement adaptée aux conditions climatiques arides et semi-arides de l'Algérie et disponible localement en abondance, présente des implications significatives pour le développement durable en réduisant les coûts d'importation et en contribuant au développement économique des régions rurales, tout en démontrant une polyvalence remarquable pour l'élimination des matières en suspension (64,54% contre 50% pour l'alun) et de la dureté totale (47,01% contre 35% pour l'alun). En conclusion, cette étude démontre de manière convaincante que l'*Opuntia ficus-indica* représente une alternative durable, efficace et économiquement viable aux coagulants chimiques conventionnels pour le traitement des eaux du barrage d'Ain Zada et d'autres ressources hydriques similaires, positionnant cette technologie comme une solution d'avenir pour répondre aux défis croissants de la qualité de l'eau en Algérie et contribuant

significativement à l'atteinte des objectifs de développement durable, notamment en matière d'accès à l'eau potable de qualité, de préservation des écosystèmes aquatiques et de valorisation des ressources naturelles locales, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle génération de technologies de traitement des eaux plus respectueuses de l'environnement et adaptées aux réalités socio-économiques des pays en développement.

Références bibliographiques

Adjeroud N., Boudissa S. M. & Khelifi A. (2018). Extraction et caractérisation du mucilage de cladodes d'*Opuntia ficus-indica* pour des applications environnementales. *Journal Algérien des Régions Arides* **15(1)**, 45–54.

Ait Hamou M., Ladji R. & Touil S. (2021). Valorisation des produits du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) en Algérie : État des lieux et perspectives. *Revue Agrobiologia* **11(1)**, 2345-2357.

ANBT. (2013). Fiche technique du barrage d'Ain Zada. Agence Nationale des Barrages et Transferts, Algérie.

Azzouz S., Abbou B. & Bekkouche S. (2023). Évaluation de la qualité des eaux de surface destinées à l'alimentation en eau potable des barrages de l'est algérien. *Journal of Water Science* **36(1)**, 67-82.

Bahfir A. & Benbouzid H. (2023). Traitement des eaux de surface du barrage "Ain Zada" Bordj Bou Arreridj par coagulation floculation, Algérie.

Betatache H., Aouabed A. & Drouiche N. (2022). Evaluation of *Opuntia ficus-indica* cladodes powder as a natural coagulant in drinking water treatment: Case study of Koudiat Medouar dam (Algeria). *Environmental Technology & Innovation* **26**, 102277.

Bouafia-Chafai R., Daci T. & Bensaci H. (2020). Assessment of surface water quality in Algerian dams: Case study of Ain Zada reservoir. *Journal of Environmental Management* **262**, 110317.

Bouaouine O., Bourven I., Khalil F. & Baudu M. (2019). Identification of functional groups of *Opuntia ficus-indica* involved in coagulation process after its active part extraction. *Environmental Science and Pollution Research* **26(16)**, 16548-16557.

Bouatay F., Baaka N., Mhenni F. & Benlahmar E. (2020). *Opuntia ficus-indica* cladodes extract as a novel green flocculant: Application for textile wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering* **37**, 101481.

Bouatay F. & Mhenni F. (2014). Use of the cactus cladodes mucilage (*Opuntia ficus indica*) as an eco-friendly flocculant: Process development and optimization using statistical analysis. *International Journal of Environmental Research* **8(4)**, 1295-1308.

Boucherit A., Moulay S. & Ghernaout D. (2018). New trends in coagulation-flocculation processes for water treatment. *Desalination and Water Treatment* **105**, 17-29.

Boukrouma N. & Ladjel S. (2019). Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage d'Ain Zada (Wilaya de Bordj Bou Arreridj). *Revue des Sciences de l'Eau* **32(1)**, 89-103.

Bratby J. (2016). Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment (3rd ed.). IWA Publishing.

Chowdhury S., Champagne P. & McLellan P.J. (2009). Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review. *Science of the Total Environment* **407(14)**, 4189-4206.

- Choy S.Y., Prasad K.M.N., Wu T.Y., Raghunandan M.E. & Ramanan R.N. (2014).** Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences* **26(11)**, 2178-2189.
- Djerba M., Béjaoui I. & Khelifi M. (2019).** Caractérisation des matières organiques naturelles et des particules colloïdales dans les eaux de surface algériennes. *Revue des Sciences Hydrologiques* **64(9)**, 1112-1128.
- Fedala N., Lounici H. & Drouiche N. (2019).** Assessment of the efficiency of *Opuntia ficus-indica* as natural coagulant in water treatment: Application for the clarification of surface water. *Desalination and Water Treatment* **166**, 53-61.
- Fox D.I., Pichler T., Yeh D.H. & Alcantar N.A. (2012).** Removing heavy metals in water: The interaction of cactus mucilage and arsenate (As(V)). *Environmental Science & Technology* **46(8)**, 4553-4559.
- Freitas T.K.F.S., Oliveira V.M., de Souza M.T.F., Geraldino H.C.L., Almeida V.C., Fávares S.L. & Garcia J.C. (2018).** Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products* **76**, 538-544.
- Ghebremichael K.A., Gunaratna K.R. & Dalhammar G. (2012).** Single-step ion exchange purification of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed and its use in turbidity removal. *Applied Microbiology and Biotechnology* **94(5)**, 1373-1380.
- Ghernaout D. (2020).** Coagulation process for water and wastewater treatment – A review. *Applied Water Science* **10**, 87.
- Kadouche S., Lounici H. & Drouiche N. (2017).** Alternative coagulants to conventional aluminium salts in water treatment: A critical review. *Journal of Water Process Engineering* **20**, 259-271.
- Kettab A., Mitiche R. & Bennaçar N. (2016).** Water resources in Algeria: Strategies, challenges and perspectives. *Desalination and Water Treatment* **57(5)**, 2327-2338.
- Lamia C., Abdelghani C F., Djihad R. & Radia G. (2024).** Turbidity removal from surface water using *Cactus opuntia*. *Studies in Engineering and Exact Sciences, Curitiba* **5(2)**, 01-24.
- Miller S.M., Fugate E.J., Craver V.O., Smith J.A. & Zimmerman J.B. (2008).** Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science & Technology* **42(12)**, 4274-4279.
- Ndabigengesere A. & Narasiah K.S. (2010).** Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research* **32(3)**, 781-791.
- Nharingo T., Zivurawa M.T. & Guyo U. (2015).** Exploring the use of cactus *Opuntia ficus-indica* in the biocoagulation-flocculation of Pb(II) ions from wastewaters. *International Journal of Environmental Science and Technology* **12(12)**, 3791-3802.
- Nharingo T. & Moyo M. (2016).** Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review. *Journal of Environmental Management* **166**, 55-72.
- Rachdi R., Srarfi F. & Shimi N.S. (2017).** Cactus *Opuntia* as natural flocculant for urban wastewater treatment. *Water Science and Technology* **76(7)**, 1875-1883.
- Remini B. (2018).** Barrages des grandes régions arides algériennes : ressources et problématiques. *Larhyss Journal* **36**, 7-20.

- Rodier J., Legube B. & Merlet N. (2005).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (8e éd.). Dunod Technique, Paris, 1383 p.
- Rodríguez-Pérez C., Quirantes-Piné R. & Segura-Carretero A. (2018).** Changes in the phenolic composition of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill seeds during growth and maturation. *Food Chemistry* **269**, 452-458.
- Taa N., Amara D. & Bouzidi A. (2022).** Performance evaluation of cactus powder as bioflocculant for turbidity removal from surface water in Algeria. *Water Science and Technology* **85(4)**, 1064-1077.
- Watson M.A., Lea J.M. & Bett-Garber K.L. (2016).** Oxidative stability of conventionally extracted mucilage from chia (*Salvia hispanica* L.) seeds during interaction with chlorine species. *Food Chemistry* **212**, 653-659.
- WHO (World Health Organization). (2017).** Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization.
- Yessenia L.P., Wilkendorf L.S., Ontiveros J.L.R. & Meraz F.S. (2021).** Natural coagulants from *Opuntia ficus-indica* cactus as sustainable alternative in water treatment: Recent advances and challenges. *Journal of Water Process Engineering* **41**, 102009.
- Yin C.Y., Aroua M.K. & Daud W.M.A.W. (2010).** Functional Group Analysis of *Opuntia ficus-indica* for Natural Coagulant Application. *Desalination and Water Treatment* **20(1-3)**, 232-240.
- Yin C.Y. (2010).** Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry* **45(9)**, 1437-1444.
- Yin C.Y., Abdul-Talib S., Lim Y.P., Ismail M.S.N., Abdul-Razak S.N. & Mohd-Mohtar A.M. (2007).** Turbidity removal from surface water and landfill leachate using cactus *Opuntia*. *Journal - Institution of Engineers Malaysia* **68(1)**, 61-64.
- Yin H., Qiu P., Qian Y., Kong Z., Zheng X., Tang Z. & Guo H. (2018).** Extraction of chitosan from food waste and its use as a coagulant for water treatment. *Food Hydrocolloids* **83**, 267-274.
- Zhang J., Zhang F., Luo Y. & Yang H. (2017).** A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. *Process Biochemistry* **45(9)**, 1437-1444.
- Zhang X., Minear R.A. & Barrett S.E. (2015).** Characterization of high molecular weight disinfection byproducts from chlorination of humic substances with/without coagulation pretreatment. *Water Research* **39(16)**, 3859-3868.

ملخص

تقيم هذه الدراسة فعالية الصبار الشوكي (*Opuntia ficus-indica*) كمخثر حيوي طبيعي لتقليل عكارة مياه سد عين زادة (57.2 وحدة عكارة نيفلومترية) إلى معايير الصلاحية للشرب (<5 وحدات). تم اختبار شكلين: المخاط المستخرج بالتجانس يظهر كفاءة مثلى 86.4% لإزالة العكارة (الجرعة: 2 مل/لتر، الأس الهيدروجيني 10) تصل إلى 98.84% مع المندف الأنيوني (العكارة المتبقية: 0.88 وحدة)، بينما يقدم المسحوق المحصل عليه بالتجفيف عند 60°م كفاءة 45.13% منفرداً (200 مغ/لتر) تصل إلى 94.97% مع المندف (العكارة المتبقية: 1.96 وحدة). مقارنة بكميات الألومنيوم التقليدية (84.08% كفاءة)، يُظهر الصبار الشوكي أداءً متفوقاً مع تقليل إنتاج الحمأة 10-15 مرة، غياب الألومنيوم المتبقي، إزالة أفضل للمواد العالقة (64.54% مقابل 50%) وتقليل العسر الكلي (47.01% مقابل 35%)، مما يمثل بديلاً اقتصادياً وبيئياً ومستداماً لتأمين الموارد المحلية في معالجة المياه.

الكلمات المفتاحية: مخثر حيوي، الصبار الشوكي، التخثر-التندف، معالجة المياه، العكارة، كبريتات الألومنيوم، المخاط، البديل البيئي.

Résumé

Cette étude évalue l'efficacité d'*Opuntia ficus-indica* comme biocoagulant naturel pour réduire la turbidité des eaux du barrage d'Ain Zada (57,2 NTU) aux normes de potabilité (<5 NTU). Deux formes ont été testées : le mucilage extrait par homogénéisation montre une efficacité optimale de 86,4% d'élimination de la turbidité (dose : 2 mL/L, pH 10) atteignant 98,84% avec flocculant anionique (turbidité résiduelle : 0,88 NTU), tandis que la poudre obtenue par séchage à 60°C présente 45,13% d'efficacité seule (200 mg/L) jusqu'à 94,97% avec flocculant (turbidité résiduelle : 1,96 NTU). Comparativement au sulfate d'aluminium conventionnel (84,08% d'efficacité), l'*Opuntia ficus-indica* démontre une performance supérieure avec une production de boues réduite de 10-15 fois, l'absence d'aluminium résiduel, une meilleure élimination des matières en suspension (64,54% vs 50%) et une réduction de la dureté totale (47,01% vs 35%), représentant ainsi une alternative économique, écologique et durable pour la valorisation des ressources locales dans le traitement des eaux.

Mots-clés : Biocoagulant, *Opuntia ficus-indica*, coagulation-flocculation, traitement des eaux, turbidité, sulfate d'aluminium, mucilage, alternative écologique.

Abstract

This study evaluates the effectiveness of *Opuntia ficus-indica* as a natural biocoagulant to reduce the turbidity of Ain Zada Dam waters (57.2 NTU) to potability standards (<5 NTU). Two forms were tested: mucilage extracted by homogenization shows optimal efficiency of 86.4% turbidity removal (dose: 2 mL/L, pH 10) reaching 98.84% with anionic flocculant (residual turbidity: 0.88 NTU), while powder obtained by drying at 60°C presents 45.13% efficiency alone (200 mg/L) up to 94.97% with flocculant (residual turbidity: 1.96 NTU). Compared to conventional aluminum sulfate (84.08% efficiency), *Opuntia ficus-indica* demonstrates superior performance with 10-15 times reduced sludge production, absence of residual aluminum, better suspended solids removal (64.54% vs 50%) and total hardness reduction (47.01% vs 35%), thus representing an economical, ecological and sustainable alternative for valorizing local resources in water treatment.

Keywords: Biocoagulant, *Opuntia ficus-indica*, coagulation-flocculation, water treatment, turbidity, aluminum sulfate, mucilage, ecological alternative.