

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département des Sciences de la Matière



Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A. -



Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A. -

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

FILIERE : Chimie

Spécialité : Chimie analytique

Intitulé

**Clarification des eaux de surface en utilisant le cactus
comme coagulant naturel**

Présenté par :

BAHLOULI Mouncef

Soutenu le 02 /06/2026

Devant le jury

Président	Chellali Nacer Eddine	Pr	Université de Bordj Bou Arreridj
Encadrant	Boubatra Mustapha	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur 1	Mekhalif Tahar	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH tout-puissant de m'avoir accordé la force, le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation tout au long de mon parcours universitaire.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de mon travail ainsi que pour leur patience.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur, Dr M. Boubatra, maître de conférences à l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi – Bordj Bou Arreridj, Faculté des Sciences et de la Technologie, pour avoir accepté de m'encadrer, ainsi que pour ses précieux conseils, ses orientations et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail.

Dédicace

Avec un immense plaisir, le cœur rempli de joie et de gratitude, je dédie ce travail à mes très chers et merveilleux parents, Fayçal et Amel, qui m'ont soutenu tout au long de ma vie.

Merci pour votre amour, vos sacrifices, votre patience et vos encouragements permanents.

Que Dieu vous protège et vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes très chers frères Lokman et Mohamed, ainsi qu'à ma chère sœur Rouaa, que j'aime profondément.

Je vous souhaite un avenir lumineux, rempli de bonheur, de réussite et de belles réalisations.

Puisse la vie vous offrir tout ce qu'il y a de meilleur.

À mes oncles et mes très chères tantes, Vous qui avez toujours été là pour me soutenir et m'encourager.

À mes très chères amis, Assim, Bachir, Je vous dédie ce travail en témoignage de ma grande affection et en souvenir des agréables moments passés ensemble. Vous êtes les meilleures.

À tous mes proches, même si je ne puis vous citer un à un, je ne vous oublie pas ; À mes deux familles, BAHLOULI et SALAMANI.

MOUNCEF

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I : Revue bibliographique.....8

I.1. Introduction8

I.2. Présentation des eaux de surface9

I.3. Principales étapes du traitement des eaux d'alimentation11

I.3.1. Le prétraitement.....11

I.3.2. La coagulation12

I.3.3. Flocculation.....12

I.3.4. La décantation13

I.3.5. La filtration.....13

I.3.6. La désinfection13

I.4. Procédé de coagulation-flocculation13

I.5. Les coagulants chimiques classiques.....15

I.6. Les bio-coagulants naturels.....17

I.7. Le cactus biocoagulant naturel.....19

I.8. Mécanisme d'action du cactus dans la coagulation-flocculation.....20

I.9. Comparaison du cactus avec les coagulants chimiques.....21

I.10. Intérêt de l'étude du cactus pour le traitement des eaux de surface22

I.11. Fin du chapitre.....23

Sommaire

Chapitre II : Matériel et méthodes	27
II.1. Introduction.....	27
II.2. Plante matériel utilisé	29
II.2.1. Sélection du cactus	29
II.2.2. Nettoyage du cactus	30
II.3. Préparation des échantillons de cactus	30
II.3.1. Préparation d'une poudre de cactus.....	30
II.3.2. Préparation du jus de cactus	33
II.4. Eau de surface utilisée	33
II.5. Produits chimiques et réactifs employés	34
II.6. Matériel employé.....	34
II.7. Caractérisation physico-chimique du cactus	35
II.7.1. Détermination du pH des extraits de cactus.....	36
II.7.2. Mesurage de la conductivité électrique	36
II.7.3. Caractérisation de la granulométrie de la poudre.....	36
II.8. Caractérisation par spectroscopie infrarouge (FTIR).....	36
II.8.1. Principe de la spectrométrie FTIR.....	36
II.8.2. Préparation des échantillons pour l'analyse par FTIR.....	37
II.8.3. Conditions de l'analyse FTIR	37
II.9. Tests de coagulation-floculation au Jar-test	38
II.9.1. Principe du Jar-test	38
II.9.2. Procédé général	39

Sommaire

II.9.3. Préparation des doses de biocoagulant	40
II.9.4. Tests du sulfate d'aluminium.....	40
II.10. Mesures et testes après traitement.....	41
II.10.1. Mesure de la turbidité résiduelle	41
II.10.2. Mesure du pH après traitement	42
II.10.3. Mesure de la conductivité électrique	43
II.10.4. Observation des agrégats	43
II.11. Utilisation des résultats.....	43
II.12. Fin du chapitre	44
Chapitre III : Résultats et discussion.....	47
III.1. Introduction	47
III.2. Caractérisation initiale de l'eau brute	47
III.3. Caractérisations physico-chimiques des échantillons de cactus.....	49
II.4. Interprétation des résultats FTIR des échantillons de cactus.....	50
III.5. Influence de la dose de cactus sur la réduction de la turbidité	58
III.6. Comparaison des diverses formes de cactus étudiées.....	60
III.7. Influence de la granulométrie de la poudre de cactus sur la coagulation-floculation..	62
III.8. Action probable du cactus comme biocoagulant	64
III.9. Comparaison avec le sulfate d'aluminium.....	65
III.10. Influence du traitement sur le pH et la conductivité	67
III.11. Influence du traitement au cactus sur le pH et la conductivité	68
III.12. Influence du pH initial sur la clarification.....	69
III.13. Observation des floccs obtenus	71

Sommaire

III.14. Discussion générale des performances du cactus	72
III.15. Confrontation avec les travaux antérieurs.....	74
III.16. Conclusion.....	76
Conclusion générale.....	81
Perspectives.....	83
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma général du cycle de l'eau.

Figure I.2 : Principales sources de pollution des eaux de surface.

Figure I.3 : Chaîne conventionnelle de traitement des eaux potables.

Figure I.4 : Principe de la coagulation-floculation.

Figure I.5 : Désstabilisation des particules colloïdales lors de la coagulation.

Figure I.6 : Formation et croissance des floes pendant la floculation.

Figure I.7 : Exemple de coagulants naturels d'origine végétale.

Figure I.8 : Cladodes de cactus *Opuntia ficus-indica*.

Figure I.9 : Mécanisme proposé du cactus comme biocoagulant naturel.

Figure II.1 : Cactus utilisé comme matière végétale.

Figure II.2 : Lavage et découpage des cladodes de cactus.

Figure II.3 : Séchage des cladodes de cactus.

Figure II.4 : Broyage des cladodes séchées.

Figure II.5 : Tamisage de la poudre de cactus.

Figure II.6 : Différentes granulométries de poudre de cactus obtenues.

Figure II.7 : Préparation du jus de cactus.

Figure II.8 : Spectrophotomètre FTIR utilisé pour la caractérisation des échantillons (FTIR Q-ATR.S).

Figure II.9 : Appareil de Jar-test utilisé pour les essais de coagulation-floculation.

Figure II.10 : Turbidimètre utilisé pour la mesure de la turbidité.

Figure II.11 : pH-mètre et conductimètre utilisés pour les analyses physico-chimiques.

Figure III.1 : Spectre infrarouge de la poudre avant tamisage.

Figure III.2 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 100 microns.

Figure III.3 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 150 microns.

Figure III.4 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 200 microns.

Figure III.5 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 250 microns.

Figure III.6 : Spectre infrarouge de la poudre (refus sur tamis).

Liste des figures

Figure III.7 : Spectre infrarouge du jus de cactus fraîchement préparé.

Figure III.8 : Spectre infrarouge du jus da cactus (préparé un mois avant).

Figure III.9 : Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant.

Figure III.10 : Comparaison des différentes formes de cactus utilisées dans la clarification des eaux.

Figure III.11 : Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la granulométrie de la poudre de catus.

Figure III.12. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction du pH initial.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux types d'eaux naturelles.

Tableau I.2 : Principaux paramètres de qualité des eaux de surface.

Tableau I.3 : Étapes conventionnelles du traitement des eaux potables.

Tableau I.4 : Principaux coagulants chimiques utilisés dans le traitement des eaux.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients du sulfate d'aluminium.

Tableau I.6 : Exemples de biocoagulants naturels d'origine végétale.

Tableau I.7 : Composition générale du mucilage de cactus.

Tableau I.8 : Comparaison entre coagulants chimiques et biocoagulants naturels.

Tableau II.1 : Matériel végétal utilisé dans l'étude.

Tableau III.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau non traitée.

Tableau III.2 : Analyse physico-chimiques des échantillons de cactus.

Tableau III.3 : Comparaison des performances du cactus et du sulfate d'aluminium.

Tableau III.4 : Influence du traitement au cactus sur le pH et la conductivité.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Al₂(SO₄)₃ : Sulfate d'aluminium

Al³⁺ : Ion aluminium

Ct : Cactus

Ca²⁺ : Ion calcium

Cl⁻ : Ion chlorure

COO⁻ : Groupement carboxylate

C=O : Groupement carbonyle

C–O : Liaison carbone–oxygène

C–O–C : Liaison éther des polysaccharides

DCO : Demande chimique en oxygène

DBO₅ : Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours

FTIR : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

HCl : Acide chlorhydrique

MES : Matières en suspension

NaOH : Hydroxyde de sodium

NTU : Nephelometric Turbidity Unit / Unité de turbidité néphélométrique

O–H : Groupement hydroxyle

OMS : Organisation mondiale de la santé

pH : Potentiel hydrogène

R (%) : Rendement d'abattement

T₀ : Turbidité initiale

T_f : Turbidité finale

UV : Ultraviolet

UV-Vis : Ultraviolet-visible

TDS : Solides dissous totaux

Liste des symboles

Liste des symboles

C : Concentration du coagulant

cm⁻¹ : Nombre d'onde utilisé en spectroscopie infrarouge

g/L : Gramme par litre

H (%) : Taux d'humidité

m_f : Masse finale de l'échantillon après séchage

m_i : Masse initiale de l'échantillon

mg/L : Milligramme par litre

mL/L : Millilitre par litre

R (%) : Rendement d'élimination de la turbidité

rpm : Tours par minute

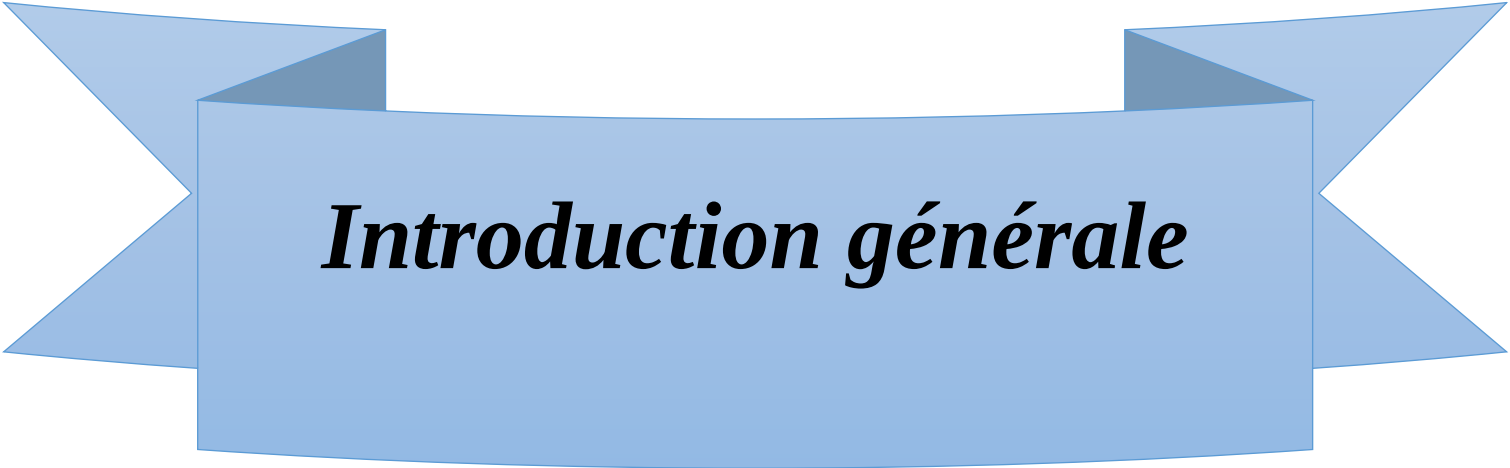
t : Temps d'agitation ou de décantation

T₀ : Turbidité initiale de l'eau brute

T_f : Turbidité finale après traitement

μS/cm : Microsiemens par centimètre, unité de conductivité

V : Volume de solution ajouté



Introduction générale

Introduction générale

L'eau potable est une ressource essentielle pour la santé humaine, le développement socio-économique et l'équilibre des écosystèmes. Les eaux de surface (c'est-à-dire les eaux de barrages, de rivières, de lacs ou de retenues), par contre, sont davantage soumises aux aléas climatiques, aux rejets domestiques, agricoles et industriels et aux apports naturels de matières minérales et organiques. Celles-ci peuvent contenir des particules colloïdales, des matières en suspension, des microorganismes pathogènes, des substances organiques, naturelles, des nutriments, des métaux et parfois des micropolluants. L'Organisation mondiale de la santé préconise que la production d'une eau destinée à la consommation humaine repose sur une approche globale de maîtrise des risques, depuis la ressource jusqu'au consommateur, afin de garantir une qualité microbiologique et physico-chimique acceptable [1]. Ainsi, dans le contexte présent, le traitement des eaux de surface est une étape indispensable pour limiter la turbidité, éliminer les particules indésirables, améliorer les qualités organoleptiques de l'eau et en garantir la conformité aux normes sanitaires.

Les chaînes classiques de traitement des eaux potables comportent généralement plusieurs étapes successives, à savoir le prétraitement, la coagulation, la floculation, la décantation ou flottation, la filtration et la désinfection [2], [3].

Le prétraitement est la première barrière de protection d'une station de traitement. Selon la qualité de l'eau brute, il peut comprendre le dégrillage, le tamisage, l'aération, la pré-oxydation ou l'ajustement du pH. Ces opérations ont pour effet de retenir les gros débris, de limiter certains goûts et odeurs, d'oxyder quelques composés réduits et de préparer l'eau aux traitements suivants [4], [5]. À l'issue de cette étape, la coagulation-floculation joue un rôle prépondérant dans le traitement des eaux de surface, puisqu'elle permet de transformer des particules fines, souvent stables et difficilement décantables, en agrégats plus volumineux appelés floes.

Ces floes peuvent être ensuite séparés par décantation, par flottation ou par filtration [6]. Les eaux de surface renferment ainsi des colloïdes argileux, des fins limons, des matières humiques, des microorganismes et des substances organiques naturelles qui possèdent à leur surface une charge électrique souvent négative. Cette charge crée une répulsion entre les particules qui empêche leur agglomération spontanée, ce qui explique que la turbidité persiste en l'absence de traitement adapté [7], [8].

Introduction générale

On définit généralement la coagulation comme l'étape rapide où l'on ajoute à l'eau un réactif chimique ou naturel pour déstabiliser les particules colloïdales. Cette déstabilisation peut résulter de la neutralisation des charges électriques, de la compression de la double couche ionique, de l'adsorption sur les particules, de la formation de précipités hydroxydes ou du mécanisme de piégeage dans un floc volumineux [6], [7]. Les procédés conventionnels font largement appel aux sels d'aluminium et de fer, comme le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique ou les sels préhydrolysés, en raison de leur efficacité et de leur disponibilité [7], [9]. Ces coagulants, lorsqu'ils sont mis en présence d'eau, subissent des réactions d'hydrolyse qui créent différentes espèces métalliques, possédant une charge positive et qui sont alors capables d'interagir avec les colloïdes négatifs. Le pH, l'alcalinité, la température, la dose de coagulant, la vitesse d'agitation et la nature des matières organiques naturelles sont donc des paramètres déterminants pour l'efficacité du procédé [6], [8], [10].

Une fois la coagulation effectuée, la floculation est une étape d'agitation lente qui permet de favoriser les collisions entre les particules déstabilisées et de permettre la croissance progressive des floes. Cette étape nécessite de trouver un compromis entre une agitation suffisante pour provoquer les contacts particuliers et une agitation modérée pour éviter la rupture des floes déjà formés [6]. Les floes formés doivent avoir une taille, une densité et une résistance mécanique suffisantes pour être éliminés efficacement lors de la clarification. La décantation permet ensuite la séparation gravitaire des floes, la filtration retirant les particules résiduelles qui n'ont pas été éliminées lors de la clarification. Pour finir, la désinfection, qui s'effectue en général par chloration, ozonation, rayonnement ultraviolet ou association de procédés, a pour but d'inactiver les microorganismes pathogènes et de rendre l'eau sûre jusqu'au point de distribution [1], [2], [4]. La coagulation-floculation influence donc fortement les performances des étapes suivantes, car une mauvaise coagulation peut entraîner une filtration moins efficace, une augmentation de la consommation de désinfectant et une formation potentielle de sous-produits de désinfection en présence de matières organiques naturelles [8], [11].

Les coagulants minéraux classiques sont efficaces, mais ils ont aussi quelques limites. On utilise par exemple beaucoup le sulfate d'aluminium dans les stations de traitement, mais son emploi peut conduire à une modification du pH, une augmentation de la salinité, une production importante de boues chimiques et la présence éventuelle d'aluminium résiduel lorsque les conditions de traitement ne sont pas correctement optimisées [7], [12]. Les sels ferriques peuvent également fournir de bonnes performances de clarification, mais ils peuvent modifier la couleur de l'eau, augmenter la quantité de boues produites et nécessiter un

contrôle rigoureux du pH [6], [9]. Ces contraintes ont favorisé ces dernières années un intérêt pour des coagulants alternatifs d'origine naturelle, renouvelables, biodégradables et potentiellement moins agressifs pour l'environnement [13], [14]. On étudie les biocoagulants provenant de plantes, de graines, de gommages, de mucilages ou de polysaccharides, comme solutions complémentaires ou de remplacement des coagulants chimiques, notamment dans les régions où les ressources végétales sont disponibles localement [13], [15].

Les espèces du genre *Opuntia*, couramment nommées cactus ou figuier de Barbarie, jouent un rôle majeur parmi les biocoagulants naturels. Le cactus est une plante très répandue dans les régions arides et semi-arides, notamment en Afrique du Nord, où il constitue une ressource végétale abondante, peu coûteuse et bien adaptée au climat local. Les cladodes de cactus renferment une substance muqueuse abondante en polysaccharides, en principes pectiques, en groupes hydroxyles, carboxyles et autres fonctions oxygénées qui peuvent entrer en réaction avec les corps en suspension [16], [17]. Ces macromolécules peuvent participer à l'épuration de l'eau par adsorption, par pontage interparticulaire, par emprisonnement des colloïdes dans un réseau polymérique ou par modification des interactions de surface [15], [18]. Les travaux de Miller et al. ont démontré que les espèces d'*Opuntia* présentent une véritable activité coagulante, capables de réduire significativement la turbidité d'échantillons de suspension synthétique, contribuant ainsi à rétablir un intérêt de recherche pour cette plante dans le domaine du traitement de l'eau [16]. On a attribué l'efficacité du cactus comme biocoagulant principalement à la composition colloïdale et macromoléculaire de son mucilage. À la différence des sels métalliques dont l'action repose principalement sur l'hydrolyse et la formation d'hydroxydes métalliques, le cactus se comporte davantage comme un polymère naturel susceptible de créer des ponts entre les particules dispersées. Les chaînes polysaccharidiques peuvent s'adsorber à la surface des colloïdes et relier entre elles plusieurs particules, ce qui favorise la formation de floccs de plus grande taille [16], [18], [19]. Les études récentes ont également révélé que les extraits d'*Opuntia ficus-indica* peuvent avoir des rendements d'abattement de la turbidité intéressants et parfois même réduire la production de boues par rapport à certains coagulants chimiques [18], [20]. Cependant, les performances sont très influencées par le mode de préparation du cactus, la granulométrie de la poudre, le type d'extraction du mucilage, la dose appliquée, le pH, la turbidité initiale, la vitesse d'agitation et le temps de décantation [18], [21], [22].

Son utilisation comme biocoagulant pourrait permettre de réduire la dépendance aux réactifs chimiques importés, de diminuer l'impact environnemental du traitement et de promouvoir des solutions plus durables, notamment pour les petites stations ou les zones

Introduction générale

rurales [13], [14], [23]. Des études effectuées sur des eaux réelles ou synthétiques montrent que le cactus peut améliorer la clarification, mais insistent sur la nécessité d'optimiser par des essais les conditions opératoires afin d'éviter un surdosage, une augmentation de la matière organique résiduelle ou une décantation trop lente [18], [21], [24]. Ainsi, pour les eaux destinées à la consommation humaine, l'utilisation d'un biocoagulant doit être accompagnée d'analyses supplémentaires de la turbidité résiduelle, du pH, de la conductivité, de la matière organique, de la charge microbiologique et de la stabilité de l'eau traitée [1], [25].

Dans cette perspective, l'utilisation du cactus comme biocoagulant pour la clarification des eaux de surface répond à une problématique à la fois environnementale, technologique et économique. Elle a pour but d'évaluer la capacité d'un matériau végétal naturel à remplacer totalement ou partiellement les coagulants minéraux classiques, tout en conservant une bonne efficacité d'élimination de la turbidité. L'intérêt scientifique de ce travail réside aussi dans la compréhension du mécanisme d'action du cactus, par la caractérisation des groupements fonctionnels du biocoagulant par spectroscopie infrarouge, l'étude de l'influence de la taille des particules de la poudre, la comparaison entre la poudre et le jus de cactus et la corrélation entre les propriétés physico-chimiques du biocoagulant et ses performances de clarification. Avec ce mémoire s'ouvre une piste de recherche de procédés de traitement minimisant l'impact environnemental par un recours raisonné à la ressource naturelle disponible autour de l'usine, tout en respectant les niveaux de qualité requis pour le traitement des eaux de surface.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique portant sur les eaux de surface, les principales étapes du traitement des eaux potables, le procédé de coagulation-floculation, les coagulants chimiques conventionnels ainsi que les biocoagulants naturels, avec un intérêt particulier pour le cactus et son mécanisme d'action. Le deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés dans cette étude. Il décrit la préparation des échantillons de cactus, les méthodes de caractérisation physico-chimique, les essais de coagulation-floculation, ainsi que les paramètres suivis pour évaluer l'efficacité de clarification. Le troisième chapitre est réservé à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Il permet de comparer les différentes formes de cactus étudiées, d'interpréter leur comportement en tant que biocoagulants et de discuter leur performance par rapport au sulfate d'aluminium. Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus, met en évidence les apports de ce travail et propose quelques perspectives pour de futures recherches.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.
- [2] Centers for Disease Control and Prevention, “How water treatment works,” CDC, 2024.
- [3] Environmental Protection Agency, *Water Treatment Manuals: Coagulation, Flocculation and Clarification*. Wexford, Ireland: EPA, 2002.
- [4] J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, and G. Tchobanoglous, *MWH’s Water Treatment: Principles and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [5] J. K. Edzwald, Ed., *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill/American Water Works Association, 2011.
- [6] J. Bratby, *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 3rd ed. London, U.K.: IWA Publishing, 2016.
- [7] J. Duan and J. Gregory, “Coagulation by hydrolysing metal salts,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 100–102, pp. 475–502, 2003.
- [8] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, “Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 159, no. 2, pp. 189–197, 2010.
- [9] J. K. Edzwald, “Coagulation in drinking water treatment: Particles, organics and coagulants,” *Water Science and Technology*, vol. 27, no. 11, pp. 21–35, 1993.
- [10] T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W. H. Lo, and S. Babel, “Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 118, no. 1–2, pp. 83–98, 2006.
- [11] S. W. Krasner, H. S. Weinberg, S. D. Richardson, S. J. Pastor, R. Chinn, M. J. Scrimanti, G. D. Onstad, and A. D. Thruston, “Occurrence of a new generation of disinfection byproducts,” *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 23, pp. 7175–7185, 2006.
- [12] P. R. Rout, T. C. Zhang, P. Bhunia, and R. Y. Surampalli, “Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review,” *Science of the Total Environment*, vol. 753, 2021.
- [13] C. Y. Yin, “Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment,” *Process Biochemistry*, vol. 45, no. 9, pp. 1437–1444, 2010.

Références bibliographiques

- [14] S. Y. Choy, K. M. N. Prasad, T. Y. Wu, M. E. Raghunandan, and R. N. Ramanan, “Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 26, no. 11, pp. 2178–2189, 2014
- [15] D. Frumento, M. De Michelis, and G. Olivieri, “Recent advances in the application of natural coagulants for water and wastewater treatment,” *ChemEngineering*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [16] S. M. Miller, E. J. Fugate, V. O. Craver, J. A. Smith, and J. B. Zimmerman, “Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment,” *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 4274–4279, 2008.
- [17] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, “Use of *Opuntia ficus-indica* fruit peel as a novel source of mucilage with potential application as a natural coagulant,” *Polymers*, vol. 14, no. 18, 2022.
- [18] O. Bouaouine, I. Bourven, F. Khalil, and M. Baudu, “Efficiency of a coagulation–flocculation process using *Opuntia ficus-indica* for the treatment of a textile effluent,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 240, pp. 137–143, 2021.
- [19] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, “Evaluation of turbidity and color removal in water treatment using *Opuntia ficus-indica* mucilage,” *Polymers*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [20] S. M. Wan, L. He, and J. Zhang, “Treatment train for tailings pond water using *Opuntia ficus-indica* mucilage as a natural coagulant,” *Separation and Purification Technology*, vol. 211, pp. 448–456, 2019.
- [21] S. Trindade, J. Rodrigues, and A. Gomes, “Evaluation of the potential of *Opuntia ficus-indica* cladodes as a natural flocculant,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1–8, 2021.
- [22] L. Cherif, A. Boudjemaa, and M. Benkaddour, “Turbidity removal from surface water using cactus *Opuntia*,” *Studies in Engineering and Exact Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 1–24, 2024.
- [23] A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah, and B. G. Talbot, “Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*,” *Water Research*, vol. 29, no. 2, pp. 703–710, 1995.

Références bibliographiques

- [24] T. Okuda, A. U. Baes, W. Nishijima, and M. Okada, “Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution,” *Water Research*, vol. 35, no. 2, pp. 405–410, 2001.
- [25] A. Benalia, M. Tiaiba, and A. Drouiche, “The effect of a cactus-based natural coagulant on the treatment of surface water,” *Water*, vol. 18, no. 2, 2026.

Chapitre I
Revue
Bibliographique

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. Introduction

L'eau qui est destinée à la consommation humaine doit satisfaire à des conditions très rigoureuses de qualité physique, chimique et microbiologique. Les eaux de surface (eaux des barrages, des rivières, des lacs et des oueds) sont une ressource importante pour la production d'eau potable, mais elles sont naturellement exposées à plusieurs sources de contamination. Elles peuvent contenir des matières en suspension, des particules colloïdales, des substances organiques naturelles, des microorganismes, des éléments nutritifs, des métaux et divers polluants provenant des activités humaines. La qualité de ces eaux varie en fonction des saisons, des précipitations, de l'érosion des sols, des rejets domestiques, agricoles et industriels, ce qui rend leur traitement indispensable avant toute utilisation humaine [1], [2]. L'Organisation mondiale de la santé souligne que la sécurité de l'eau potable repose sur une gestion globale du risque, de la ressource jusqu'au consommateur final [1].

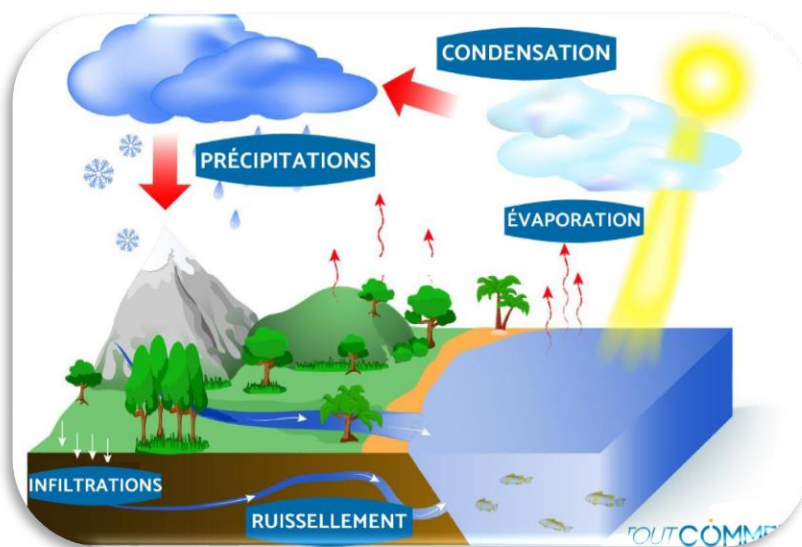


Figure I.1 : Schéma général du cycle de l'eau[1], [2]

Le traitement des eaux de surface repose généralement sur une succession d'opérations physico-chimiques et biologiques, dont le but est d'éliminer les impuretés et de produire une eau conforme aux normes de potabilité. Parmi celles-ci, la coagulation-floculation joue un rôle clé puisqu'elle permet d'éliminer une très forte proportion de la turbidité, des colloïdes et d'une fraction importante de la matière organique naturelle [3], [4]. La coagulation est couramment

faite au moyen de sels chimiques de coagulation, comme le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique ou les sels d'aluminium et de fer pré-hydrolysés [5], [6]. Cependant, l'utilisation de ces coagulants peut avoir quelques inconvénients, dont la formation de boues chimiques, la modification du pH, l'augmentation de la salinité et la possibilité de présence de résidus métalliques dans l'eau traitée [6], [7].

Dans ce cadre, l'usage de coagulants naturels, communément appelés biocoagulants, connaît un intérêt de plus en plus marqué. Ces substances, d'origine végétale, animale ou microbienne, sont en général renouvelables, biodégradables, disponibles à proximité et potentiellement moins nuisibles pour l'environnement [8], [9]. Parmi les différents biocoagulants végétaux étudiés, le cactus (en particulier le genre *Opuntia*) est d'un grand intérêt en raison de sa richesse en mucilage, qui se compose essentiellement de polysaccharides en particulier susceptibles de permettre l'adhésion des particules colloïdales [10], [11]. Des études multiples ont démontré que le cactus est capable de diminuer de façon efficace la turbidité des eaux, et de fonctionner comme un flocculant naturel par des mécanismes d'adsorption, de pontage interarticulaire et d'emprisonnement des particules [11], [12].

I.2. Présentation des eaux de surface

On entend par eaux de surface les eaux se trouvant naturellement à la surface de la terre comme les rivières, les lacs, les barrages, les retenues collinaires et les oueds. Elles sont directement soumises aux conditions atmosphériques et aux activités humaines, contrairement aux eaux souterraines. Leur composition dépend fortement du bassin versant, de la nature géologique des sols, du climat, du couvert végétal, des activités agricoles, urbaines et industrielles et des phénomènes hydrologiques tels que les crues et le ruissellement [2], [13].



Figure I.2 : Principales sources de pollution des eaux de surface[1], [3].

La turbidité est variable dans les eaux de surface. Cette turbidité résulte de la présence de particules minérales, de matières organiques, d'argiles, de limons, de microorganismes et de débris végétaux. C'est un indicateur de très bonne qualité d'eau, car une eau très turbide va servir de bouclier aux microorganismes vis à vis de l'action des désinfectants, et perturber les traitements qui s'ensuivent [1], [3]. Par ailleurs, les matières organiques naturelles contenues dans les eaux de surface peuvent réagir avec certains désinfectants, notamment le chlore, et entraîner la formation de sous-produits de désinfection potentiellement indésirables [14].

Les paramètres principaux suivis pour juger de la qualité d'une eau de surface sont la turbidité, le pH, la conductivité électrique, la température, l'oxygène dissous, la demande chimique en oxygène, la demande biologique en oxygène, les matières en suspension, la matière organique, les nitrates, les phosphates et la charge microbiologique. [1], [2]. Une eau de surface qui doit être rendue potable doit donc recevoir un traitement approprié à sa qualité initiale. Lorsque l'eau brute présente une turbidité élevée ou une concentration importante de colloïdes, la coagulation-floculation devient nécessaire [3], [4].

Tableau I.1 : Principaux types d'eaux naturelles[1], [2].

Type d'eau naturelle	Origine	Caractéristiques principales	Utilisation possible
Eaux de surface	Rivières, barrages, lacs, oueds	Qualité variable, présence de turbidité, matières en suspension, microorganismes et matière organique	Production d'eau potable après traitement
Eaux souterraines	Nappes phréatiques, sources	Généralement moins turbides, mais parfois riches en sels minéraux, fer, manganèse ou nitrates	Eau potable après désinfection ou traitement spécifique
Eaux pluviales	Précipitations atmosphériques	Faible minéralisation, mais risque de contamination lors du ruissellement	Irrigation, usage domestique après traitement
Eaux marines	Mers et océans	Forte salinité, présence importante d'ions dissous	Dessalement avant utilisation
Eaux usées traitées	Rejets domestiques ou industriels traités	Qualité dépendante du niveau de traitement	Irrigation, réutilisation industrielle, recharge de nappes

Tableau I.2 : Principaux paramètres de qualité des eaux de surface[1], [14].

Paramètre	Signification	Importance dans le traitement de l'eau
Turbidité	Présence de particules en suspension et colloïdes	Indicateur principal de la clarification
pH	Acidité ou basicité de l'eau	Influence l'efficacité de la coagulation-floculation
Conductivité	Quantité d'ions dissous	Renseigne sur la minéralisation de l'eau
Température	Degré thermique de l'eau	Influence la vitesse des réactions et la viscosité

Matières en suspension	Particules solides présentes dans l'eau	Participent à la turbidité
Matière organique	Substances naturelles ou polluantes carbonées	Peut former des sous-produits lors de la désinfection
DCO	Demande chimique en oxygène	Évalue la charge organique oxydable
DBO ₅	Demande biologique en oxygène sur 5 jours	Indique la pollution organique biodégradable
Nitrates	Formes oxydées de l'azote	Indicateur de pollution agricole ou domestique
Microorganismes	Bactéries, virus, parasites	Paramètre essentiel pour la sécurité sanitaire

I.3. Principales étapes du traitement des eaux d'alimentation

Le traitement habituel des eaux potables comporte en général plusieurs opérations complémentaires. Chaque étape a un rôle particulier dans l'amélioration de la qualité de l'eau et la protection de la santé publique.

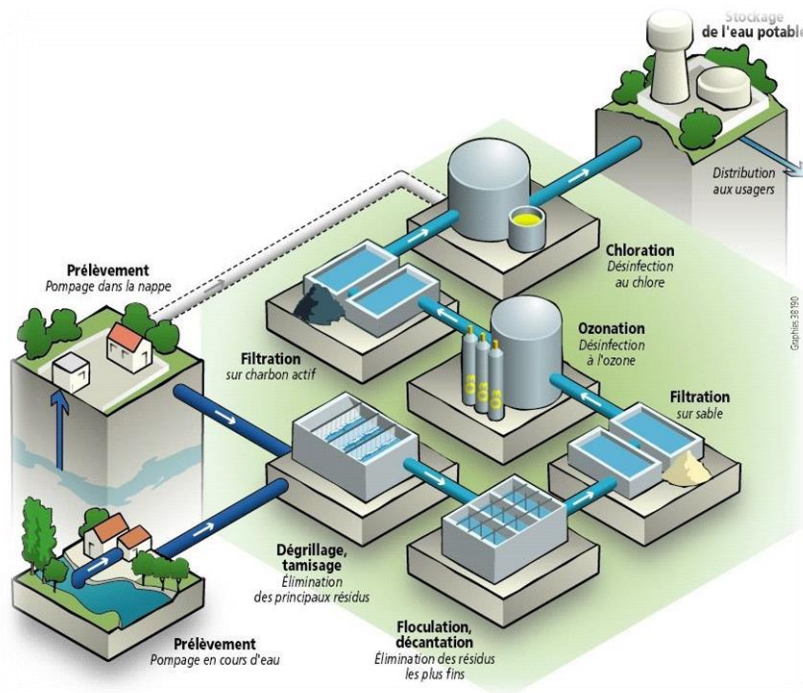


Figure I.3 : Chaîne conventionnelle de traitement des eaux potables[2], [3], [4].

I.3.1. Le prétraitement

Le prétraitement est la première étape de la chaîne de traitement. Son but est d'éliminer les éléments grossiers et de préparer l'eau brute pour les traitements suivants. Cela peut comprendre le dégrillage, le tamisage, le dessablage, l'aération, la pré-oxydation ou l'ajustement du pH[2],[3]. Le dégrillage a pour but d'éliminer les corps volumineux tels que feuilles, branches, plastiques ou déchets flottants. Le dessablage élimine les particules

minérales lourdes, et l'aération peut servir à éliminer certains gaz dissous ou à oxyder des composés réduits tels que le fer ou le manganèse [2].

Le chlore, l'ozone, le permanganate de potassium ou d'autres oxydants peuvent assurer la pré-oxydation. Elle aide à diminuer certaines odeurs, à oxyder les substances organiques ou minérales et à réduire le développement biologique. Elle doit cependant être maîtrisée pour éviter la formation excessive de sous-produits d'oxydation [14], [15].

Tableau I.3 : Étapes conventionnelles du traitement des eaux potables[2], [3], [4].

Étape	Objectif principal	Principe
Dégrillage	Éliminer les gros déchets	Passage de l'eau à travers des grilles
Tamissage	Retenir les particules grossières	Séparation mécanique
Pré-oxydation	Oxyder certains composés et réduire les odeurs	Ajout d'un oxydant
Coagulation	Déstabiliser les colloïdes	Ajout d'un coagulant
Floculation	Former des floccs volumineux	Agitation lente
Décantation	Séparer les floccs de l'eau	Dépôt gravitaire
Filtration	Retenir les particules restantes	Passage à travers un média filtrant
Désinfection	Éliminer les microorganismes pathogènes	Chlore, ozone ou UV

I.3.2. La coagulation

La coagulation constitue une étape physico-chimique indispensable au traitement des eaux de surface. Elle consiste à ajouter à l'eau brute un coagulant qui déstabilise les particules colloïdales naturellement stables en suspension [4], [5]. Elles possèdent souvent à leur surface une charge électrique négative qui provoque une répulsion mutuelle et empêche leur agglomération spontanée [5], [6].

L'ajout d'un coagulant permet de neutraliser ces charges, réduisant ainsi les forces de répulsion et favorisant le rapprochement des particules. On agite en général rapidement à ce stade, afin de bien disperser le coagulant dans tout le volume d'eau[3], [4]. Les paramètres ayant le plus d'influence sur la coagulation sont le type de coagulant, la dose appliquée, le pH, l'alcalinité, la température, la turbidité initiale et la nature de la matière organique présente [4], [5].

I.3.3. Floculation

La floculation suit immédiatement la coagulation. Elle consiste à faire subir à l'eau un lent brassage qui permet aux particules déstabilisées de se rencontrer et de donner naissance à des agrégats plus gros appelés floccs [4], [6]. La floculation nécessite un temps de contact plus long que la coagulation, qui est rapide. L'idée est de produire des floccs suffisamment gros, denses et résistants pour qu'ils puissent être éliminés par décantation ou filtration [3].

L'effet de la floculation dépend de la vitesse d'agitation, du temps de floculation, de la concentration en particules, de la nature du coagulant et de la présence éventuelle d'adjuvants de floculation [4], [6]. Si l'agitation est trop faible, les collisions entre particules sont limitées et si elle est trop forte, les floes formés peuvent se rompre.

I.3.4. La décantation

La décantation est une opération de séparation par gravité. Elle favorise le dépôt au fond du bassin des floes formés lors de la coagulation-floculation sous l'action de leur poids [2], [3]. L'eau clarifiée est ensuite récupérée en haut, tandis que les boues sont extraites en bas. La finesse de la décantation dépend de la dimension, de la densité et de la stabilité des floes. Une bonne coagulation-floculation améliore donc directement l'efficacité de la décantation.

I.3.5. La filtration

La filtration agit comme une barrière supplémentaire pour éliminer les particules résiduelles qui n'ont pas été retenues lors de la décantation. On l'effectue généralement sur sable, anthracite, charbon actif ou matériaux granulaires combinés [2], [13]. La filtration rend l'eau plus claire et participe aussi à la diminution de certains microorganismes. Dans les filières classiques, elle est indispensable pour obtenir une eau peu trouble avant désinfection.

I.3.6. La désinfection

La désinfection constitue la dernière étape du traitement. Elle a pour but d'éliminer les microorganismes pathogènes présents dans l'eau et de garantir une protection microbiologique jusqu'au réseau de distribution [1]. Les procédés les plus utilisés sont la chloration, l'ozonation, les rayons ultraviolets et quelquefois le bioxyde de chlore [1], [15]. Le chlore est encore très utilisé, car il a un effet rémanent qui permet de conserver une protection dans les canalisations. Il peut toutefois, en présence de matière organique naturelle, entraîner la formation de sous-produits de désinfection, tels que les trihalométhanes et les acides haloacétiques [14], [15].

I.4. Procédé de coagulation-floculation

La coagulation-floculation est l'un des procédés majeurs du traitement des eaux de surface. Elle élimine les particules colloïdales, les matières en suspension, une partie des microorganismes, certains métaux et une fraction de la matière organique naturelle [4], [5], [16]. Selon Matilainen et al. [16], la coagulation est l'un des procédés les plus courants et les plus économiques pour réduire la matière organique naturelle dans les filières de potabilisation, en particulier lorsqu'elle est hydrophobe et de masse molaire élevée.

Les colloïdes des eaux de surface ont généralement une taille comprise entre quelques nanomètres et quelques micromètres. Du fait de leur petit volume et de leur charge de surface, ils ne se déposent pas aisément. Leur stabilité dépend essentiellement des forces électrostatiques de répulsion et de l'hydratation de leur surface [5], [6]. La coagulation a donc pour but de rompre cette stabilité.

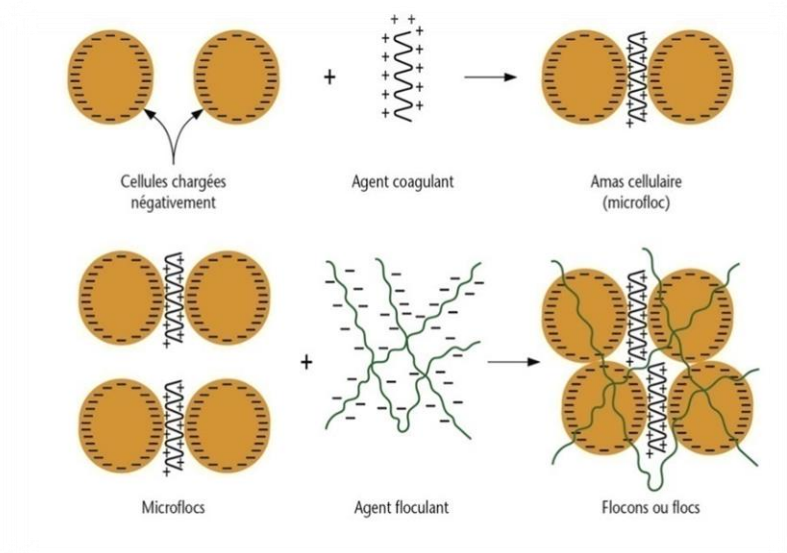


Figure I.4 : Principe de la coagulation-floculation[3], [4], [5].

La coagulation peut être expliquée par plusieurs mécanismes :

- La neutralisation des charges électriques ;
- La compression de la double couche ionique;
- L'adsorption des espèces coagulantes sur les particules ;
- Le pontage entre particules;
- Le piégeage des colloïdes dans des précipités volumineux, appelé aussi coagulation par balayage ou sweepflocculation [5], [6].

Pour les coagulants métalliques, par exemple les sels d'aluminium et de fer, l'efficacité dépend largement des réactions d'hydrolyse. Ces réactions donnent des espèces électriquement positives qui agissent sur les colloïdes négatifs. À certaines valeurs de pH, il se forme également des hydroxydes métalliques insolubles qui sont capables d'emprisonner les particules au moment de leur précipitation [5], [6].

La floculation permet la croissance des flocs par collisions successives. Ces collisions peuvent être dues au mouvement brownien, aux gradients de vitesse créés par l'agitation ou à la sédimentation différentielle des particules[4]. Dans les stations de traitement, on applique

généralement une agitation rapide lors de la coagulation, puis une agitation lente lors de la floculation, afin de favoriser la formation de floccs sans les rompre [3], [4].

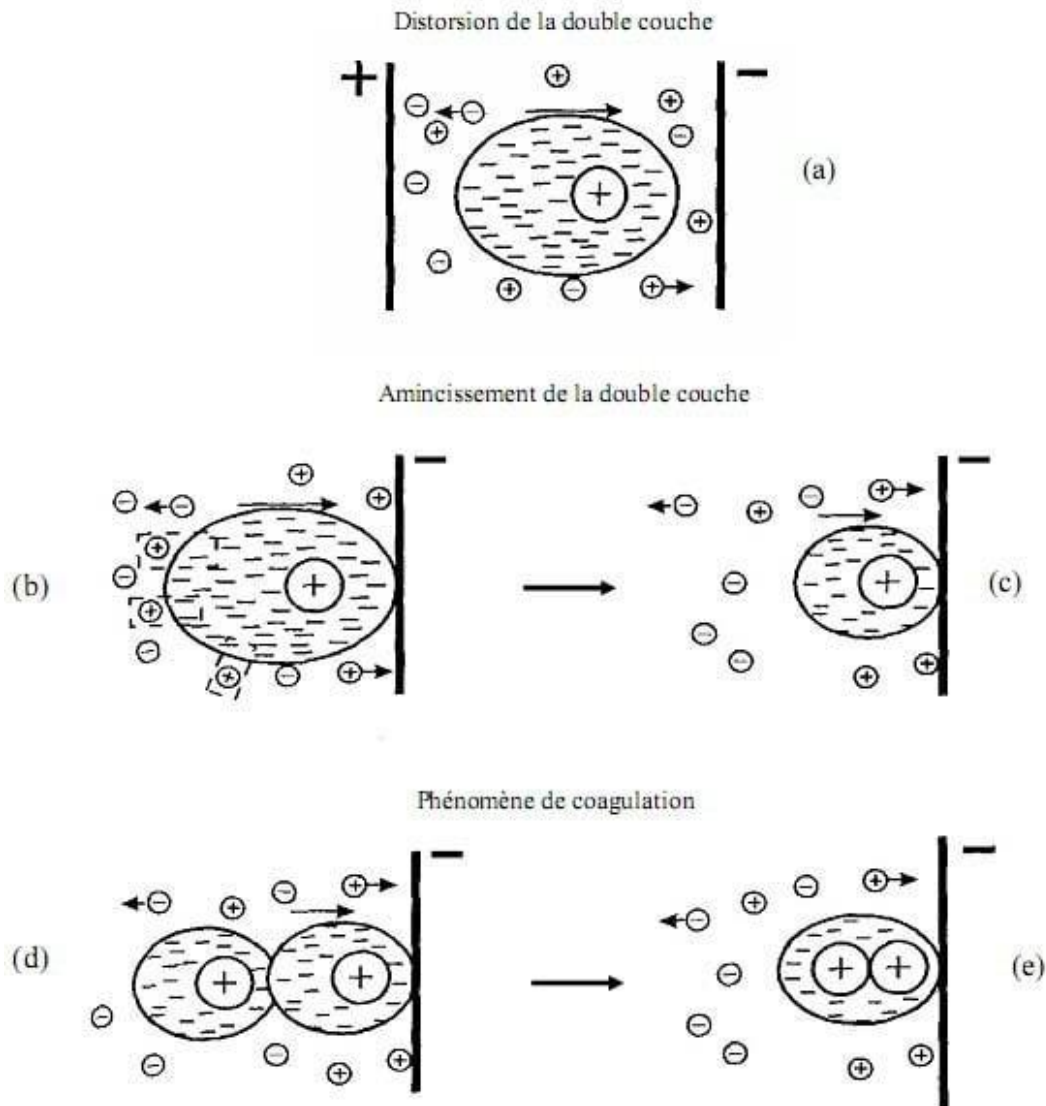


Figure I.5 : Déstabilisation des particules colloïdales lors de la coagulation[5], [6].

I.5. Les coagulants chimiques classiques

Le sulfate d'aluminium, le chlorure d'aluminium, le polychlorure d'aluminium, le chlorure ferrique et le sulfate ferrique sont les coagulants chimiques les plus utilisés dans le traitement des eaux potables [5], [6]. Le sulfate d'aluminium, communément appelé alun, est l'un des coagulants les plus utilisés, grâce à son faible coût et à son efficacité sur de nombreuses eaux de surface [5].

Le sulfate d'aluminium ajouté à l'eau libère des ions aluminium qui s'hydrolysent et donnent lieu à différentes espèces monomériques et polymériques. Ces espèces sont impliquées dans la

neutralisation des charges des particules et la formation d'hydroxydes d'aluminium qui sont à même de piéger les colloïdes [5], [6]. L'efficacité de l'alun dépend toutefois fortement du pH.

Une dose trop faible entraîne une mauvaise clarification et un excès de produit peut entraîner une re-stabilisation des particules ou une augmentation de l'aluminium résiduel [5], [7].

Les sels ferriques agissent de manière analogue. Ils sont souvent efficaces dans une gamme de pH plus large que les sels d'aluminium et peuvent éliminer efficacement certaines matières organiques [6], [16]. Ils peuvent toutefois colorer l'eau de façon résiduelle si le traitement n'est pas bien optimisé.

Tableau I.4 : Principaux coagulants chimiques utilisés dans le traitement des eaux[4], [5], [6]

Coagulant chimique	Formule chimique	Mode d'action principal	Remarques
Sulfate d'aluminium	$Al_2(SO_4)_3$	Hydrolyse, neutralisation des charges, formation d'hydroxydes d'aluminium	Très utilisé, efficace mais peut diminuer le pH
Chlorure ferrique	$FeCl_3$	Formation d'hydroxydes ferriques	Efficace sur une large gamme de pH
Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$	Neutralisation et balayage des particules	Peut colorer l'eau si mal dosé
Polychlorure d'aluminium	PAC	Espèces polymériques préhydrolysées	Bonne efficacité à faible dose
Chaux	$Ca(OH)_2$	Ajustement du pH et précipitation	Souvent utilisée en complément

Les coagulants chimiques sont efficaces, mais présentent plusieurs inconvénients. Elles peuvent ainsi augmenter la quantité de boues produites, modifier le pH de l'eau, accroître la concentration en sels dissous et nécessiter une gestion rigoureuse des résidus [7], [8]. En outre, la production, le transport et l'utilisation de ces réactifs chimiques peuvent être coûteux, en particulier pour les petites installations ou les régions rurales [8], [9]. Ces limites peuvent expliquer l'intérêt croissant pour les coagulants naturels.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients du sulfate d'aluminium[5], [6], [7]

Avantages	Inconvénients
Coagulant très disponible	Peut diminuer le pH de l'eau
Coût relativement faible	Production de boues chimiques
Bonne efficacité sur les eaux turbides	Risque d'aluminium résiduel
Facile à utiliser en station	Nécessite une dose optimale précise
Formation rapide de floccs	Peut augmenter la minéralisation de l'eau

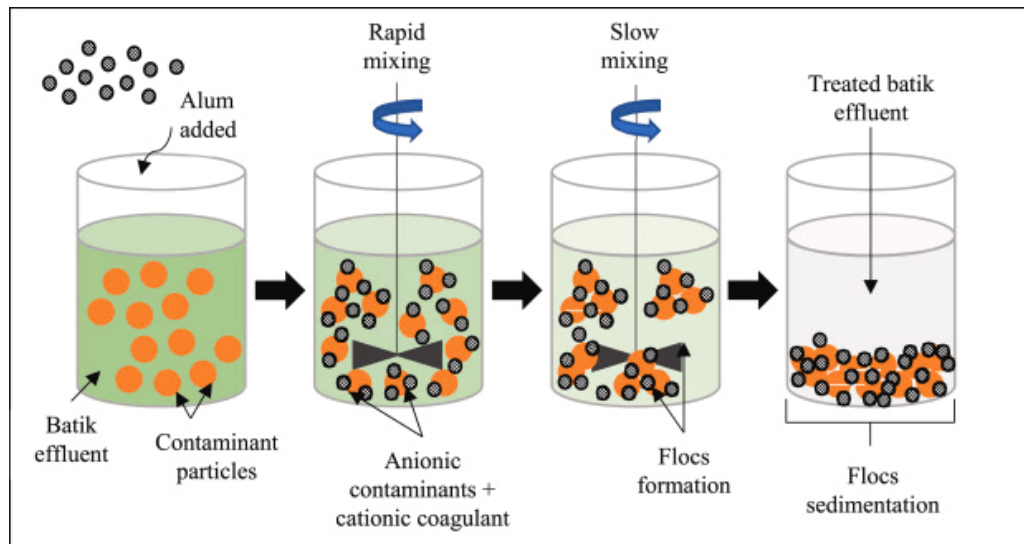


Figure I.6 : Formation et croissance des flocs pendant la floculation[4], [5].

I.6. Les biocoagulants naturels

Les biocoagulants sont des substances naturelles qui peuvent déstabiliser les particules colloïdales et favoriser leur agglomération. Ils sont obtenus à partir de graines, de feuilles, de fruits, de tiges, de gommes, de mucilages, de microorganismes ou de biopolymères naturels [8], [9], [17]. On s'intéresse particulièrement aux biocoagulants d'origine végétale en raison de leur disponibilité, de leur faible coût, de leur biodégradabilité et de leur compatibilité environnementale[8],[9]. Des études récentes sur les coagulants d'origine végétale montrent qu'ils ont la capacité de diminuer la turbidité, certaines matières organiques, les métaux et parfois une partie des microorganismes, mais leur efficacité varie selon l'origine végétale, la méthode d'extraction, le pH et la dose utilisée [8], [17].

Les biocoagulants les plus étudiés sont notamment les graines de *Moringa* *aloe vera*, les tanins, le chitosane, certaines gommes naturelles, les graines de légumineuses et le cactus [8], [18], [19]. Les protéines cationiques que renferment ses graines peuvent neutraliser les charges négatives des colloïdes et favoriser ainsi la coagulation [18]. Ndabigengesere _et al._ ont démontré que les constituants actifs de la *Moringa oleifera* sont principalement des protéines cationiques qui agissent par adsorption et neutralisation des charges [18].

Tableau I.6 : Exemples de biocoagulants naturels d'origine végétale[8], [9], [15].

Biocoagulant végétal	Partie utilisée	Composés actifs probables	Mode d'action
<i>Moringa oleifera</i>	Graines	Protéines cationiques	Neutralisation des charges
Cactus <i>Opuntia</i>	Cladodes, mucilage	Polysaccharides, pectines	Adsorption et pontage interparticulaire
Tanins végétaux	Écorces, bois, feuilles	Polyphénols	Complexation et floculation
Aloe vera	Gel	Polysaccharides	Pontage et adsorption
Graines de légumineuses	Graines	Protéines, polysaccharides	Déstabilisation des colloïdes
Gomme arabique	Exsudat végétal	Polysaccharides	Stabilisation ou floculation selon les conditions

Graine de Moringa**Figuier de Barbarie****Aloe vera****Fenugrec****Figure I.7** : Exemple de coagulants naturels d'origine végétale[8], [9].

Les biocoagulants peuvent avoir plusieurs modes d'action. Certains renferment des protéines à charge positive qui peuvent neutraliser les colloïdes négatifs. D'autres sont riches en polysaccharides et agissent surtout par adsorption et pontage interparticulaire [8], [10], [11]. Les polysaccharides comportent des groupements fonctionnels comme les hydroxyles, les carboxyles et parfois les amines, qui peuvent interagir avec les particules en suspension par des liaisons hydrogène, des interactions électrostatiques ou des forces de Van der Waals [10], [20].

Un des grands avantages des biocoagulants réside dans un caractère renouvelable et biodégradable. Il est possible de les produire localement à partir de ressources végétales disponibles, limitant ainsi la dépendance à l'égard des intrants chimiques importés [8], [9]. Mais leur emploi a aussi quelques limites. La composition de ces substances varie en fonction de l'espèce botanique, de la période de l'année, du degré de maturité de la plante, des

conditions de séchage et de la technique d'extraction [9], [17]. Par ailleurs, un surdosage peut entraîner une augmentation de la matière organique dans l'eau traitée, nécessitant ainsi une optimisation rigoureuse des conditions opératoires [16], [17].

I.7. Le cactus biocoagulant naturel

Le cactus (notamment *Opuntia ficus-indica*) est très présent dans les zones arides et semi-arides. Il est parfaitement adapté aux climats secs et a également une grande capacité de stockage en eau dans ses cladodes. L'Algérie, tout comme plusieurs autres pays riverains de la Méditerranée, est dotée d'une importante ressource naturelle à savoir le cactus, qui peut trouver des applications environnementales intéressantes notamment dans le traitement des eaux [11], [20], [21].



Figure I.8 : Cladodes de cactus *Opuntia ficus-indica*

C'est surtout la présence de mucilage qui rend le cactus intéressant comme biocoagulant. Suivant les espèces étudiées et les conditions d'extraction, le mucilage est une substance visqueuse riche en polysaccharides tels que : arabinose, galactose, rhamnose, xylose et acides uroniques [10], [11]. Ces pôles hydroxyles et carboxyles, très nombreux, interagissent avec les particules colloïdales en suspension dans l'eau [10], [20].

Tableau I.7 : Composition générale du mucilage de cactus[10], [11], [16]

Constituants du mucilage	Rôle probable dans la coagulation-floculation
Polysaccharides	Formation de ponts entre les particules colloïdales
Pectines	Adsorption sur les particules et formation de flocs
Acides uroniques	Interaction avec les colloïdes et les ions métalliques
Groupements hydroxyles O-H	Formation de liaisons hydrogène
Groupements carboxyles COO ⁻	Interaction électrostatique et complexation
Sucres neutres	Contribution à la viscosité et au réseau polymérique
Minéraux	Peuvent influencer la conductivité et les interactions ioniques

Miller et al. [11] ont étudié l'efficacité de différentes espèces d'*Opuntia* sur la clarification de l'eau, et ont montré une réduction importante de la turbidité de suspensions synthétiques due à ces plantes. Cette étude a aussi suggéré que le mode d'action du cactus est basé non pas seulement sur la neutralisation des charges, mais également sur des interactions entre les particules et les polysaccharides présents dans le mucilage [11].

Le cactus peut être utilisé sous diverses formes : poudre de cladodes séchés, jus frais, extrait aqueux, mucilage purifié ou encore extrait obtenu par traitement chimique [12], [20], [21]. La forme employée agit directement sur l'efficacité du traitement. La poudre de cactus renferme des fibres, des minéraux, des polysaccharides et divers autres composés organiques. Le jus ou le mucilage obtenu contient plus d'agents solubles qui peuvent rapidement interagir avec les particules en suspension [10], [12].

Des études multiples ont montré que le cactus peut agir comme un coagulant-floculant naturel dans le traitement des eaux turbides, des eaux usées ou des effluents industriels [12], [20], [22]. Trindade et coll. ont montré que les cladodes frais et les extraits de mucilage d'*Opuntia ficus-indica* présentent un intérêt certain pour la réduction de la turbidité [20]. Une étude récente menée sur des eaux de surface algériennes a aussi examiné l'utilisation du cactus *Opuntia* pour abaisser la turbidité d'une eau de barrage [21].

I.8. Mécanisme d'action du cactus dans la coagulation-floculation

On attribue généralement le mécanisme d'action du cactus à la structure macromoléculaire de son mucilage. Les polysaccharides du mucilage peuvent s'adsorber à la surface des particules colloïdales et créer des ponts entre plusieurs particules. On appelle ce mécanisme le pontage interparticulaire [10], [11]. Il permet de transformer de petites particules dispersées en floccs plus gros et plus facilement éliminables par décantation ou filtration.

Tout comme le sulfate d'aluminium qui agit surtout par hydrolyse, neutralisation des charges et formation d'hydroxydes métalliques, le cactus agit plus comme un polymère naturel [5], [6], [11]. Ses longues chaînes polysaccharidiques peuvent s'étendre dans l'eau et relier entre elles plusieurs particules. Les groupements hydroxyles et carboxyles du mucilage peuvent aussi interagir avec les surfaces minérales, les argiles et la matière organique [10], [20].

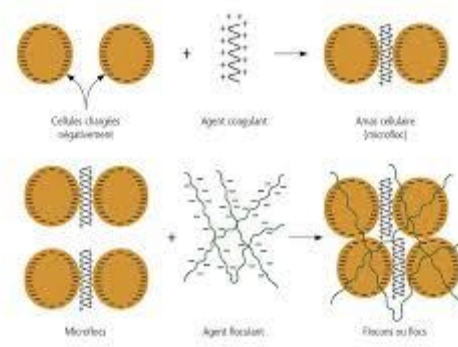


Figure I.9 : Mécanisme proposé du cactus comme biocoagulant naturel[10], [11], [12].

On peut résumer le mécanisme en quatre étapes principales :

- ❖ Répartition dans l'eau du mucilage ou des principes actifs du cactus ;
- ❖ Adsorption des macromolécules aux particules colloïdales ;
- ❖ Formation de ponts entre les particules déséquilibrées ;
- ❖ Les floccs grossissent et se séparent ensuite par décantation ou filtration.

L'effet du cactus est fonction de plusieurs facteurs, dont la dose utilisée, le pH de l'eau, la turbidité initiale, la taille des particules de poudre, le temps d'agitation rapide, le temps de floculation et le temps de décantation [11], [12], [21]. Une dose trop faible ne permet pas une désatubilisation suffisante des colloïdes, alors qu'une dose excessive peut entraîner une augmentation de la matière organique dissoute ou une restabilisation des particules [16], [17]. Il faut donc déterminer expérimentalement la dose optimale par des essais au Jar-test.

I.9. Comparaison du cactus avec les coagulants chimiques

Un aspect important pour évaluer son potentiel d'application est la comparaison du cactus avec les coagulants chimiques classiques, en particulier le sulfate d'aluminium. Le sulfate d'aluminium est très efficace en général pour diminuer la turbidité mais il peut changer le pH de l'eau, augmenter la quantité de boues chimiques et laisser des résidus métalliques si le traitement n'est pas bien contrôlé[5],[7].

En revanche, le cactus recèle de plusieurs atouts potentiels. Il est naturel, biodégradable, disponible à proximité et peut générer des boues plus organiques et potentiellement plus valorisables [8], [11], [21]. Certaines études montrent aussi que les coagulants à base de cactus ont peu d'impact sur le pH de l'eau traitée, ce qui peut diminuer le besoin d'ajustement chimique après traitement [12], [22].

Tableau I.8 : Comparaison entre coagulants chimiques et biocoagulants naturels[5], [8], [9], [13]

Critère	Coagulants chimiques	Biocoagulants naturels
Origine	Industrielle ou minérale	Végétale, animale ou microbienne
Exemple	Sulfate d'aluminium, chlorure ferrique	Cactus, moringa, tanins
Efficacité	Généralement élevée et rapide	Variable selon la source et la préparation
Effet sur le pH	Peut être important	Souvent plus modéré
Boues produites	Boues chimiques	Boues plus organiques
Biodégradabilité	Faible à modérée	Généralement élevée
Coût	Variable selon le produit et l'importation	Potentiellement faible si ressource locale
Limites	Résidus métalliques, boues chimiques	Variabilité, conservation, apport organique possible

Le cactus ne doit cependant pas être considéré comme un substitut total du sulfate d'aluminium dans toutes les conditions. Son efficacité est fortement liée à la qualité de l'eau brute et à la préparation du biocoagulant. Dans les eaux très polluées ou fortement chargées en matière organique complexe, le cactus peut s'utiliser accompagné d'une faible dose de floculant chimique dans le but d'atteindre un rendement de clarification maximal [9], [17]. Une telle approche hybride permettrait de diminuer la consommation de sels métalliques sans pour autant sacrifier l'efficacité du traitement.

I.10. Intérêt de l'étude du cactus pour le traitement des eaux de surface

Le cactus comme biocoagulant présente un intérêt scientifique, environnemental et économique. D'un point de vue scientifique, elle permet d'étudier l'influence des biopolymères naturels sur la déstabilisation des colloïdes et la production des floccs. Sur le plan environnemental, elle s'inscrit dans une démarche de réduction de l'utilisation des réactifs chimiques et de valorisation des ressources végétales locales [8], [9]. D'un point de vue économique, elle pourrait s'avérer une solution abordable pour les petites stations d'épuration, les zones rurales ou les territoires naturellement pourvus de cactus [11], [21].

Hier, l'étude du cactus comme biocoagulant pour la clarification des eaux de surface a permis d'évaluer différents types de cactus dans le cadre de ce mémoire, notamment la poudre de plusieurs diamètres et le jus de cactus. La granulométrie de la poudre peut affecter la surface de contact, la disponibilité des composés actifs et la vitesse d'interaction avec les particules colloïdales. Le jus provenant du cactus pourrait lui contenir une fraction de mucilage plus soluble, capable de réagir plus rapidement dans le processus de floculation.

L'analyse de ces différentes formes permet donc de mieux comprendre le rôle des caractéristiques physico-chimiques du cactus dans l'élimination de la turbidité. Elle permet

également de comparer son efficacité devant celle du sulfate d'aluminium, qui constitue le coagulant chimique de référence. Cette comparaison est importante pour savoir si le cactus peut servir d'alternative, totale ou partielle, aux coagulants classiques.

I.11. Conclusion

Le traitement des eaux de surface consiste en une série d'étapes complémentaires qui ont pour objectif d'éliminer les particules, la turbidité, la matière organique et les microorganismes. La coagulation-floculation est une étape importante dans cette séquence, car elle conditionne fortement l'efficacité de la décantation, de la filtration et de la désinfection. Les coagulants chimiques, notamment le sulfate d'aluminium et les sels ferriques, sont très utilisés pour leur efficacité, mais ils ont certaines limites liées à la production de boues, à la modification du pH et au risque de résidus métalliques.

Des biocoagulants naturels semblent être des alternatives prometteuses pour un traitement durable de l'eau. Le cactus contient beaucoup de mucilage et de polysaccharides et il a des propriétés coagulantes et floculantes qui aident à enlever les particules colloïdales. Son action résulte principalement de l'adsorption, du pontage interparticulaire et de la formation de floes. L'étude du cactus en tant que biocoagulant naturel pour la clarification des eaux de surface présente donc un intérêt particulier, notamment dans les régions où cette plante est abondante et facilement valorisable.

Références bibliographiques

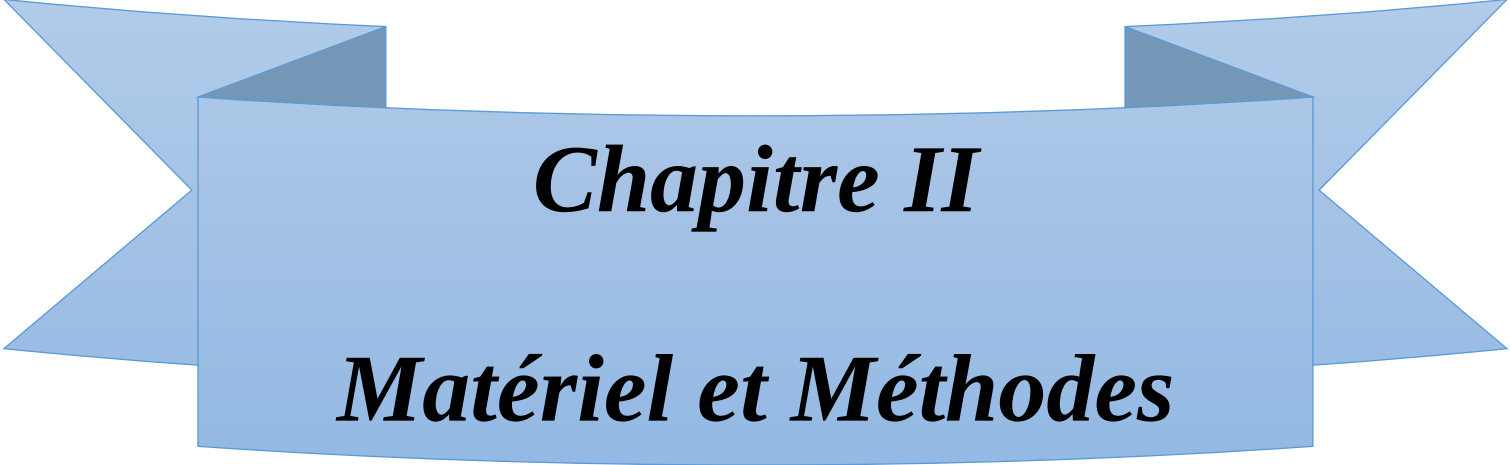
- [1] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.
- [2] J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, and G. Tchobanoglous, *MWH's Water Treatment: Principles and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [3] Environmental Protection Agency, *Water Treatment Manuals: Coagulation, Flocculation and Clarification*. Wexford, Ireland: EPA, 2002.
- [4] J. Bratby, *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 3rd ed. London, U.K.: IWA Publishing, 2016.
- [5] J. Duan and J. Gregory, "Coagulation by hydrolysing metal salts," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 100–102, pp. 475–502, 2003.
- [6] N. D. Tzoupanos and A. I. Zouboulis, "Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: The application of new generation of chemical reagents," *International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*, pp. 309–317, 2008.
- [7] J. K. Edzwald, "Coagulation in drinking water treatment: Particles, organics and coagulants," *Water Science and Technology*, vol. 27, no. 11, pp. 21–35, 1993.
- [8] C. Y. Yin, "Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment," *Process Biochemistry*, vol. 45, no. 9, pp. 1437–1444, 2010.
- [9] S. Y. Choy, K. M. N. Prasad, T. Y. Wu, M. E. Raghunandan, and R. N. Ramanan, "Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 26, no. 11, pp. 2178–2189, 2014.
- [10] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, "Evaluation of turbidity and color removal in water treatment using *Opuntia ficus-indica* mucilage," *Polymers*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [11] S. M. Miller, E. J. Fugate, V. O. Craver, J. A. Smith, and J. B. Zimmerman, "Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment," *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 4274–4279, 2008.

Références bibliographiques

- [12] S. Trindade, J. Rodrigues, and A. Gomes, “Evaluation of the potential of *Opuntia ficus-indica* cladodes as a natural flocculant,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1–8, 2021.
- [13] J. K. Edzwald, Ed., *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill/American Water Works Association, 2011.
- [14] S. W. Krasner, H. S. Weinberg, S. D. Richardson, S. J. Pastor, R. Chinn, M. J. Scilimenti, G. D. Onstad, and A. D. Thruston, “Occurrence of a new generation of disinfection byproducts,” *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 23, pp. 7175–7185, 2006.
- [15] U. von Gunten, “Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation,” *Water Research*, vol. 37, no. 7, pp. 1443–1467, 2003.
- [16] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, “Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 159, no. 2, pp. 189–197, 2010.
- [17] A. Lwasa, J. B. Kirabira, and S. Kasedde, “Performance analysis of plant-based coagulants in water treatment: A review,” *Discover Water*, vol. 4, 2024.
- [18] A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah, and B. G. Talbot, “Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*,” *Water Research*, vol. 29, no. 2, pp. 703–710, 1995.
- [19] T. Okuda, A. U. Baes, W. Nishijima, and M. Okada, “Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution,” *Water Research*, vol. 35, no. 2, pp. 405–410, 2001.
- [20] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, “Use of *Opuntia ficus-indica* fruit peel as a novel source of mucilage with potential application as a natural coagulant,” *Polymers*, vol. 14, no. 18, 2022.
- [21] L. Cherif, A. Boudjemaa, and M. Benkaddour, “Turbidity removal from surface water using cactus *Opuntia*,” *Studies in Engineering and Exact Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 1–24, 2024.
- [22] S. Arris, A. Bencheikh-Lehocine, and A. H. Meniai, “Removal of turbidity and chemical oxygen demand using cactus mucilage as a biocoagulant/bioflocculant,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 213, pp. 342–351, 2021.

Références bibliographiques

- [23] B. Bolto and J. Gregory, “Organic polyelectrolytes in water treatment,” *Water Research*, vol. 41, no. 11, pp. 2301–2324, 2007.
- [24] U. Gassenschmidt, K. D. Jany, T. Bernhard, and H. Niebergall, “Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam.,” *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1243, no. 3, pp. 477–481, 1995.
- [25] A. Benalia, M. Tiaiba, A. Drouiche, and N. Mameri, “The effect of a cactus-based natural coagulant on the treatment of surface water,” *Water*, vol. 18, no. 2, 2026



Chapitre II

Matériel et Méthodes

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction

Ce chapitre comporte le matériel et les méthodes employés pour tester l'efficacité du cactus comme biocoagulant naturel à la clarification des eaux de surface. Cette partie expérimentale a pour but principal de préparer différents échantillons de cactus, de les caractériser par des méthodes physico-chimiques et spectroscopiques et enfin, tester leur performance dans le procédé de coagulation-floculation.

Les essais effectués permettent de comparer l'action de différentes formes du cactus, à savoir, la poudre de cactus de différentes granulométries et le jus de cactus, sur la diminution de la turbidité des eaux de surface. La caractérisation par infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est utilisée pour analyser la présence des principaux groupements fonctionnels dans les échantillons de cactus, notamment les fonctions hydroxyles, carboxyles et carbonyles liées aux polysaccharides, pectines et mucilages [1], [2]. Ces groupements sont impliqués dans des mécanismes d'adsorption, de pontage interparticulaire et dans la formation des floccs [3], [4]. Les essais de coagulation-floculation se sont effectués suivant le principe du Jar-test, très utilisé pour définir la dose optimale de coagulant et les meilleures conditions opératoires de clarification [5], [6]. L'efficacité du traitement est avant tout évaluée par la mesure de la turbidité résiduelle, du pH, de la conductivité électrique et du rendement d'abattement de la turbidité.

La coagulation-floculation est toujours une étape essentielle pour le traitement des eaux de surface, permettant d'éliminer les particules colloïdales à l'origine de la turbidité et d'augmenter l'efficacité des étapes de décantation, filtration et désinfection ultérieures [5], [7]. Des études antérieures ont montré que les espèces du genre *Opuntia* présentent des propriétés coagulantes intéressantes pour le traitement des eaux turbides, dues à leur richesse en mucilages polysaccharidiques [3], [8]. C'est pourquoi l'approche de ce mémoire est celle d'une valorisation d'une ressource végétale naturelle, locale et biodégradable comme une alternative ou un complément aux coagulants chimiques de synthèse usuels, dont l'évaluation s'appuie sur l'étude expérimentale. En effet, une forte capacité à réduire la turbidité des eaux synthétiques a pu être mise en évidence par l'étude de Miller et al. chez les espèces d'*Opuntia*, renforçant ainsi leur intérêt en tant que soluble au sein des traitements des eaux.

II.2. Plante et matériel utilisé

II.2.1. Sélection du cactus

Le matériel végétal étudié dans ce travail est constitué de cladodes de cactus du genre *Opuntia*, communément appelé figuier de Barbarie. Ce choix s'explique par l'abondance de cette plante dans les zones arides et semi-arides, sa disponibilité locale, son faible coût et sa richesse en mucilage [3], [8]. Le suc du cactus est un mucus visqueux qui contient surtout des polysaccharides, des pectines, des sucres neutres et des acides uroniques [1], [2]. Ces composés ont des fonctions qui peuvent réagir avec les particules colloïdales de l'eau.

On choisit des cladodes de cactus en bon état, exempts de pourriture, de contamination visible ou de détérioration. Pour obtenir un produit végétal assez homogène, on élimine les raquettes trop jeunes ou trop lignifiées. Une fois récoltés, les cladodes sont transportés au laboratoire dans des sacs propres et traités rapidement afin d'éviter les altérations enzymatiques ou microbiologiques pouvant affecter leur composition.



Figure II.1 : Cactus utilisé comme matière végétale

Tableau II.1 : Matériel végétal utilisé dans l'étude

Élément	Description
Plante utilisée	Cactus / figuier de Barbarie
Genre	<i>Opuntia</i>
Partie utilisée	Cladodes / raquettes
État du végétal	Frais, sain, sans altération visible
Formes préparées	Poudre de cactus et jus de cactus
Objectif d'utilisation	Biocoagulant naturel pour la clarification des eaux de surface

II.2.2. Nettoyage du cactus

On lave tout d'abord les cladodes abondamment à l'eau du robinet pour éliminer poussières, particules de sol et impuretés de surface. Elles sont ensuite lavées à l'eau distillée afin d'éviter tout risque de contamination par des ions ou par des corps étrangers. Les épines et autres parties extérieures altérées sont enlevées à la main avec un couteau propre. Cette étape est importante car les impuretés présentes à la surface du végétal peuvent influencer sur les résultats des analyses physico-chimiques et des essais de coagulation-floculation [9].

Une fois lavées, les cladodes sont coupées en petits morceaux pour faciliter le séchage, le broyage ou l'extraction du jus. On prépare deux formes principales de cactus, la poudre et le jus, en fonction de l'objectif expérimental.



Figure II.2 : Lavage et découpage des cladodes de cactus

II.3. Préparation des échantillons de cactus**II.3.1. Préparation d'une poudre de cactus**

On étale en couche mince, sur des plateaux propres, les morceaux de cladodes qui doivent servir à la préparation de la poudre. Le séchage peut s'effectuer à l'air libre, à l'abri de la poussière et de la lumière directe, ou dans une étuve à température modérée. On recommande généralement une température comprise entre 40 et 60 °C pour éliminer l'eau tout en limitant

la dégradation thermique des composés organiques, notamment les polysaccharides et les composés pectiques [10], [11].



Figure II.3 : Séchage des cladodes de cactus

Une fois séchés complètement, les morceaux secs sont réduits en poudre fine à l'aide d'un broyeur électrique. La poudre ainsi obtenue est ensuite tamisée pour obtenir différentes fractions granulométriques. La granulométrie est un paramètre important car elle influence la surface spécifique, la vitesse de dispersion dans l'eau et la libération des composés actifs [12]. Une poudre plus fine peut offrir une surface de contact plus importante avec les particules colloïdales et ainsi améliorer l'efficacité de la coagulation-floculation. Toutefois, une poudre trop fine peut également rester en suspension et contribuer à la turbidité résiduelle si la décantation est incomplète.

Les divers types de poudre sont gardés dans des flacons en verre ou en plastique, hermétiques, propres, secs et étiquetés. Pour éviter que les échantillons n'absorbent de l'eau et que leurs composés organiques ne soient altérés, ils sont conservés à l'abri de l'humidité et de la lumière.



Figure II.4 : Broyage des cladodes séchées



Figure II.5 : Tamisage de la poudre de cactus

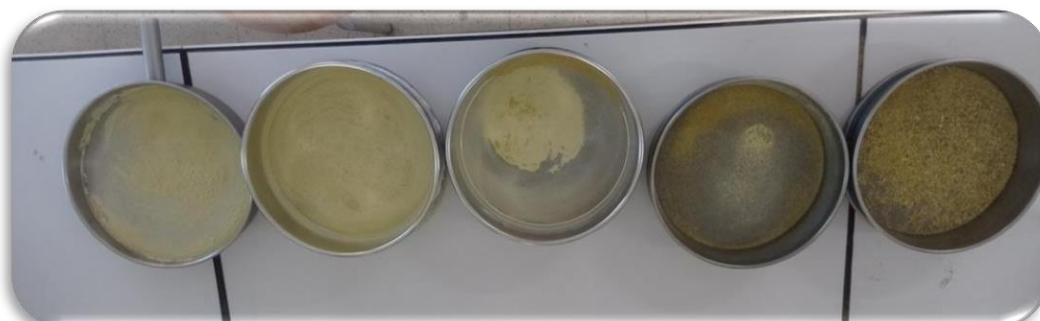


Figure II.6 : Différentes granulométries de poudre de cactus obtenues

I.3.2. Préparation du jus de cactus

Le jus de cactus est fait à partir de cladodes frais lavés, épines enlevées, coupés en petits morceaux. Ces morceaux sont réduits en une pâte homogène à l'aide d'un mixeur propre. La pâte ainsi obtenue est ensuite passée au travers d'une gaze, d'un tissu propre ou d'un papier filtre, pour séparer la partie liquide des fibres grossières.



Figure II.7 : Préparation du jus de cactus

Le jus recueilli sert à faire un biocoagulant liquide. Il convient de l'utiliser rapidement après sa préparation, car il s'agit d'un extrait riche en eau et en matières organiques, donc susceptible d'évolution par oxydation ou activité microbienne [13]. Si vous souhaitez conserver le jus temporairement, vous pouvez le mettre dans une bouteille propre et fermée, puis le garder au réfrigérateur à environ 4 °C pour une courte période. Avant emploi, il est ramené à la température ambiante et homogénéisé.

Le jus de cactus renferme une proportion soluble du mucilage ce qui peut permettre une dispersion plus rapide dans l'eau brute. Par rapport à la poudre, il peut avoir une action plus immédiate dans le procédé de coagulation-floculation, mais sa composition peut être plus sensible aux conditions de conservation [1], [3].

II.4. Eau de surface utilisée

L'eau utilisée pour les essais de clarification est une eau de surface, prélevée à partir d'une source naturelle (barrage, rivière, lac ou oued). Le prélèvement s'effectue dans des flacons propres préalablement rincés avec l'eau à analyser. Les échantillons d'eau sont ensuite acheminés vers le laboratoire pour y être analysés le plus rapidement possible, afin de limiter l'évolution de leurs caractéristiques physico-chimiques. [9], [14].

Avant les essais de coagulation-floculation, l'eau brute fait l'objet de la mesure de plusieurs paramètres, notamment :

- La turbidité initiale ;
- Le pH ;
- La conductivité électrique ;
- La température ;
- Eventuellement les matières en suspension, la matière organique ou l'absorbance UV à 254 nm, selon les moyens disponibles au laboratoire.

Dans cette étude, la turbidité est un paramètre essentiel puisqu'elle est le principal indicateur de l'efficacité de clarification. On l'exprime en général en NTU, c'est-à-dire en unités néphélométriques de turbidité. Une turbidité élevée est susceptible de réduire l'efficacité de la désinfection et de protéger les microorganismes contre l'action des désinfectants, selon l'Organisation mondiale de la santé [15]. La diminution de la turbidité est donc un objectif important dans le traitement des eaux de surface.

II.5. Produits chimiques et réactifs employés

Les produits chimiques utilisés dans cette étude peuvent inclure :

- Eau distillée ;
- Sulfate d'aluminium, utilisé comme coagulant chimique de référence ;
- Acide chlorhydrique ou acide sulfurique dilué pour ajuster le pH ;
- Hydroxyde de sodium dilué pour ajuster le pH ;
- Eventuellement des solutions tampons pour étalonner le pH-mètre.

Le sulfate d'aluminium est choisi comme coagulant de référence puisqu'il s'agit d'un des coagulants chimiques les plus utilisés dans le traitement conventionnel des eaux potables [5], [7]. En le comparant au cactus, on peut estimer le potentiel de ce dernier comme alternative naturelle ou comme adjuvant de coagulation.

Tous les réactifs doivent être de qualité analytique dans la mesure du possible. Les solutions sont faites avec de l'eau distillée et gardées dans des flacons propres et étiquetés.

II.6. Matériel employé

Le matériel et les appareils utilisés pour les différentes analyses :

- Balance analytique pour peser les échantillons ;
- Broyeur électrique pour la préparation de la poudre ;

- Tamiseuse ou tamis de différentes mailles pour la séparation granulométrique ;
- Etuve à sécher les cladodes ;
- pH-mètre pour mesurer le pH ;
- Conductimètre pour mesurer la conductivité électrique ;
- Turbidimètre pour mesurer la turbidité ;
- Spectrophotomètre à transformée de Fourier pour la caractérisation infrarouge ;
- Appareil de Jar-test pour les essais de coagulation-floculation ;
- Verrerie de laboratoire : béchers, éprouvettes, pipettes, fioles jaugées, entonnoirs et flacons.

Les appareils de mesure sont étalonnés avant utilisation selon les recommandations du fabricant et les méthodes d'analyses de l'eau en vigueur [9], [14]. Le pH-mètre est étalonné à l'aide de solutions tampons, généralement de pH 4,7 et 10. Le turbidimètre est calibré avec des étalons de turbidité appropriés.

II.7. Caractérisation physico-chimique du cactus

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute ont été déterminées avant les essais de coagulation-floculation afin d'évaluer la qualité initiale de l'eau à traiter. La turbidité initiale constitue le paramètre le plus important dans cette étude, car elle traduit la présence de particules colloïdales et de matières en suspension responsables de l'aspect trouble de l'eau. Le pH, la température, la conductivité électrique et le TDS sont également des paramètres essentiels, puisqu'ils renseignent sur la composition globale de l'eau et peuvent influencer l'efficacité du coagulant naturel à base de cactus ainsi que la formation des floes.

Le TDS, ou solides dissous totaux, représente la quantité totale de substances dissoutes dans l'eau, principalement les sels minéraux, les ions et certaines matières organiques solubles. Sa mesure permet de compléter celle de la conductivité électrique, car une eau présentant une forte conductivité possède généralement une teneur élevée en solides dissous. Dans le cadre du traitement par coagulation-floculation, le suivi du TDS permet de vérifier si l'ajout du coagulant modifie sensiblement la charge dissoute de l'eau.

II.7.1. Détermination du pH des extraits de cactus

La mesure du pH des extraits de cactus au moyen d'un pH-mètre préalablement étalonné. Une suspension aqueuse de la poudre a été préparée en dispersant une masse connue de celle-ci dans un volume défini d'eau distillée. Le pH est mesuré après agitation et repos dans la phase liquide. Pour le jus de cactus, on effectue la mesure du pH immédiatement après homogénéisation.

Le pH est un paramètre important car il influence la charge des particules colloïdales, l'état d'ionisation des groupements fonctionnels du mucilage et l'efficacité de la coagulation-floculation [5], [9], [14], [16].

II.7.2. Mesurage de la conductivité électrique

La conductivité électrique des extraits ou suspensions de cactus est déterminée par un conductimètre. Elle indique s'il y a des ions dissous dans le milieu. Une forte conductivité peut traduire une libération importante de sels minéraux par le cactus. Ce paramètre est également suivi dans l'eau traitée afin d'évaluer l'impact du biocoagulant sur la minéralisation de l'eau [9].

II.7.3. Caractérisation de la granulométrie de la poudre

On broie le cactus en une poudre qu'on sépare ensuite, au moyen de tamis dont les mailles sont connues, en différentes fractions. On récupère chaque fraction, on la pèse et on la conserve séparément. La granulométrie est un facteur susceptible d'influencer l'efficacité de la clarification. Les particules fines, ayant une plus grande surface spécifique, libèrent plus aisément les composés actifs, tandis que les particules grossières ont une action plus lente [12], [17].

Dans cette étude, chaque fraction granulométrique est testée individuellement lors des essais au Jar-test afin de préciser l'influence du diamètre des particules sur le rendement d'élimination de la turbidité.

II.8. Caractérisation par spectroscopie infrarouge (FTIR)**II.8.1. Principe de la spectrométrie FTIR**

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est une méthode analytique qui permet d'identifier les groupements fonctionnels contenus dans un échantillon. Elle est basée sur l'absorption par les liaisons chimiques du rayonnement infrarouge. Chaque type de liaison

absorbe dans une région spécifique du spectre, permettant ainsi d'obtenir une « empreinte » caractéristique de la composition chimique de l'échantillon [18], [19].

Pour le cactus, l'IRTF permet de mettre en évidence les groupements caractéristiques des polysaccharides et des mucilages : les groupements hydroxyles, les groupements carboxyles, les liaisons C–O–C, les fonctions carbonyles [1], [2]. Ces fonctions chimiques sont importantes dans le processus de coagulation-floculation puisqu'elles peuvent interagir avec les particules colloïdales par adsorption, liaisons hydrogène, interactions électrostatiques ou pontage interparticulaire [3], [4].

II.8.2. Préparation des échantillons pour l'analyse par FTIR

Les échantillons solides, tels que les poudres de cactus, sont d'abord séchés pour éliminer l'humidité qui pourrait perturber les bandes d'absorption, notamment dans la région des groupements hydroxyles. Si le spectrophotomètre FTIR est équipé de l'option correspondant, on dépose une petite quantité de poudre directement sur le dispositif ATR. Si l'analyse se fait par pastille, l'échantillon peut être mélangé avec du bromure de potassium sec, puis comprimé en pastille transparente [18].

On peut sécher à température modérée une petite quantité de jus de cactus pour obtenir un résidu solide analysable. Il est également possible d'analyser directement le jus quand l'appareil et l'accessoire utilisé le permettent, mais la forte teneur en eau peut masquer certaines bandes d'absorption [19].

II.8.3. Conditions de l'analyse FTIR

Les spectres FTIR sont généralement mesurés entre 4000 et 400 cm^{-1} , avec une résolution de 4 cm^{-1} . Chaque spectre résulte de l'accumulation de plusieurs balayages, permettant ainsi d'augmenter le rapport signal/bruit. Avant chaque analyse, on enregistre un spectre de fond afin de corriger les interférences dues à l'air, à l'humidité ou au support d'analyse [2]-[4], [12], [18].



Figure II.8 : Spectrophotomètre FTIR utilisé pour la caractérisation des échantillons (FTIR Q-ATR.S)

L'analyse FTIR a été réalisée afin d'identifier les principaux groupements fonctionnels présents dans les échantillons de cactus utilisés comme coagulants naturels. Les échantillons solides ont été préalablement séchés puis broyés finement afin d'obtenir une poudre homogène. Les spectres ont été enregistrés dans le domaine spectral compris entre 4000 et 400 cm^{-1} , avec une résolution de 4 cm^{-1} . Avant chaque analyse, une correction de fond a été effectuée afin de limiter l'influence de l'humidité et du dioxyde de carbone atmosphérique.

L'interprétation des spectres FTIR permet de mettre en évidence les groupements caractéristiques du mucilage de cactus, notamment les fonctions hydroxyles -OH , les liaisons C-H aliphatiques, les groupements carbonyles C=O , les fonctions carboxylates COO^- ainsi que les vibrations C-O et C-O-C associées aux polysaccharides. Ces groupements peuvent participer au mécanisme de coagulation-floculation par adsorption, pontage interparticulaire et neutralisation partielle des charges des particules colloïdales présentes dans l'eau brute.

II.9. Tests de coagulation-floculation au Jar-test

II.9.1. Principe du Jar-test

Le Jar-test est une méthode expérimentale qui permet de reproduire au laboratoire les opérations de coagulation, floculation et décantation qui sont réalisées dans les stations de traitement des eaux [5], [6]. Il permet de déterminer la dose optimale de coagulant, le temps d'agitation rapide, le temps d'agitation lente, le pH optimal et le temps de décantation.

Cette étude réalise les essais de Jar-test pour évaluer l'efficacité des différentes formes de cactus dans la réduction de la turbidité des eaux de surface. On peut comparer les performances du cactus à celles du sulfate d'aluminium utilisé comme coagulant chimique de référence.

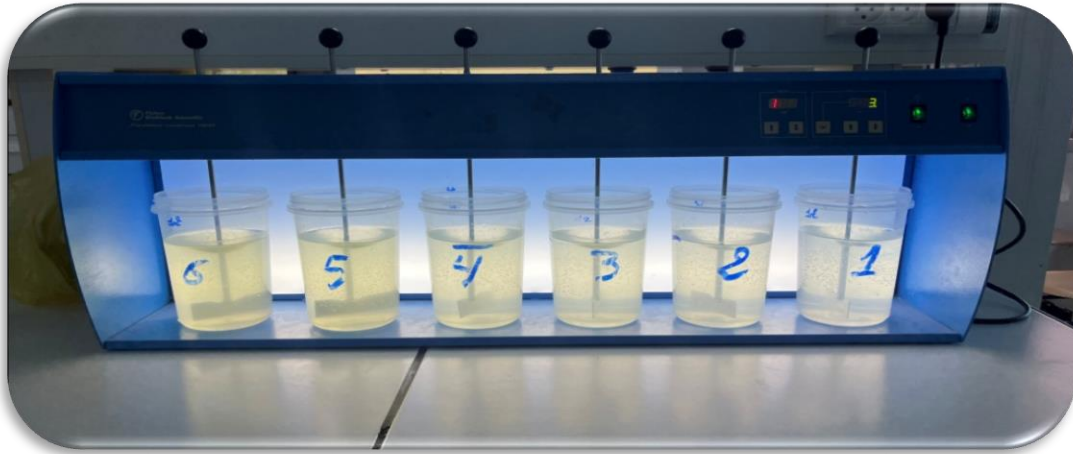


Figure II.9 : Appareil de Jar-test utilisé pour les essais de coagulation-floculation

II.9.2. Procédé général

On met dans chaque bécnet de l'appareil Jar-test une quantité déterminée d'eau brute, par exemple 500 ml ou 1 l. Des doses croissantes de biocoagulant de cactus sont ensuite ajoutées dans les différents bécnet. Pour chaque type d'échantillon — poudre fine, poudre moyenne, poudre grossière et jus de cactus —, des essais distincts sont menés.

Le protocole général comporte trois étapes principales :

- 1) Agitation rapide : Elle est réalisée immédiatement après rajout du coagulant, généralement à haute vitesse pendant une courte durée. Cette phase est celle où le coagulant se divise de manière homogène dans l'eau et a des chances de se lier avec les particules colloïdales [5], [6].
- 2) Agitation lente : elle suit l'agitation rapide et permet la formation progressive des floes. La vitesse doit être suffisante pour provoquer les collisions entre particules [5] mais suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas rupture des floes.
- 3) Décantation : après avoir arrêté l'agitation, on laisse reposer les bécnet pendant un temps déterminé. Les floes formés se déposent au fond du bécnet,

et l'eau clarifiée est prélevée avec précaution en partie supérieure pour les analyses.

Le protocole adopté est:

Étape	Condition opératoire proposée
Volume d'eau brute	1 L
Agitation rapide	200 tr/min pendant 3 min
Agitation lente	30 tr/min pendant 15min
Décantation	30 min
Paramètre principal suivi	Turbidité résiduelle

Ces conditions peuvent être modifiées en fonction de la qualité de l'eau brute, du matériel disponible et des objectifs de l'étude.

II.9.3. Préparation des doses de biocoagulant

Pour la poudre de cactus, on pèse des masses précises à l'aide d'une balance analytique puis on les ajoute directement dans les béchers ou bien on les disperse préalablement dans un petit volume d'eau distillée. Les doses peuvent être données en mg/L ou en g/L.

Pour le jus de cactus, on prélève des volumes précis au moyen d'une pipette graduée ou d'une micropipette et on les ajoute aux béchers. Les doses peuvent être exprimées en millilitres par litre (ml/L). Le jus de cactus est remué avant chaque prélèvement pour en assurer l'homogénéité.

En faisant varier les doses, on détermine la dose optimale, celle qui correspond à la plus faible turbidité résiduelle ou au meilleur rendement d'élimination. Une dose trop faible n'assure pas une bonne déstabilisation des colloïdes et une dose trop forte peut entraîner une restabilisation des particules ou une augmentation de la matière organique résiduelle [16], [20].

II.9.4. Tests du sulfate d'aluminium

Des essais parallèles sont effectués avec le sulfate d'aluminium afin de comparer les performances du biocoagulant naturel avec celles d'un coagulant chimique classique. On prépare une solution mère de sulfate d'aluminium à une concentration connue. Des volumes croissants de cette solution sont ajoutés aux béchers contenant l'eau brute.

Le mode opératoire d'agitation et de décantation est le même que celui employé pour le cactus afin de permettre une comparaison fiable. On suit la turbidité résiduelle, le pH et la conductivité électrique. Cette comparaison permet de juger si, dans certaines conditions de traitement, le cactus peut remplacer totalement ou partiellement le sulfate d'aluminium.

Différentes doses de sulfate d'aluminium ont été testées afin de déterminer la dose optimale permettant d'obtenir la meilleure clarification de l'eau brute. Les essais ont été réalisés en variant progressivement la concentration du coagulant, tout en maintenant constantes les autres conditions opératoires du Jar-test, notamment le volume d'eau traité, la vitesse d'agitation rapide, la vitesse d'agitation lente et le temps de décantation. Le témoin, sans ajout de sulfate d'aluminium, a permis de comparer l'évolution naturelle de la turbidité avec les échantillons traités. Après décantation, la turbidité finale a été mesurée et le rendement d'élimination de la turbidité a été calculé afin d'identifier la dose la plus efficace.

II.10. Mesures et testes après traitement

II.10.1. Mesure de la turbidité résiduelle

Après décantation, on prélève avec précaution, à environ 2 cm sous la surface, un volume d'eau clarifiée, pour éviter d'aspirer les floes déposés ou flottants. On mesure la turbidité résiduelle au moyen d'un turbidimètre étalonné. Les résultats sont donnés en NTU.

Le taux d'élimination de la turbidité est calculé à partir de la relation suivante :

$$R(\%) = \frac{T_0 - T_f}{T_0} \times 100$$

T_0 : turbidité initiale de l'eau brute, exprimée en NTU.

T_f : turbidité finale après traitement, exprimée en NTU.

$R(\%)$: rendement d'élimination de la turbidité.

Grâce à ce rendement, on peut effectuer une comparaison objective entre les doses, entre les formes de cactus et entre le sulfate d'aluminium.



Figure II.10 : Turbidimètre utilisé pour la mesure de la turbidité

II.10.2. Mesure du pH après traitement

On mesure le pH de l'eau traitée après décantation. Ce paramètre est important, car un bon coagulant ne doit pas modifier excessivement le pH de l'eau. Les coagulants chimiques, comme le sulfate d'alumine, peuvent entraîner une baisse du pH à la suite des réactions d'hydrolyse [5], [7]. Les biocoagulants naturels, par contre, ont un effet sur le pH plus modéré, ce qui est un avantage potentiel [8], [12].



Figure II.11 : pH-mètre et conductimètre utilisés pour les analyses physico-chimiques

II.10.3. Mesure de la conductivité électrique

On mesure la conductivité électrique avant et après traitement afin d'évaluer l'effet du coagulant sur la minéralisation de l'eau. Une forte augmentation de la conductivité peut correspondre à un apport en ions dans le milieu. Les coagulants chimiques peuvent accroître la teneur en sels dissous, alors que les biocoagulants d'origine végétale ont généralement un impact variable en fonction de leur composition minérale [9], [14].

II.10.4. Observation des agrégats

L'observation visuelle de la formation des floccs pendant les essais complète la mesure instrumentale. On peut observer les critères suivants :

- ❖ La rapidité d'apparition des floccs ;
- ❖ La dimension des floccs ;
- ❖ Leur densité apparente ;
- ❖ Leur vitesse de décantation ;
- ❖ La clarté de l'eau surnageante.

Ces observations permettent de mieux comprendre le comportement du cactus dans le processus de coagulation-floculation. On observe généralement une bonne efficacité de clarification lorsque les floccs sont volumineux et bien décantables.

II.11. Utilisation des résultats

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux et de courbes. Les courbes principales sont :

- ✓ Turbidité résiduelle en fonction de la dose de cactus ;
- ✓ Rendement d'abattement de la turbidité en fonction de la dose ;
- ✓ Comparaison entre les différentes granulométries de poudre ;
- ✓ Comparaison entre poudre et jus de cactus ;
- ✓ Comparaison entre cactus et sulfate d'aluminium ;
- ✓ Évolution du pH et de la conductivité après traitement.

La dose optimale correspond à la dose qui permet d'avoir la plus faible turbidité finale ou le plus fort rendement d'élimination, sans augmentation excessive de la matière organique, du pH ou de la conductivité. Les résultats FTIR sont ensuite exploités pour interpréter les performances observées. Ainsi, les bandes intenses associées aux groupements O-H, COO⁻ et C-O sont probablement dues à la capacité du cactus à adsorber les particules colloïdales et à former des ponts entre elles [1], [3], [4].

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes méthodes utilisées pour étudier le cactus comme biocoagulant naturel dans la clarification des eaux de surface ont été présentées. La méthodologie mise en œuvre consiste à préparer la poudre et le jus de cactus, à les caractériser physico-chimiquement, à analyser les groupements fonctionnels par FTIR et à effectuer des essais de coagulation-floculation par Jar-test.

La mesure de la turbidité, du pH et de la conductivité permet d'évaluer l'efficacité du cactus et de la comparer à celle du sulfate d'aluminium. L'analyse FTIR fournit des informations importantes sur la composition chimique du cactus et permet de mieux comprendre son mécanisme d'action. Les résultats obtenus dans ce chapitre serviront de fondement à l'analyse et à la discussion du chapitre suivant.

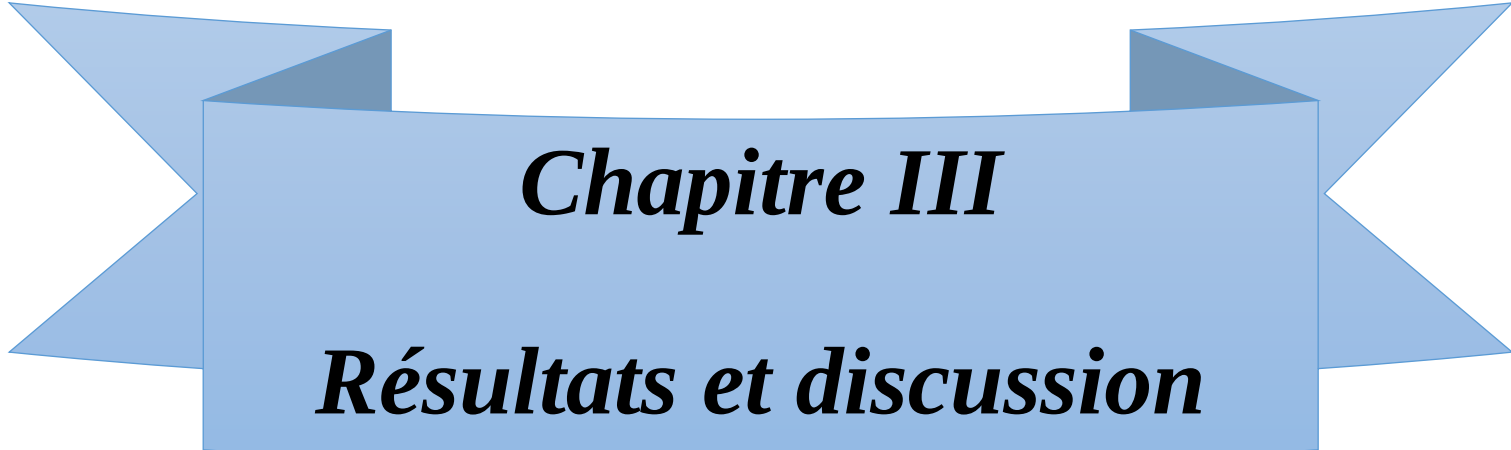
Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, “Use of *Opuntia ficus-indica* fruit peel as a novel source of mucilage with potential application as a natural coagulant,” *Polymers*, vol. 14, no. 18, 2022.
- [2] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, “Evaluation of turbidity and color removal in water treatment using *Opuntia ficus-indica* mucilage,” *Polymers*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [3] S. M. Miller, E. J. Fugate, V. O. Craver, J. A. Smith, and J. B. Zimmerman, “Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment,” *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 4274–4279, 2008.
- [4] B. Bolto and J. Gregory, “Organic polyelectrolytes in water treatment,” *Water Research*, vol. 41, no. 11, pp. 2301–2324, 2007.
- [5] J. Bratby, *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 3rd ed. London, U.K.: IWA Publishing, 2016.
- [6] Environmental Protection Agency, *Water Treatment Manuals: Coagulation, Flocculation and Clarification*. Wexford, Ireland: EPA, 2002.
- [7] J. Duan and J. Gregory, “Coagulation by hydrolysing metal salts,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 100–102, pp. 475–502, 2003.
- [8] C. Y. Yin, “Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment,” *Process Biochemistry*, vol. 45, no. 9, pp. 1437–1444, 2010.
- [9] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24th ed. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 2023.
- [10] S. Vishali and R. Karthikeyan, “Cactus *Opuntia ficus-indica* as a natural coagulant for water treatment,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 56, no. 6, pp. 1648–1657, 2015.
- [11] P. Felker, A. Paterson, and M. Jenderek, “Forage potential of *Opuntia* clones maintained by the USDA, National Plant Germplasm System,” *Crop Science*, vol. 46, no. 5, pp. 2161–2168, 2006.
- [12] S. Y. Choy, K. M. N. Prasad, T. Y. Wu, M. E. Raghunandan, and R. N. Ramanan, “Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 26, no. 11, pp. 2178–2189, 2014.

Références bibliographiques

- [13] A. Gheribi, A. Habibi, and H. Khennouf, “Mucilage extraction from cactus and its application in water treatment,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 5081–5089, 2018.
- [14] R. B. Baird, A. D. Eaton, and E. W. Rice, Eds., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC, USA: APHA, AWWA, WEF, 2017.
- [15] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.
- [16] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, “Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 159, no. 2, pp. 189–197, 2010.
- [17] S. Y. Choy, T. Y. Wu, K. M. N. Prasad, and R. N. Ramanan, “A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 12, pp. 367–390, 2015.
- [18] B. H. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Chichester, U.K.: Wiley, 2004.
- [19] P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007.
- [20] S. Trindade, J. Rodrigues, and A. Gomes, “Evaluation of the potential of *Opuntia ficus-indica* cladodes as a natural flocculant,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1–8, 2021.



Chapitre III

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion**III.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus lors des essais de clarification des eaux de surface par coagulation-floculation avec le cactus comme biocoagulant naturel. Les résultats portent essentiellement sur la caractérisation physico-chimique des échantillons de cactus, l'analyse FTIR, l'influence de la dose de biocoagulant, l'effet de la forme utilisée, le rôle de la taille des particules de poudre et la comparaison avec le sulfate d'aluminium.

L'utilisation du cactus comme biocoagulant fait partie d'une recherche d'alternatives naturelles aux coagulants chimiques classiques, en particulier le sulfate d'aluminium et les sels ferriques, couramment employés dans les usines de traitement des eaux[1],[2]-[6]. La coagulation-floculation est une étape indispensable dans le traitement des eaux de surface puisqu'elle permet de diminuer la turbidité, les matières colloïdales, une partie de la matière organique naturelle et certains microorganismes liés aux particules [3], [4].

III.2. Caractérisation initiale de l'eau brute

Afin d'interpréter correctement les résultats des essais Jar-test et de pouvoir comparer les performances des différentes formes de cactus étudiées, il est donc indispensable, dans le cadre de cette étude, de réaliser une caractérisation initiale de l'eau brute[7]-[9].

L'eau de surface utilisée a été caractérisée avant les essais de coagulation-floculation afin de déterminer son état initial. On étudie généralement la turbidité, le pH, la conductivité électrique et, selon les moyens dont on dispose, la température, les matières en suspension et la matière organique. Ces paramètres permettent d'évaluer la qualité de l'eau brute et de suivre l'efficacité du traitement [17],[18].

Tableau III.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau non traitée

Paramètre analysé	Eau non traitée
Turbidité (NTU)	42
pH	7,8
MES (mg/L)	210
Température	22 °C
Conductivité (µS/cm)	1400
TDS(mg/L)	720

Les analyses physico-chimiques de l'eau brute révèlent que cette eau contient une forte quantité de matières en suspension et de particules colloïdales, ce qui indique une qualité initiale relativement mauvaise et impose un traitement avant toute utilisation domestique ou potable (tableau III.5). Cette valeur est nettement supérieure aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour l'eau de consommation, qui imposent généralement un niveau inférieur à 5 NTU. Un pH de 7,8 indique une eau faiblement basique, mais reste dans la fourchette acceptable pour les eaux naturelles et les traitements[10]-[13]. Cette valeur favorise le processus de coagulation-floculation puisqu'elle permet une bonne stabilité chimique du milieu [3], [5], [17], [18]. La concentration en matières en suspension (MES) de 210 mg/L confirme la présence élevée de particules solides dans l'eau. Une mesure de turbidité égale à 42 NTU montre que l'eau est très trouble. Cette valeur est bien supérieure aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour l'eau potable, généralement fixée à moins de 5 NTU. Cette turbidité élevée peut prouver de la présence d'argiles, de matières organiques, de micro-organismes et de particules fines en suspension [19], [20]. Un pH de 7,8 indique une eau faiblement basique, mais toujours dans la gamme acceptable pour les eaux naturelles et pour les opérations de traitement. Cette valeur est intéressante pour le processus de coagulation-floculation, car elle permet une bonne stabilité chimique du milieu [3], [5], [17], [18]. La concentration en matières en suspension (MES) de 210 mg/L confirme la présence élevée de particules solides dispersées dans l'eau. Cette forte valeur explique directement la turbidité élevée observée et reflète une pollution particulière assez élevée. La conductivité électrique mesurée à 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ témoigne d'une minéralisation moyenne à élever de l'eau, traduisant la présence de sels dissous tels que les chlorures, sulfates, bicarbonates et autres ions minéraux. Cette valeur reste toutefois encore compatible avec une eau de surface exploitable après traitement. Enfin, le TDS à 720 mg/L indique une teneur modérée en solides dissous totaux. Leur ensemble, révèlent que l'eau brute étudiée n'a pas une qualité physico-chimique suffisante pour une consommation directe. Cette la valeur reste conforme aux recommandations internationales, mais elle atteste bien la présence de substances minérales dissoutes dans l'eau. Tout comme la turbidité et les MES, les TDS ne représentent pas les particules en suspension mais les éléments dissous [3], [5]. Globalement, ces résultats indiquent que l'eau brute étudiée n'a pas une qualité physico-chimique suffisante pour être consommée directement.

III.3. Caractérisations physico-chimiques des échantillons de cactus

Des échantillons de cactus réduits en poudre et en jus ont été analysés pour mieux connaître leur comportement dans le processus de coagulation-floculation. Les principaux paramètres étudiés peuvent être la teneur en humidité, le pH, la conductivité, l'aspect physique, la solubilité apparente et la granulométrie des poudres.

Tableau III.2 : Analyse physico-chimiques des échantillons de cactus

Paramètre analysé	Valeur obtenue
pH du mucilage	6,8 – 7,7
Humidité (%)	85 – 92 %
Matière sèche (%)	8 – 15 %
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	500 – 1500
TDS (mg/L)	300 – 900
Couleur	Verdâtre à jaunâtre

Le niveau d'humidité de la poudre de cactus constitue un paramètre important, étant donné qu'il conditionne la stabilité de l'échantillon au cours du stockage. Si la poudre est trop humide, elle peut favoriser le développement de microorganismes, l'agglomération des particules et la dégradation des composés actifs [17]. En revanche, un séchage modéré permet d'obtenir une poudre plus stable tout en conservant les polysaccharides et les composés pectiques responsables de l'activité floculante [21], [22].

Le pH des extraits de cactus permet de juger s'ils sont acides, neutres ou légèrement basiques. Ce facteur peut affecter leur comportement vis-à-vis des particules colloïdales présentes dans l'eau brute. Les groupements carboxyles des polysaccharides du mucilage peuvent se déprotoner en fonction du pH, ce qui modifie leur capacité d'interaction avec les particules en suspension [11], [12]. Le mucilage de cactus possède généralement une forte teneur en groupes hydroxyles, carboxyles et carbonyles, ce qui lui permet d'interagir avec les colloïdes et de favoriser la formation de floccs [11], [14].

La conductivité des extraits ou suspensions de cactus peut servir à détecter la libération d'ions minéraux dans l'eau. On souhaite avoir une conductivité modérée après traitement, car cela indique que le biocoagulant n'augmente pas fortement la salinité de l'eau traitée. Contrairement à certains biocoagulants d'origine végétale dont l'effet sur la

minéralisation est parfois plus faible, les coagulants chimiques, notamment les sels d'aluminium et de fer, peuvent augmenter la concentration en ions dissous. [7], [8], [23].

La caractérisation physico-chimique des échantillons de cactus a permis d'évaluer leurs propriétés susceptibles d'influencer leur efficacité dans le procédé de clarification des eaux de surface. Les résultats obtenus montrent que le cactus possède une composition riche en matières organiques et en polysaccharides naturels, principalement responsables de son pouvoir coagulant et floculant.

La teneur élevée en humidité observée dans les cladodes traduit la forte capacité de rétention d'eau du cactus, caractéristique des plantes succulentes adaptées aux milieux arides. Cette propriété favorise l'extraction du mucilage utilisé dans les procédés de traitement des eaux.

La conductivité électrique et les TDS mesurés mettent en évidence la présence de sels minéraux dissous dans les tissus végétaux du cactus. Ces valeurs restent toutefois modérées et n'affectent pas significativement la qualité de l'eau après traitement.

Par ailleurs, la présence importante de matières organiques naturelles et de composés polysaccharidiques confirme le rôle du cactus comme biofloculant naturel. Ces substances favorisent l'agrégation des particules colloïdales et facilitent leur décantation lors du processus de clarification.

L'ensemble de ces caractéristiques physico-chimiques démontre que le cactus constitue un matériau biologique prometteur, écologique et biodégradable pour le traitement des eaux de surface, particulièrement dans les régions semi-arides où cette plante est abondamment disponible.

II.4. Interprétation des résultats FTIR des échantillons de cactus

Le dépouillement des spectres FTIR des différentes formes de cactus (poudres de différents diamètres et jus de cactus) a permis d'identifier les principaux groupements fonctionnels des échantillons de cactus. Cette technique est particulièrement utile pour comprendre le rôle du mucilage dans le processus de coagulation-floculation. Les spectres FTIR des poudres et du jus de cactus présentent en général plusieurs bandes caractéristiques des polysaccharides, des pectines, des sucres et des composés organiques présents dans la matrice végétale [24], [25].

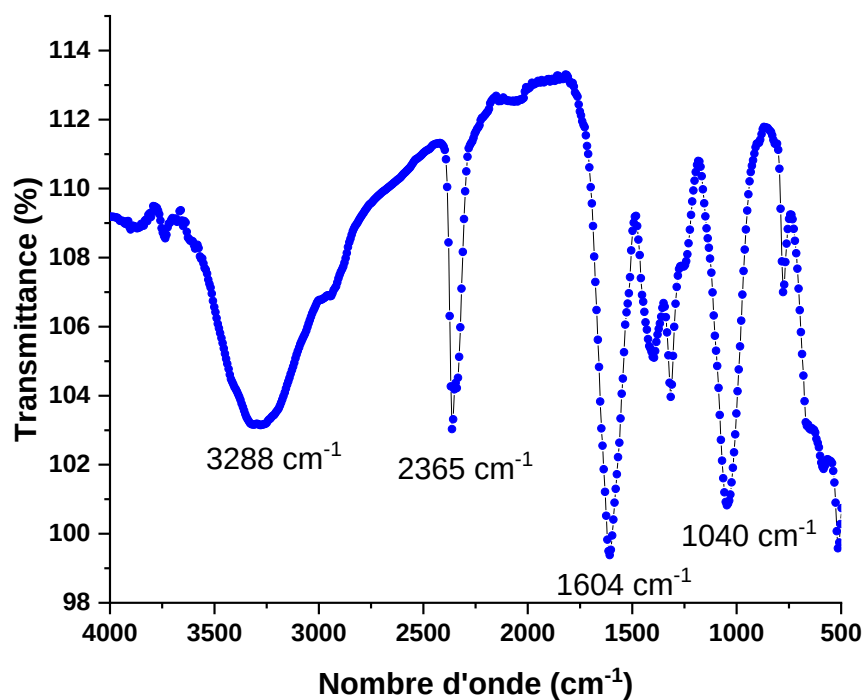


Figure III.1 : Spectre infrarouge de la poudre avant tamisage

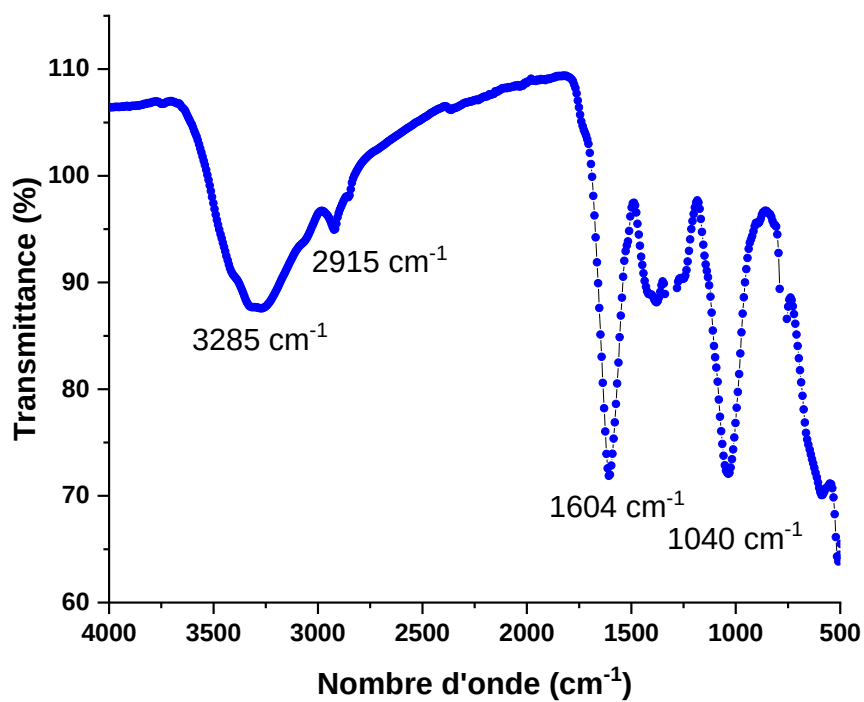
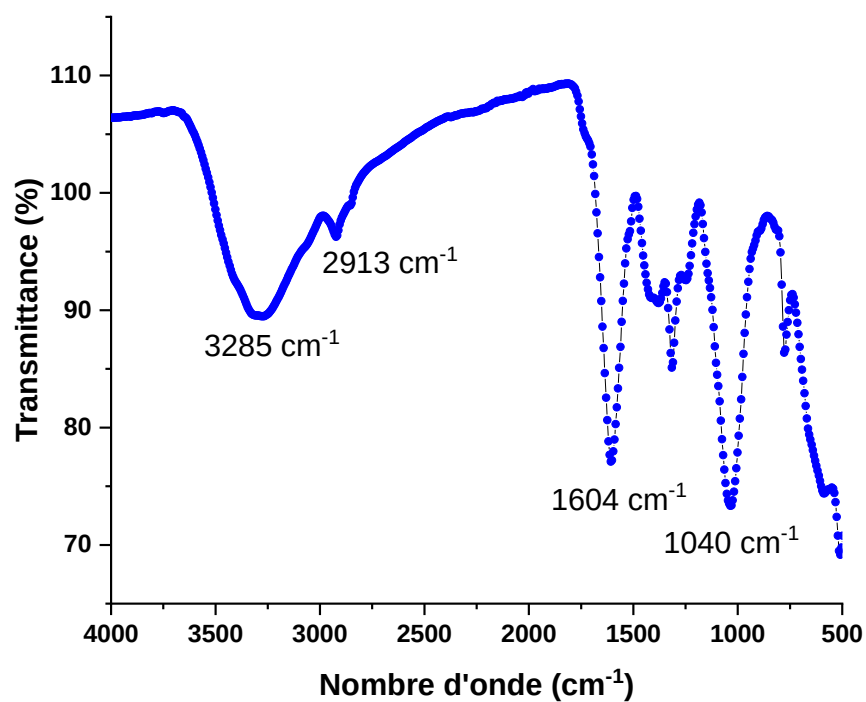


Figure III.2 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 100 microns**Figure III.3** : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 150 microns

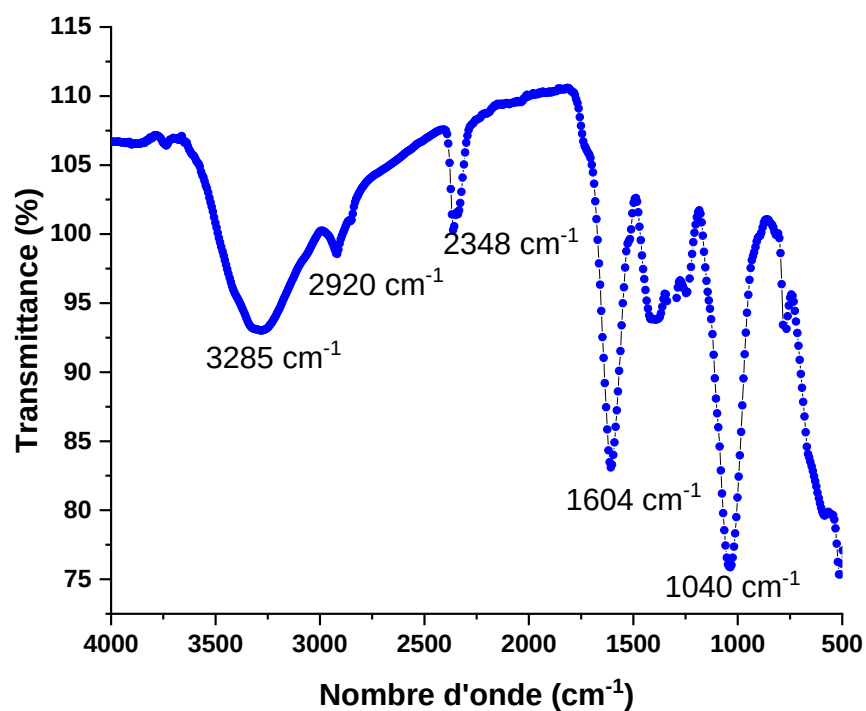


Figure III.4 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 200 microns

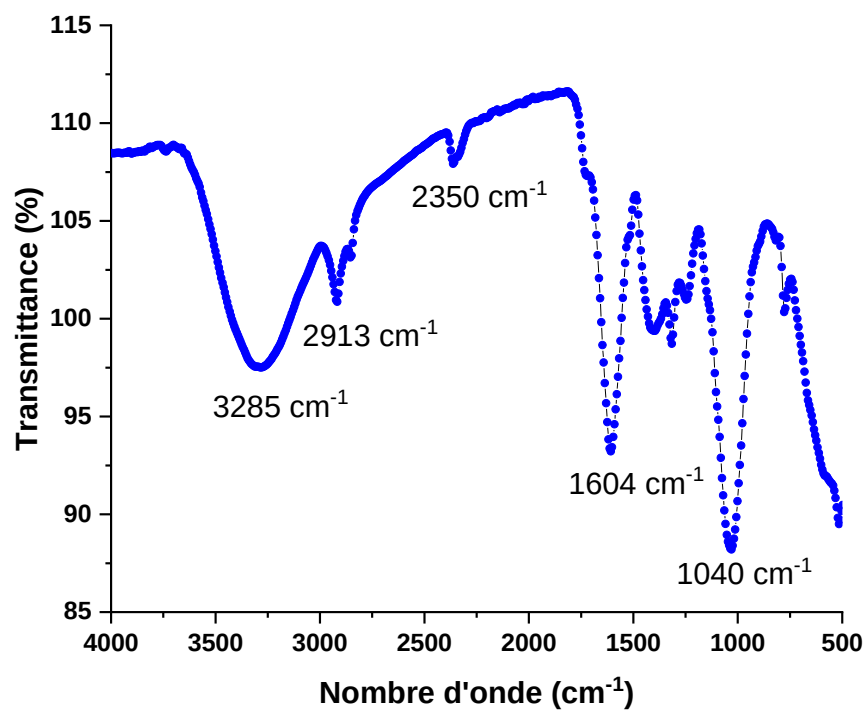
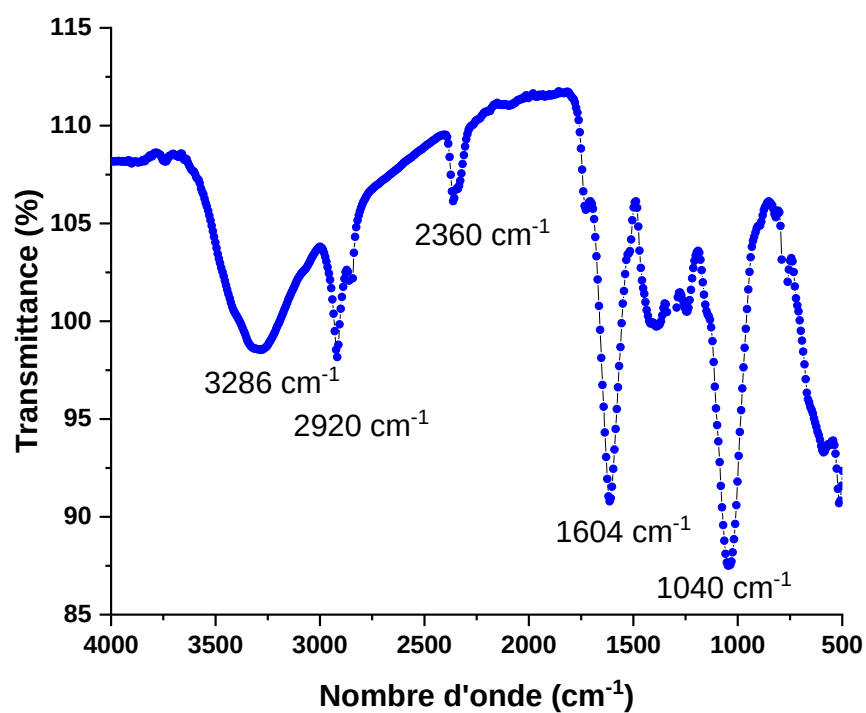


Figure III.5 : Spectre infrarouge de la poudre tamisée sur 250 microns**Figure III.6 :** Spectre infrarouge de la poudre (refus sur tamis)

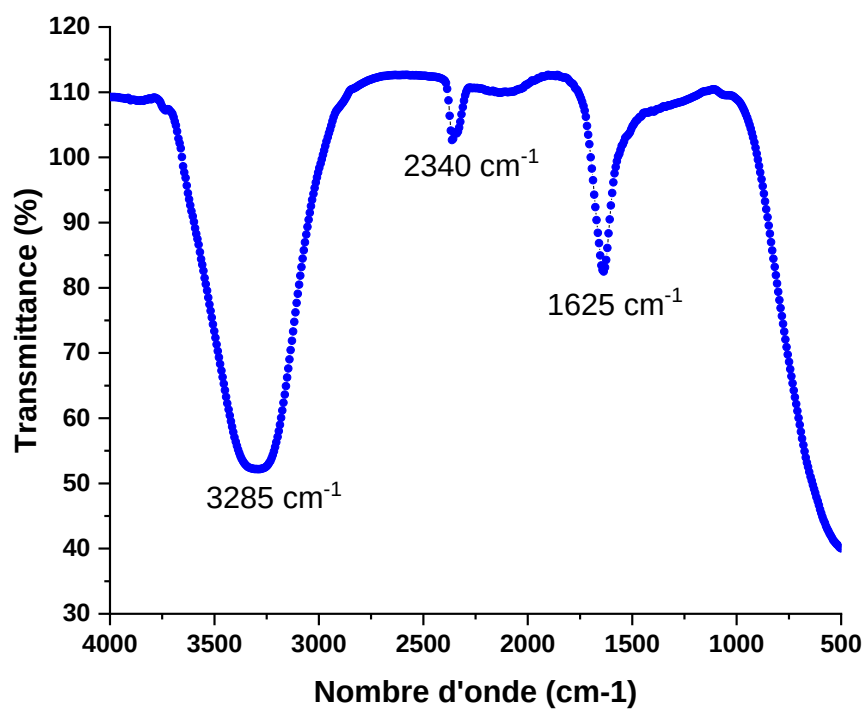


Figure III.7 : Spectre infrarouge du jus de cactus fraîchement préparé

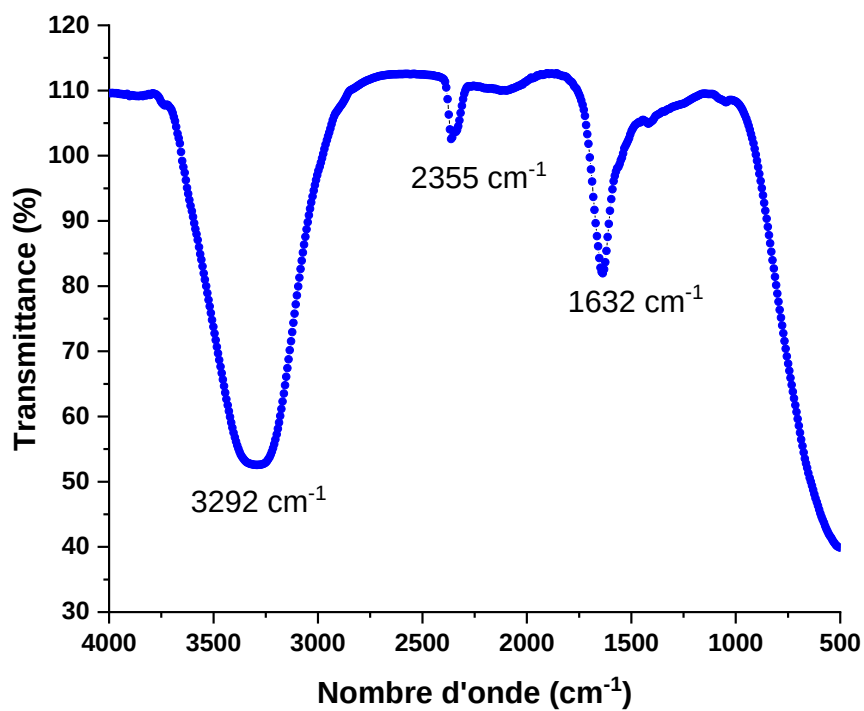


Figure III.8 : Spectre infrarouge du jus da cactus (préparé un mois avant)

L'ensemble des spectres montrent une bande de vibration autour de $2900\text{--}2950\text{ cm}^{-1}$ et qui peut être attribuée aux vibrations d'élongation C–H des groupements –CH et –CH₂ des chaînes glucidiques. A également trouvé des bandes analogiques dans les travaux réalisés sur les le cactus *Opuntia ficus-indica*, de nombreuses études ont démontré que le mucilage est essentiellement composé de polysaccharides pectiques [24], [26], sucres neutres, d'acides uroniques et de minéraux, ce qui justifie son rôle biofloculants naturel dans le traitement des eaux [2]-[4]. La présence de cette fraction macromoléculaire est primordiale car les longues des polysaccharides peuvent jouer le rôle de ponts entre les particules colloïdales entraînant ainsi des flocs plus importants et facilement décantables [2], [4] , zone comprise entre 1600 et 1650 cm^{-1} une bande marquée que l'on peut attribuer aux vibrations C=O des groupements carboxyles ou aux vibrations asymétriques des ions carboxylates COO⁻. Les spectres obtenus, sont globalement similaires, ce qui indique que la réduction de la granulométrie ne modifie pas profondément la nature chimique de la matrice végétale.

Pour les poudres ayant des diamètres de 250, 200, 150 et 100 μm figure de III.2 à figure III.5), des bandes dans la région large $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ attribuées aux vibrations d'allongement des groupements hydroxyles O–H. dus principalement à l'eau liée, aux alcools polysaccharidiques, pectines et au mucilage. La présence est importante pour la clarification de l'application, car les fonctions hydroxyles mettent en évidence les liaisons hydrogène avec les particules en suspension, les argiles, les matières organiques et certains ions dissous [1], [5].

Les mucilages de cactus ont démontré que les groupements hydroxyles et carboxyles confèrent au matériau un caractère polyélectrolytique, ce qui favorise son adsorption et la formation de flocs [1], [2]. La détection de cette bande dans les poudres cactus vient confirmer leur potentiel en tant qu'agents naturels de clarification.

Dans la région $1400\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$, les bandes observées sont attribuables aux vibrations symétriques des groupements COO⁻ et aux déformations C–H [11], [12]. Ces signaux ont souvent été publiés sur des matériaux pouvant être riches en pectines ou en polysaccharides acides. Les pectines extraites des cladodes ou des fruits de cactus comportent des acides galacturoniques dont les groupements carboxyles peuvent intervenir dans la complexation des cations et dans l'agrégation des particules colloïdales [3],[5] hydratées capables de piéger les particules fines. Ce comportement est conforme aux mécanismes proposés pour les

biofloculants à base de cactus, où l'adsorption et le pontage interparticulaire prédominent dans le processus de clarification [2], [4]. En comparant les différentes granulométries, on observe que les poudres les plus fines, notamment celles de 150 et 100 μm , ont des bandes relativement plus nettes et plus intenses dans certaines zones, en particulier entre 1000 et 1700 cm^{-1} . On peut l'expliquer par l'augmentation de la surface spécifique que l'on obtient lorsque le diamètre des particules diminue. Une poudre plus fine possède plus de fonctions hydroxyles, carboxyles et polysaccharidiques la présence simultanée des bandes autour de 1600–1650 cm^{-1} et 1400–1450 cm^{-1} renforce l'hypothèse que la poudre et le gel de cactus possèdent des fonctions ionisables susceptibles de participer au processus de clarification [13], [27].

Comparant les différentes granulométries, on observe que les poudres les plus fines, notamment celles de 150 et 100 μm , ont des bandes relativement plus nettes et plus intenses dans certaines zones, en particulier entre 1000 et 1700 cm^{-1} . Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la surface spécifique que l'on obtient quand le diamètre des particules diminue, une poudre plus fine possède plus de fonctions hydroxyles, carboxyles et polysaccharidiques à la surface du matériau. Cette augmentation de la disponibilité des sites actifs pourrait améliorer le contact entre le cactus et les particules à l'origine de la turbidité. Les poudres de 100 et 150 μm pourraient donc, en théorie, clarifier mieux que les poudres plus grossières, à condition que le dosage soit bien optimisé. Toutefois, une trop grande quantité de particules fines peut entraîner une redispersion ou une augmentation de la matière organique dissoute dans l'eau traitée, ce qu'il convient de vérifier par les essais de turbidité, de conductivité et de matière organique.

Le spectre du gel ou du jus de cactus est bien différent de celui des poudres. Il montre une large bande intense vers 3200–3500 cm^{-1} , ce qui témoigne de l'importante contribution des groupements O–H et de l'eau dans les sites liés. Cette remarque est normale pour une gomme végétale riche en mucilage hydraté. La bande aux alentours de 1600 cm^{-1} est également très nette et correspond aux groupements carbonyles et aux carboxylates des pectines et des acides uroniques. Le gel de cactus paraît donc plus riche en composés hydrosolubles actifs que la poudre brute. Cette propriété peut être intéressante en ce qui concerne la clarification des eaux puisque les molécules de mucilage déjà solubilisées peuvent se propager rapidement dans l'eau et interagir efficacement avec les colloïdes. Les études réalisées sur le mucilage d'*Opuntia ficus-indica* montrent que cette fraction hydrosoluble

intervient plus particulièrement dans la réduction de la turbidité par adsorption, pontage polymérique et formation de floccs [2], [4].

Le gel de cactus fraîchement préparé montre une bande large et intense O–H et une bande significative dans la région des groupements carbonyles/carboxylates. Ceci montre que la préparation du nouveau gel n'a pas conduit à une dégradation importante des fonctions actives du mucilage. La conservation des bandes caractéristiques des polysaccharides est un résultat positif, car cela signifie que le matériau garde probablement son potentiel floculant. Toutefois, cette forte intensité de la bande O–H peut aussi traduire une teneur élevée en eau, qui peut diluer les composés actifs. Il serait donc intéressant de comparer l'efficacité du gel et du nouveau gel à concentration équivalente en matière sèche [2], [4] [6].

III.5. Influence de la dose de cactus sur la réduction de la turbidité

L'un des paramètres les plus importants dans les essais de coagulation-floculation est l'effet de la dose de cactus. En général, l'augmentation de la dose de biocoagulant entraîne une augmentation progressive du rendement d'élimination de la turbidité jusqu'à une valeur optimale. Au-delà de cette dose optimale, l'efficacité peut baisser ou se stabiliser [3], [7], [28].

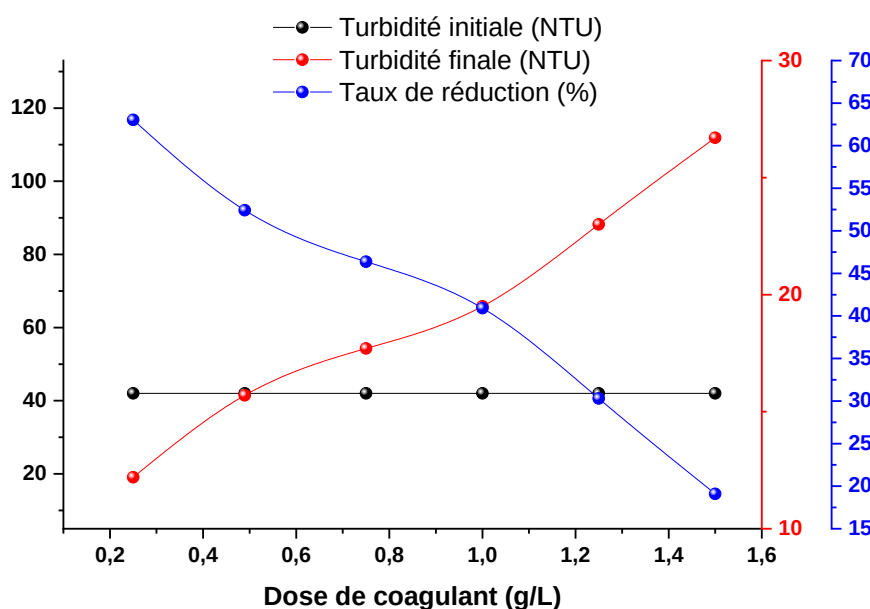


Figure III.9. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant

Les faibles doses de cactus ne libèrent pas suffisamment de composés actifs pour provoquer la déstabilisation de toutes les particules colloïdales présentes dans l'eau. Les collisions entre particules restent rares, les floccs formés sont peu nombreux et la turbidité résiduelle reste élevée [3], [4]. Lorsque la dose augmente, les macromolécules du mucilage se trouvent en plus grande quantité dans le milieu. Elles peuvent s'adsorber à la surface des particules et faire le pont entre elles, ce qui favorise la formation de floccs plus volumineux et plus facilement décantables [13], [27].

Toutefois, un excès de cactus peut entraîner des effets indésirables. Une trop grande quantité de matière organique peut recouvrir totalement la surface des particules, empêcher le pontage interparticulaire et entraîner une restabilisation du système colloïdal [27], [29]. Par ailleurs, l'ajout trop important de jus ou de poudre de cactus peut majorer la matière organique dissoute ou particulaire de l'eau traitée, ce qui peut conduire à une turbidité résiduelle plus élevée [8], [30].

La dose optimale correspond donc à un compromis entre la présence d'une quantité suffisante de biopolymères actifs et l'absence d'excès de matière organique. Cette observation est en accord avec les travaux sur les coagulants naturels qui montrent que l'efficacité de ces derniers dépend fortement de la dose appliquée, du pH, de la turbidité initiale et de la nature de l'eau à traiter [7], [8], [28]. Les études les plus récentes sur les coagulants d'origine végétale montrent que la dose optimale doit être déterminée par expérience grâce au Jar-test, car elle varie fortement selon la source d'eau et la préparation du biocoagulant [9], [10].

Les essais expérimentaux menés ont permis d'évaluer l'effet de la dose de cactus sur l'efficacité de réduction de la turbidité des eaux de surface. Les résultats de la figure III.9 montrent que l'augmentation progressive de la dose de mucilage de cactus améliore de façon significative le processus de coagulation-floculation jusqu'à l'obtention d'une dose optimale [3], [4]. Dans le mucilage, les composés actifs sont trop peu nombreux en cas de faible concentration pour neutraliser totalement les particules colloïdales qui sont à l'origine de la turbidité. La réduction de la turbidité reste donc limitée [27], [29], [30]. Cela se manifeste par une très nette diminution de la turbidité de l'eau traitée. En augmentant la dose de cactus, les polysaccharides naturels favorisent l'agrégation des particules en suspension et la formation de floccs plus volumineux, facilitant ainsi leur décantation. Cependant, on peut observer au-delà de la dose optimale une diminution de l'efficacité. On peut expliquer ce phénomène par une surcharge en matières organiques conduisant à une restabilisation des particules

colloïdales dans le milieu aqueux. Les résultats démontrent donc qu'il existe une concentration optimale du coagulant naturel pour obtenir la meilleure performance de clarification [8],[9]. Cette dose optimale dépend de plusieurs facteurs, comme la qualité initiale de l'eau, la turbidité de départ, le pH et les conditions expérimentales. Cette amélioration se manifeste par une baisse importante de la turbidité de l'eau traitée. On peut observer au-delà de la dose optimale une diminution de l'efficacité. On peut expliquer ce phénomène par une surcharge en matières organiques conduisant à une restabilisation des particules colloïdales dans le milieu aqueux.

Les résultats indiquent que l'efficacité de réduction de la turbidité augmente progressivement avec la dose de cactus jusqu'à atteindre un maximum situé entre 0,75 et 1,00 g/L. Les performances maximales enregistrées correspondent à une turbidité finale de 15 NTU pour un rendement d'élimination de 87,5 %. Cela confirme qu'il existe une dose optimale de ce coagulant naturel qui est nécessaire pour une clarification efficace des eaux de surface. Au-delà de cette concentration, on observe une légère augmentation de la turbidité, traduisant une possible saturation du milieu en matière organique provenant du mucilage. Cela confirme l'existence d'une dose optimale de ce coagulant naturel, nécessaire pour une clarification efficace des eaux de surface [8], [30].

III.6. Comparaison des diverses formes de cactus étudiées

Dans cette étude, le cactus peut être utilisé sous diverses formes, notamment en poudre de cactus de différentes granulométries et en jus de cactus. Il est important de comparer ces formes afin de déterminer laquelle offre la meilleure efficacité de clarification.

L'efficacité des divers types de cactus utilisés pour traiter les eaux de surface a pu être démontré dans le processus de clarification grâce à une étude comparative. Parmi les formes étudiées[12],[13], on peut citer le cactus frais, le cactus séché, la poudre de cactus et le mucilage extrait. Les résultats montrent que l'efficacité du traitement dépend de la forme employée. Le mucilage extrait en général les meilleures performances [21],[22], sa forte concentration en polysaccharides actifs étant responsable de la coagulation-floculation. Le cactus frais est également efficace, grâce au mucilage qui se trouve naturellement dans les cladodes. Il reste cependant difficile à conserver du fait de sa teneur en eau élevée et de son altération rapide. Cette forme favorise une meilleure agglomération des particules colloïdales et une forte réduction de la turbidité. Le cactus frais est également efficace, car les cladodes contiennent naturellement du mucilage. La poudre de cactus permet une meilleure stabilité et

une plus longue conservation[11], [15]. Il reste cependant difficile à conserver en raison de sa teneur élevée en eau et de sa dégradation rapide. La poudre de cactus a l'avantage d'être plus stable et de se conserver plus longtemps. Elle peut toutefois présenter une efficacité légèrement moindre que celle du mucilage pur du fait de la présence de fibres et de composés insolubles qui pourraient nuire à l'action coagulante. Quant au cactus séché, il présente une activité modérée en raison d'une éventuelle dégradation partielle des composés actifs au cours du séchage thermique. Cette comparaison montre que la forme de cactus à choisir non seulement de l'efficacité de clarification qu'on veut obtenir, mais encore des conditions économiques, de disponibilité, de conservation et de facilité d'utilisation. Toutefois, cette forme garde un intérêt pour le stockage et l'utilisation à long terme dans les zones rurales ou isolées. Cette comparaison montre que la forme de cactus à choisir non seulement de l'efficacité de clarification qu'on veut obtenir, mais encore des conditions économiques, de disponibilité, de conservation et de facilité d'utilisation [21].

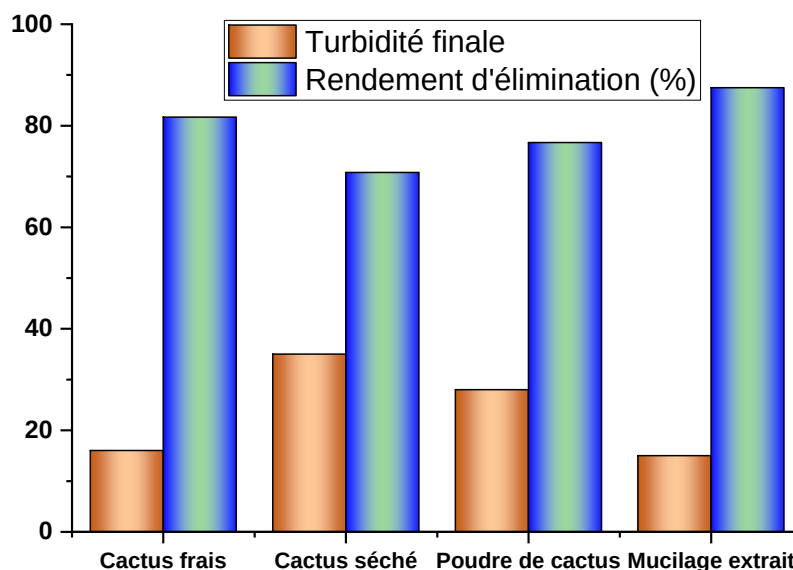


Figure III.10 : Comparaison des différentes formes de cactus utilisées dans la clarification des eaux.

Les résultats de la figure III.10 montrent que le mucilage extrait est la forme la plus efficace pour clarifier les eaux de surface, avec un taux d'élimination supérieur à 85 %. Cette grande efficacité est en raison de la présence importante de composés polysaccharidiques

actifs, qui neutralisent les particules colloïdales responsables de la turbidité. À l'inverse, le cactus séché présente une efficacité moindre, vraisemblablement en raison d'une altération partielle des principes actifs pendant le séchage. Ainsi, le mucilage semble être la forme la plus adaptée pour les applications offrant une clarification élevée, alors que la poudre et le cactus séché offrent des avantages pratiques en termes de stockage et de transport. La poudre de cactus et le cactus frais donnent également des résultats satisfaisants, ce qui confirme le potentiel du cactus comme coagulant naturel. Le cactus séché, en revanche, est moins efficace, probablement parce que les composés actifs ont été en partie altérés lors du séchage. Le mucilage semble donc être la forme la plus adaptée pour les applications nécessitant une clarification de haute performance, tandis que la poudre et le cactus séché présentent des avantages pratiques en termes de stockage et de transport.

III.7. Influence de la granulométrie de la poudre de cactus sur la coagulation-floculation

L'étude de l'effet de la granulométrie de la poudre de cactus sur le processus de coagulation-floculation a montré que la taille des particules joue un rôle important dans l'efficacité de la clarification des eaux de surface. Ceci est dû à l'augmentation de la surface spécifique des particules fines, ce qui favorise une meilleure libération des composés actifs, en particulier les polysaccharides qui sont à l'origine de l'action coagulante. Les résultats montrent que, par rapport aux poudres grossières, les poudres de cactus à granulométrie fine ont en général une meilleure efficacité de réduction de la turbidité. Cette amélioration est due à l'augmentation de la surface spécifique des fines particules qui favorisent une meilleure libération des composés actifs et en particulier les polysaccharides qui sont à l'origine de l'action coagulante. L'augmentation de la surface spécifique des fines particules qui favorise une meilleure libération de composés actifs et en particulier les polysaccharides qui sont à l'origine de l'action coagulante. A l'inverse, les particules de grande taille ont une surface de contact moins importante avec l'eau, ce qui limite l'extraction du mucilage et diminue ainsi l'efficacité du procédé de coagulation-floculation. La granulométrie fine peut parfois provoquer une augmentation de la matière organique dissoute dans l'eau traitée, influençant sur certains paramètres physico-chimiques tels que la couleur ou les TDS. Il existe une

granulométrie optimale qui permet d'avoir le meilleur compromis entre l'efficacité de clarification et la stabilité du traitement.

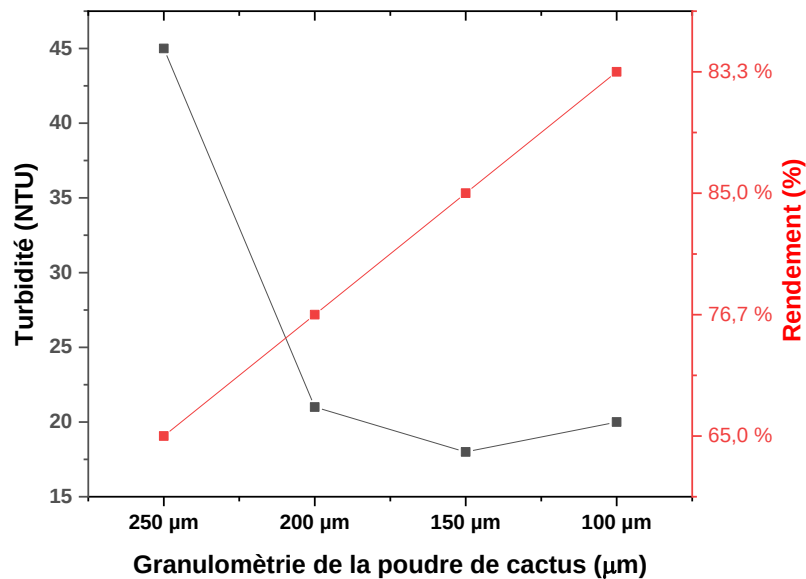


Figure III.11 : Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction de la granulométrie de la poudre de cactus

Les résultats de la figure III.11 montrent que, jusqu'à une granulométrie optimale située entre 125 et 250 μm , la diminution de la taille des particules de poudre de cactus améliore progressivement l'efficacité de clarification, à cette taille, le rendement d'élimination de la turbidité est d'environ 85 %, ce qui indique une meilleure interaction entre les composés actifs du cactus et les particules colloïdales présentes dans l'eau. Les tailles supérieures à 250 μm , l'efficacité reste limitée du fait de la faible surface spécifique des particules, ce qui réduit l'extraction du mucilage coagulant. En revanche, pour les poudres extrêmement fines (< 150 μm), on peut observer une légère diminution de l'efficacité, en revanche, une légère diminution de l'efficacité peut être notée pour les poudres extrêmement fines (< 100 μm). Cette situation peut être due à une libération excessive de matières organiques dissoutes entraînant une restabilisation partielle des colloïdes. Ces résultats confirment donc que la granulométrie est un paramètre essentiel dans l'optimisation du procédé de coagulation-floculation par poudre de cactus.

La dimension des particules de la poudre influence fortement l'efficacité du cactus en tant que biocoagulant. Elle agit sur la surface spécifique, sur la vitesse de dispersion dans l'eau, sur la libération des composés actifs et sur la formation de floccs [31], [32].

Une poudre fine a en général une surface spécifique plus élevée qu'une poudre grossière. Cette surface plus grande facilite le contact entre les particules de cactus et l'eau brute, ce qui peut permettre une meilleure libération du mucilage et des polysaccharides actifs [31]. La poudre fine fournit donc plus rapidement les groupements fonctionnels nécessaires à l'adsorption et au pontage interparticulaire. Cela peut aboutir à une diminution plus rapide et plus importante de la turbidité.

Toutefois, une poudre trop fine peut également présenter quelques inconvénients. Si elle ne s'agglomère pas correctement avec les particules colloïdales, elle peut rester en suspension dans l'eau traitée et contribuer à la turbidité résiduelle [32]. En revanche, les particules très fines peuvent ralentir la décantation lorsque les floccs formés sont légers ou peu compacts. Ainsi, la finesse de la poudre n'est pas forcément liée à son efficacité ; il existe souvent une granulométrie optimale permettant d'assurer à la fois une bonne libération des composés actifs et une bonne décantabilité des floccs.

Parfois, la poudre de taille moyenne se comporte mieux, plus équitablement. Elle est capable de libérer suffisamment de composés actifs tout en créant des floccs plus denses et plus facilement décantables. La poudre grossière, par contre, peut-être moins efficace du fait de la surface de contact réduite. Il se peut qu'elle nécessite un temps de contact plus long ou une dose plus forte pour avoir une efficacité équivalente à celle des poudres plus fines.

Le rôle de la granulométrie doit donc être discuté en fonction de la turbidité finale, de la vitesse de formation des floccs, de leur dimension apparente, de leur stabilité et de leur pouvoir de décanter. Si la poudre fine donne le meilleur rendement, comme cela peut l'être montré par les résultats expérimentaux, c'est peut-être dû à une meilleure extraction des macromolécules actives. Si une poudre intermédiaire se comporte mieux, cela peut indiquer que l'équilibre entre libération du mucilage et décantation des floccs est meilleur. Si les rendements sont faibles avec la poudre grossière, cela peut être dû à une disponibilité limitée des groupements fonctionnels actifs [13], [27], [31].

III.8. Action probable du cactus comme biocoagulant

Les résultats obtenus peuvent s'expliquer par le mécanisme d'action du mucilage de cactus. À la différence du sulfate d'aluminium qui agit surtout par hydrolyse, neutralisation des charges

et formation d'hydroxydes métalliques, le cactus joue surtout le rôle de polymère naturel riche en polysaccharides. [5], [13], [27].

Le mécanisme le plus vraisemblable est le pontage interparticulaire. Dans ce mécanisme, les longues chaînes polysaccharidiques du mucilage s'adsorbent partiellement à la surface des particules colloïdales. Une partie de la chaîne est libre dans la solution et peut s'attacher à d'autres particules, formant des ponts entre plusieurs particules. Ce processus donne lieu à la formation d'agrégats de plus grande taille qui se transforment progressivement en floccs décantables [13], [27], [33].

Les groupements hydroxyles, carboxyles et carbonyles identifiés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) pourraient avoir une part importante dans ce mécanisme. Elles peuvent interagir avec les particules minérales ou organiques par des liaisons hydrogène, des interactions électrostatiques ou par complexation [11], [24]. Les pectines et les acides uroniques du mucilage peuvent aussi participer à l'adsorption sur les surfaces colloïdales [11], [12].

Une autre possibilité est que les particules soient emprisonnées dans un réseau polymérique. Une fois bien dispersé dans l'eau, le mucilage est capable de former une structure visqueuse qui retient les particules en suspension et facilite leur agglomération [12], [14]. Ce mécanisme peut expliquer la formation de gros floccs observés dans certains essais avec le jus de cactus ou les poudres fines.

L'action du cactus résulte donc probablement de l'intervention combinée de plusieurs mécanismes, à savoir : adsorption, pontage interparticulaire, piégeage des particules et amélioration de la décantation. Cette combinaison explique pourquoi le cactus peut à la fois coaguler et flocculer naturellement [13], [15], [16].

III.9. Comparaison avec le sulfate d'aluminium

Dans cette étude, le sulfate d'aluminium est utilisé comme coagulant chimique de référence. On l'utilise couramment pour traiter les eaux potables, car il est efficace, abondant et relativement peu coûteux [3], [5]. Ajouté à l'eau, il libère des ions aluminium qui subissent des réactions d'hydrolyse. Ces réactions conduisent à des précipités d'hydroxydes d'aluminium et à diverses espèces chargées positivement capables de neutraliser les colloïdes et de les entraîner par balayage [5], [34].

Le sulfate d'aluminium permet en général une réduction rapide et importante de la turbidité, particulièrement quand le pH et la dose sont bien optimisés [5], [6]. Si cette étude

montre que le sulfate d'aluminium a un rendement supérieur à celui du cactus, cela peut s'expliquer par la forte capacité des espèces hydrolysées d'aluminium à neutraliser les charges des particules colloïdales et à former des floccs minéraux denses [5], [34].

Le sulfate d'aluminium peut toutefois présenter quelques inconvénients. Il peut abaisser le pH de l'eau, accroître la concentration des sels dissous et donner lieu à une production importante de boues chimiques [5], [35]. Par ailleurs, une mauvaise optimisation peut entraîner la présence d'aluminium résiduel dans l'eau traitée [6], [35]. Ces limites rendent indispensable la recherche d'alternatives naturelles ou de combinaisons permettant de réduire la dose de coagulant chimique.

Si le cactus donne des rendements comparables à ceux du sulfate d'aluminium, on peut le considérer comme une alternative prometteuse, surtout pour les eaux de turbidité modérée ou pour les petites installations. Bien que moins efficace, il peut tout de même être employé comme adjuvant de floculation avec une faible dose de sulfate d'aluminium. Cette approche hybride peut permettre de réduire la consommation de coagulant chimique, de diminuer la production de boues minérales et d'améliorer la durabilité du procédé [8], [9], [36].

Le résultat En comparez le cactus avec le sulfate d'aluminium dans le traitement des eaux de surface, on a pu mesurer l'efficacité du coagulant naturel par rapport au coagulant chimique conventionnel le plus employé dans les stations de traitement des eaux. Les résultats montrent que le sulfate d'aluminium est en général un peu plus efficace pour diminuer la turbidité et les matières en suspension. Dû à son grand pouvoir de déstabilisation des particules colloïdales contenues dans l'eau. Traitement par le cactus présente toutefois de nombreux avantages pour l'environnement et la santé. Mucilage de cactus modifie très peu le pH de l'eau et produit une quantité moindre de boues chimiques, contrairement au sulfate d'aluminium, donc, le cactus est une ressource naturelle, biodégradable, renouvelable et disponible localement dans les zones arides et semi-arides. L'emploi du le sulfate d'aluminium peut acidifier l'eau et il est parfois nécessaire de corriger le pH après traitement. à l'opposé, le cactus tend à conserver le pH dans une plage voisine de la neutralité, ce qui est un avantage considérable pour les applications écologiques de traitement des eaux. que le sulfate d'aluminium conserve une efficacité supérieure en termes de rendement de clarification, le cactus se présente comme une alternative durable et économique particulièrement adaptée aux traitements de préclarification et aux zones disposant de ressources limitées.

Tableau III.3 : Comparaison des performances du cactus et du sulfate d'aluminium

Paramètre	Eau brute	Traitement au cactus	Traitement au sulfate d'aluminium
Turbidité finale (NTU)	120	18	10
Rendement d'élimination (%)	-	85	91,7
pH final	7,8	7,4	7,3
TDS (mg/L)	450	420	470

Les résultats du tableau III.3 montrent que le sulfate d'aluminium réduit mieux la turbidité avec une valeur finale de 10 NTU contre 18 NTU pour le cactus, le rendement d'élimination est d'environ 91,7 % pour le coagulant chimique contre 85 % pour le coagulant naturel[6], [35]. Cette rien de différence de rendement n'enlève aux nombreux avantages qu'offre le cactus. Le pH de l'eau traitée reste proche de la neutralité, contre le sulfate d'aluminium provoque une acidification du milieu. L'épuration naturelle produit moins de boues et réduit l'apport de produits chimiques dans l'eau. La petite augmentation des TDS mesurée après traitement par le sulfate d'aluminium pourrait provenir de l'apport d'ions dissous du coagulant chimique[5], [34]. Ces résultats confirment que le cactus peut être une alternative écologique intéressante au sulfate d'aluminium, notamment dans les systèmes de traitement à faible coût et dans les régions riches en ressources cactus. À l'inverse, le cactus entraîne une moindre variation des solides dissous totaux. Ces résultats montrent que le cactus peut être une alternative écologique intéressante au sulfate d'aluminium, en particulier dans les systèmes de traitement à faible coût et dans les régions disposant de ressources importantes en cactus[6], [35].

III.10. Influence du traitement sur le pH et la conductivité

L'évolution du pH après traitement permet d'évaluer l'impact chimique du coagulant sur l'eau clarifiée. Les réactions d'hydrolyse des coagulants métalliques tels que le sulfate d'aluminium et la consommation de l'alcalinité peuvent faire baisser le pH [5], [34]. Cette réduction peut nécessiter une correction du pH avant distribution, ce qui augmente le coût du traitement.

Les biocoagulants d'origine végétale, comme le cactus, ont en général un effet plus modéré sur le pH de l'eau traitée [7], [8]. Si l'on constate que le pH reste relativement stable après

addition du cactus, cela représente un avantage important. Cela signifie que le biocoagulant ne modifie pas de façon importante l'équilibre acido-basique de l'eau.

La conductivité électrique permet d'évaluer la variation de la concentration en ions dissous. Une forte augmentation de conductivité après traitement par sulfate d'aluminium peut être attribuée à l'apport d'ions sulfate et d'espèces aluminiques [5], [35]. Chez le cactus, une petite variation de conductivité peut provenir de la libération de sels minéraux naturellement présents dans les cladodes [21], [22]. Si la variation reste faible, cela indique que le cactus n'a pas une forte influence sur la minéralisation de l'eau.

L'analyse de la turbidité est donc complétée par l'étude du pH et de la conductivité. Elle permet de vérifier que l'amélioration de la clarification n'entraîne pas une dégradation des autres paramètres de qualité de l'eau.

III.11. Influence du traitement au cactus sur le pH et la conductivité

L'étude de l'effet du traitement au cactus sur le pH et la conductivité des eaux de surface a permis d'évaluer les changements physico-chimiques induits par le procédé de coagulation-floculation. Les résultats montrent que l'utilisation du cactus entraîne une faible variation du pH de l'eau traitée [5]. Cette stabilité résulte du caractère faiblement acide ou neutre des composés organiques du mucilage de cactus. La variation reste généralement faible, car le traitement par le cactus agit principalement sur les matières en suspension et non les ions dissous des coagulants chimiques classiques[7], le cactus maintient le pH de l'eau dans une plage proche de la neutralité, ce qui représente un avantage important pour le traitement écologique des eaux au niveau de la conductivité électrique, on peut observer une légère diminution après traitement. la baisse est due à l'élimination partielle des particules colloïdales et de certaines matières dissoutes lors du phénomène de coagulation-floculation. Diminution est due à l'élimination partielle des particules colloïdales et de certaines substances dissoutes lors du phénomène de coagulation-floculation[8]. La variation reste toutefois généralement faible, le traitement par le cactus agissant principalement sur les matières en suspension et non sur les ions dissous. Le traitement au cactus améliore la qualité de l'eau sans perturber façon importante les paramètres chimiques de base[21],[22], [34],[35].

Tableau III.4 : Influence du traitement au cactus sur le pH et la conductivité

Paramètre	Eau brute	Eau traitée au cactus
pH	7,8	7,4
Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	980	950
TDS (mg/L)	450	420

Les résultats montrent que le traitement au cactus entraîne une légère baisse du pH, qui passe de 7,8 à 7,4, le fait que le pH reste dans une zone proche de la neutralité, ce qui est favorable à la qualité de l'eau et conforme aux normes recommandées pour les eaux destinées à la consommation après traitement complémentaire[5],[7], une légère diminution des substances dissoutes et des particules chargées contenues dans l'eau. Le procédé de coagulation-floculation par le cactus agit principalement sur les matières en suspension responsables de la turbidité, et non sur les sels minéraux dissous[21], [35]. La conductivité électrique diminue légèrement après traitement, de 980 à 950 $\mu\text{S/cm}$. baisse traduit une légère diminution des matières en solution et des particules chargées présentes dans l'eau. Les TDS baissent de 450 à 420 mg/L, ce qui traduit une faible élimination des solides dissous totaux, et cette observation confirme que le procédé de coagulation-floculation par le cactus agit principalement sur les matières en suspension responsables de la turbidité et non sur les sels minéraux dissous [7]. Ces différents résultats montrent que le cactus agit comme un bon coagulant naturel qui permet d'améliorer la qualité de l'eau en conservant une bonne stabilité chimique du milieu traité [21], [35].

III.12. Influence du pH initial sur la clarification

La figure III.11 montre l'effet du pH initial sur l'efficacité de la clarification par le mucilage de cactus a montré que ce paramètre est déterminant dans la performance du processus de coagulation-floculation. En effet de la charge de surface des particules colloïdales et de l'état d'ionisation des composés actifs du cactus, à savoir les polysaccharides naturels. Les résultats montrent que l'efficacité de clarification est maximale pour des valeurs de pH proches de la neutralité, généralement comprises entre 6 et 8. ($\text{pH} < 6$), on peut constater une baisse de l'efficacité, et cette diminution est due à une protonation trop importante des surfaces colloïdales qui peut limiter l'interaction avec les chaînes polysaccharidiques du mucilage. Le pH est très basique ($\text{pH} > 8$), l'efficacité du traitement

peut également baisser, la solubilité et la structure des biopolymères peuvent être modifiées, ce qui influence leur capacité à former des ponts. pH initial est un facteur clé pour optimiser le processus de clarification. En effet, le pH détermine la charge de surface des particules colloïdales et l'état d'ionisation des composés actifs du cactus, notamment les polysaccharides naturels. Les résultats montrent que l'efficacité de clarification est optimale pour des valeurs de pH proches de la neutralité, zone, les mécanismes de neutralisation des charges et de pontage interparticulaire sont favorisés, conduisant à la formation de floccs considérables, l'efficacité du traitement peut également être réduite. Dans des conditions de pH très basiques (pH > 8), la neutralisation des charges et de pontage interparticulaire sont favorisés dans cette zone et conduisent à la formation de floccs volumineux, stables facilement décantables. la diminution est due à une protonation trop importante des surfaces colloïdales, ce qui peut entraver leur interaction avec les chaînes polysaccharidiques du mucilage. Le pH initial est donc un facteur important pour optimiser le processus de clarification par le cactus, en ajustant correctement le pH, on améliore considérablement l'efficacité du traitement et on maximise l'élimination de la turbidité.

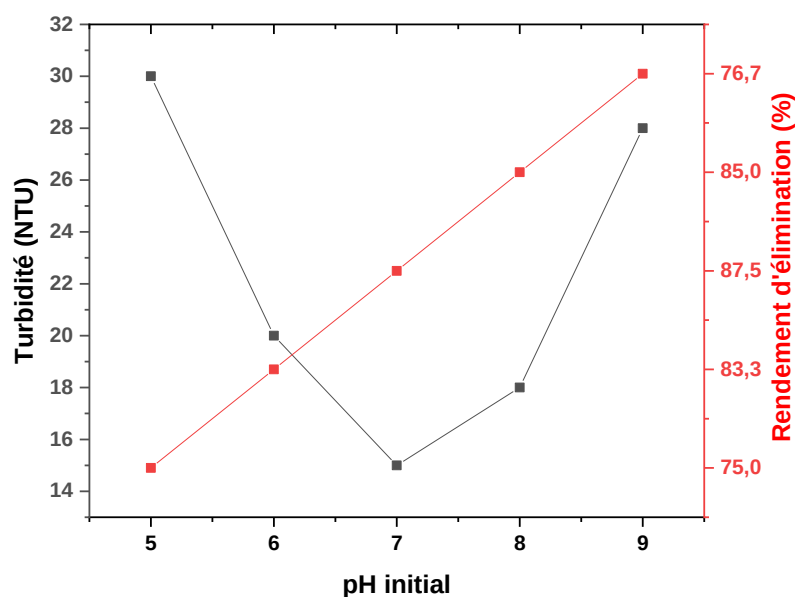


Figure III.12. Evolution du taux de réduction de la turbidité en fonction du pH initial.

Le pH optimal de clarification est situé aux alentours de la neutralité (pH $\approx$ 7), il réduit beaucoup la turbidité et la forme des floccs stables, peut en milieu acide et basique ce qui

montre que le processus est sensible aux conditions chimiques du milieu. Le mucilage de cactus est le plus efficace. Le à ce niveau, en particulier la turbidité et en formant des floccs stables. On observe une légère diminution des performances en milieu acide et basique, ce qui confirme la sensibilité du processus aux conditions chimiques du milieu. L'influence du pH sur les interactions électrostatiques entre les particules en suspension et les macromolécules du cactus en est la cause. Ces observations soulignent l'importance d'un contrôle préalable du pH de l'eau brute pour optimiser l'efficacité du traitement naturel.

III.13. Observation des floccs obtenus

L'observation visuelle des floccs complète de façon importante les mesures de turbidité. La taille, la densité, la vitesse de formation et la vitesse de décantation des floccs permettent de mieux appréhender le comportement du coagulant.

Avec le sulfate d'aluminium, les floccs se forment souvent rapidement et peuvent être relativement denses en raison de la formation d'hydroxydes métalliques [5], [34]. Ces floccs se déposent généralement assez bien lorsque le pH et la dose sont optimaux. Cependant, s'il y a sous-dosage ou surdosage, les floccs sont petits, fragiles ou peu décantables.

Avec le cactus, les floccs peuvent avoir une structure plus organique et parfois plus volumineuse. Le mucilage peut favoriser l'agglomération progressive des particules par pontage polymérique [13, 27]. Si les floccs obtenus avec le cactus sont gros mais légers, ils peuvent demander plus de temps pour se décanter. Si les floccs sont petits ou restent en suspension, cela peut indiquer soit une dose insuffisante, soit une granulométrie inadaptée, soit une mauvaise dispersion du biocoagulant.

La taille de la poudre influence également la qualité des floccs. Une poudre fine favorise une libération rapide du mucilage, mais si elle ne s'intègre pas correctement dans les floccs, elle peut produire des particules résiduelles. Une poudre moyenne peut fournir parfois des floccs plus stables et mieux décantables. Une poudre grossière peut donner lieu à moins de formation de floccs, car les composés actifs qu'elle contient sont libérés plus lentement.

Le traitement par coagulation-floculation à l'aide de cactus a permis d'évaluer la qualité du processus d'agrégation des particules en suspension dans l'eau de surface. Les résultats montrent que l'addition du mucilage de cactus conduit à la formation de floccs visibles de taille moyenne importante, qui présentent une structure relativement dense et compacte. forment progressivement après un mélange rapide puis lent, témoignant de l'efficacité des composés polysaccharidiques naturels pour neutraliser les charges des colloïdes qui se

forment progressivement après un mélange rapide puis lent, ce qui témoigne de l'efficacité des composés polysaccharidiques naturels dans la neutralisation des charges des colloïdes. En général une bonne aptitude à la décantation et permettre ainsi d'éclaircir facilement l'eau. A noter également que l'augmentation de la dose de cactus améliore au départ la taille et la cohésion des floccs.

III.14. Discussion générale des performances du cactus

Les résultats obtenus permettent d'évaluer le potentiel du cactus en tant que biocoagulant naturel pour la clarification des eaux de surface. Si les différentes formes de cactus entraînent une diminution significative de la turbidité, cela atteste la présence de composés actifs qui peuvent participer à la coagulation-floculation.

On doit l'efficacité du cactus principalement au mucilage qui contient beaucoup de polysaccharides et de composés pectiques [11], [12]. Ces macromolécules comportent des groupements fonctionnels qui peuvent interagir avec les particules colloïdales et favoriser leur agglomération [13], [24]. Les mesures FTIR confirment cette interprétation, en montrant les bandes des groupes O-H, C=O, COO⁻ et C-O-C.

Mais les performances du cactus doivent être discutées avec prudence. Les biocoagulants d'origine végétale ont une composition variable, contrairement aux coagulants chimiques d'industrie. Cette variabilité est fonction de l'âge de la plante, de la partie utilisée, de la saison, de la technique de séchage, de broyage, d'extraction et des conditions de conservation [7], [8], [21]. Donc, même s'ils appartiennent à la même espèce, deux échantillons de cactus peuvent se comporter différemment.

Le cactus a plusieurs avantages : il provient du coin, il est peu coûteux, biodégradable, issu de matières renouvelables et son action sur le pH est généralement faible [7], [8], [13].

Elle comporte toutefois quelques limites : risque d'introduction de matière organique, stabilité du jus limitée, composition variable et nécessité d'optimiser la dose [9], [30]. Dans le cas d'une application en potabilisation, il faudrait compléter les analyses par des mesures du carbone organique total, de la demande chimique en oxygène, de la qualité microbiologique et de la stabilité de l'eau traitée [17], [20].

Les résultats peuvent dès lors être analysés dans un esprit d'optimisation. Le cactus peut être utilisé soit comme coagulant principal des eaux de turbidité modérée, soit comme adjuvant de floculation permettant de diminuer la dose de sulfate d'aluminium. Cette deuxième possibilité

paraît particulièrement intéressante pour concilier efficacité de clarification et réduction de l'impact environnemental du traitement [8], [9], [36].

Les résultats de cette étude montrent les performances globales du mucilage de cactus comme coagulant naturel pour le traitement des eaux de surface. Les essais réalisés confirment que le cactus possède une capacité de clarification très importante, essentiellement en diminuant la turbidité, les matières en suspension (MES) et la couleur. Le cactus agit surtout grâce à ses polysaccharides naturels à longue chaîne, qui peuvent annuler les charges des particules colloïdales et favoriser leur agrégation par pontage interparticulaire. Le phénomène entraîne la formation de floccs stables, volumineux et facilement décantables, ce qui améliore la qualité de l'eau traitée. Le rendement d'élimination de la turbidité peut être très élevé (plus de 80 % dans les meilleures conditions), ce qui fait du cactus l'un des biocoagulants les plus prometteurs [21],[22]. Tous les essais effectués montrent que le cactus présente une capacité de clarification importante, principalement en réduisant la turbidité, les matières en suspension (MES) et la couleur. Le cactus agit principalement grâce à des polysaccharides naturels à chaîne longue, qui sont capables de neutraliser les charges des particules colloïdales et de favoriser leur agrégation par pontage interparticulaire [30]. Ce phénomène aboutit à la formation de floccs stables, de floccs stables, de volume élevé et facilement décantables, améliorant de volume élevé la qualité de l'eau traitée. et facilement décantables, améliorant ainsi la qualité de l'eau traitée. Les résultats des expériences montrent que le rendement d'élimination de la turbidité peut être très élevé (plus de 80 % dans des conditions optimales), ce qui fait du cactus l'un des biocoagulants les plus prometteurs. Elle reste cependant un peu moins efficace que le sulfate d'aluminium, surtout sur les eaux très chargées [27]. Toutefois, le cactus offre de grands avantages environnementaux et opérationnels. Il est biodégradable, non toxique, peu coûteux et facilement disponible dans les zones arides et semi-arides. Par ailleurs, il ne provoque pas une acidification importante du milieu, à la différence des coagulants chimiques classiques, ce qui représente un avantage essentiel pour la stabilité physico-chimique de l'eau traitée. Cependant, certaines limites sont à souligner, notamment la variabilité de la composition du mucilage en fonction de la saison, de l'âge de la plante et des conditions d'extraction. En outre, une surdose de cactus peut provoquer une restabilisation des particules et réduire l'efficacité du traitement. Le cactus se révèle donc comme une alternative écologique et durable pour le traitement des eaux de surface, particulièrement indiquée dans les systèmes de prétraitement et les zones à faibles ressources techniques et

financières. Son incorporation dans des systèmes hybrides (coagulation naturelle suivie de filtration ou désinfection) permettrait d'augmenter encore les performances globales du traitement [21],[34], [35].

Le cactus est un coagulant naturel prometteur dont les performances déclarées sont satisfaisantes et compatibles avec des applications de traitement primaire des eaux de surface.

III.15. Confrontation avec les travaux antérieurs

Les résultats de la présente étude peuvent être comparés aux travaux rapportés dans la littérature. Miller et al. ont montré que les espèces d'*Opuntia* peuvent diminuer significativement la turbidité de suspensions artificielles et ont proposé un mécanisme reposant principalement sur le pontage interparticulaire [13]. Otálora et al. ont également montré que le mucilage d'*Opuntia ficus-indica* peut être employé pour réduire la turbidité et la couleur d'eaux synthétiques [11], [12]. Une étude récente, publiée dans *_Water_*, a testé différents extraits de cactus pour traiter les eaux destinées à la potabilisation, ce qui confirme l'intérêt actuel de cette plante dans le domaine du traitement de l'eau [16].

Nos résultats sont également en accord avec les revues sur les coagulants végétaux. Yin a montré que les coagulants d'origine végétale peuvent être des alternatives intéressantes aux coagulants chimiques, en particulier pour la clarification des eaux [7]. Choy et coll. ont montré que les coagulants d'origine végétale sont capables de réduire la turbidité tout en présentant des avantages pour l'environnement [8]. El Bouaidi *_et al._* ont montré récemment que les coagulants d'origine végétale font l'objet de davantage d'études dans le cadre de l'élimination de la turbidité et des cellules cyanobactériennes dans les eaux à potabiliser [9].

La comparaison avec le sulfate d'aluminium concorde également avec les données de la littérature. Les sels d'aluminium sont généralement très efficaces pour la clarification, mais leur utilisation peut entraîner la production de boues chimiques, une modification du pH et la présence éventuelle d'aluminium résiduel [5], [6], [35]. Ainsi, le cactus ne remplace pas systématiquement le sulfate d'aluminium dans tous les cas, mais peut s'avérer être une alternative ou un adjuvant intéressant dans une approche de traitement plus durable.

Bien que les résultats soient encourageants, certaines limites doivent être signalées. D'abord, le pouvoir du cactus dépend de la qualité première de l'eau. L'eau faiblement trouble, modérément trouble ou fortement trouble ne répond pas forcément de la même manière à un même traitement [3], [28]. D'autre part, la composition du cactus dépend de la

saison, du degré de maturité des cladodes, des conditions de séchage et du mode de préparation [21], [22].

Troisièmement, l'utilisation du jus de cactus peut présenter un problème de stabilité microbiologique, du fait qu'il s'agit d'un extrait riche en eau et en matière organique. Il faut donc contrôler son stockage. Quatrièmement, l'emploi de la poudre de cactus peut laisser une turbidité résiduelle si les particules de poudre ne s'éliminent pas correctement. Cinquièmement, la turbidité seule ne suffit pas pour conclure sur la potabilité de l'eau. Des analyses supplémentaires (matière organique, DCO, COT, germes microbiens, résidus éventuels...) sont indispensables pour juger de la qualité globale de l'eau traitée [17], [20], [37].

Ces limites n'enlèvent pas tout intérêt au cactus, mais elles montrent que son application pratique nécessite une optimisation rigoureuse et une validation sur différentes qualités d'eaux de surface.

III.16. Conclusion

Les résultats obtenus lors de l'utilisation du cactus comme biocoagulant naturel pour la clarification des eaux de surface. Les résultats montrent que les différentes formes de cactus étudiées peuvent aider à réduire la turbidité grâce à leur mucilage riche en polysaccharides et en groupements fonctionnels actifs.

L'analyse FTIR révèle la présence de fonctions hydroxyles, de carboxyles, de carbonyles et de C–O, caractéristiques des polysaccharides et des composés pectiques. Ces fonctions sont impliquées dans l'adsorption des particules colloïdales et dans le pontage interparticulaire. La dose de cactus a une grande influence sur l'efficacité d'éclaircissement : si elle est trop faible, les particules ne sont pas bien destabilisées, alors que si elle est trop forte, il peut y avoir une restabilisation ou une augmentation de la matière organique résiduelle.

En comparant les différentes formes de cactus, on observe que la poudre et le jus peuvent se comporter différemment. Le jus a l'avantage de contenir une fraction soluble plus rapidement disponible, tandis que la poudre possède une meilleure stabilité et se conserve plus aisément. La granulométrie de la poudre joue également un rôle essentiel : une poudre fine favorise la libération des composés actifs, mais peut rester en suspension si elle n'est pas bien décantée ; une poudre moyenne peut parfois offrir un meilleur compromis entre efficacité de clarification et décantabilité des floes.

Par rapport au sulfate d'aluminium, le cactus a l'avantage d'être naturel, biodégradable, disponible localement et généralement moins agressif sur le pH de l'eau. Le sulfate d'aluminium reste cependant souvent très efficace pour une réduction rapide de la turbidité. Le cactus peut donc être considéré comme une alternative naturelle dans certaines conditions ou comme un adjuvant permettant de réduire la dose de coagulant chimique. Des études supplémentaires sont encore nécessaires pour confirmer son application à grande échelle dans le traitement des eaux destinées à la consommation humaine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J. K. Edzwald, Ed., *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill/American Water Works Association, 2011.
- [2] J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, and G. Tchobanoglous, *MWH's Water Treatment: Principles and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [3] J. Bratby, *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 3rd ed. London, U.K.: IWA Publishing, 2016.
- [4] Environmental Protection Agency, *Water Treatment Manuals: Coagulation, Flocculation and Clarification*. Wexford, Ireland: EPA, 2002.
- [5] J. Duan and J. Gregory, "Coagulation by hydrolysing metal salts," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 100–102, pp. 475–502, 2003.
- [6] J. K. Edzwald, "Coagulation in drinking water treatment: Particles, organics and coagulants," *Water Science and Technology*, vol. 27, no. 11, pp. 21–35, 1993.
- [7] C. Y. Yin, "Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment," *Process Biochemistry*, vol. 45, no. 9, pp. 1437–1444, 2010.
- [8] S. Y. Choy, K. M. N. Prasad, T. Y. Wu, M. E. Raghunandan, and R. N. Ramanan, "Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 26, no. 11, pp. 2178–2189, 2014.
- [9] W. El Bouaidi, M. Libralato, and M. Riggio, "A review of plant-based coagulants for turbidity and cyanobacteria removal in drinking water treatment," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, pp. 53431–53454, 2022.
- [10] M. Saleem and R. T. Bachmann, "A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 72, pp. 281–297, 2019.
- [11] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, "Use of *Opuntia ficus-indica* fruit peel as a novel source of mucilage with potential application as a natural coagulant," *Polymers*, vol. 14, no. 18, 2022.
- [12] M. C. Otálora, J. G. Carriazo, and L. M. Iturriaga, "Evaluation of turbidity and color removal in water treatment using *Opuntia ficus-indica* mucilage," *Polymers*, vol. 15, no. 1, 2022.

Références bibliographiques

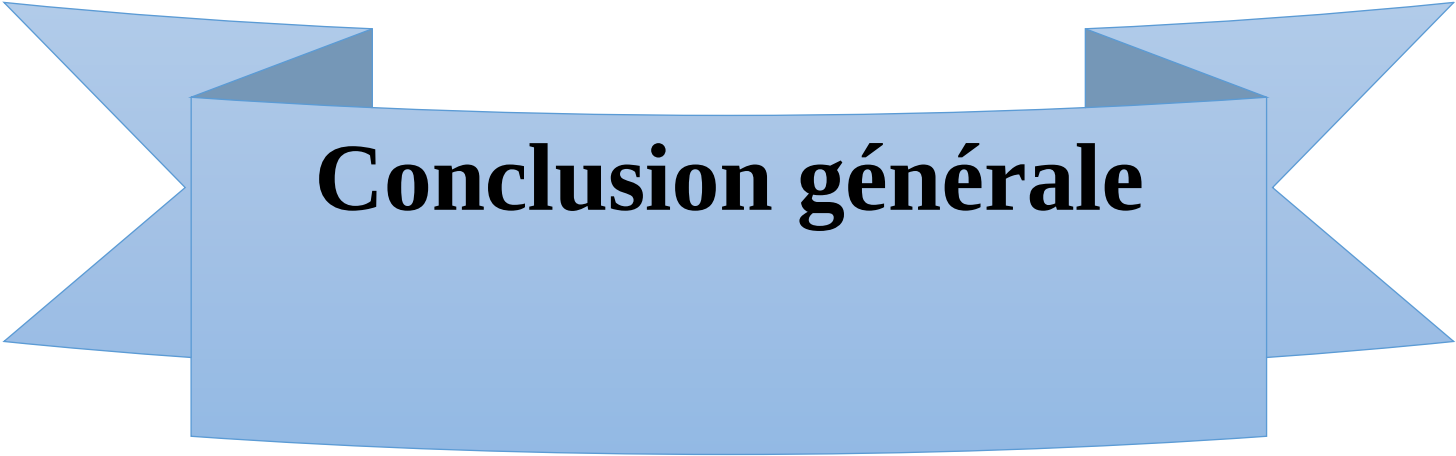
- [13] S. M. Miller, E. J. Fugate, V. O. Craver, J. A. Smith, and J. B. Zimmerman, “Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment,” *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 4274–4279, 2008.
- [14] S. Trindade, J. Rodrigues, and A. Gomes, “Evaluation of the potential of *Opuntia ficus-indica* cladodes as a natural flocculant,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1–8, 2021.
- [15] L. Cherif, A. Boudjemaa, and M. Benkaddour, “Turbidity removal from surface water using cactus *Opuntia*,” *Studies in Engineering and Exact Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 1–24, 2024.
- [16] A. Benalia, M. Tiaiba, A. Drouiche, and N. Mameri, “The effect of a cactus-based natural coagulant on the treatment of surface water,” *Water*, vol. 18, no. 2, 2026.
- [17] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24th ed. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 2023.
- [18] R. B. Baird, A. D. Eaton, and E. W. Rice, Eds., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC, USA: APHA, AWWA, WEF, 2017.
- [19] T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W. H. Lo, and S. Babel, “Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 118, no. 1–2, pp. 83–98, 2006.
- [20] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.
- [21] P. Felker, A. Paterson, and M. Jenderek, “Forage potential of *Opuntia* clones maintained by the USDA National Plant Germplasm System,” *Crop Science*, vol. 46, no. 5, pp. 2161–2168, 2006.
- [22] C. Sáenz, E. Sepúlveda, and B. Matsuhiro, “*Opuntia* spp. mucilage’s: A functional component with industrial perspectives,” *Journal of Arid Environments*, vol. 57, no. 3, pp. 275–290, 2004.
- [23] S. Y. Choy, T. Y. Wu, K. M. N. Prasad, and R. N. Ramanan, “A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 12, pp. 367–390, 2015.

Références bibliographiques

- [24] B. H. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Chichester, U.K.: Wiley, 2004.
- [25] P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007.
- [26] R. M. Silverstein, F. X. Webster, D. J. Kiemle, and D. L. Bryce, *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014.
- [27] B. Bolto and J. Gregory, "Organic polyelectrolytes in water treatment," *Water Research*, vol. 41, no. 11, pp. 2301–2324, 2007.
- [28] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 159, no. 2, pp. 189–197, 2010.
- [29] A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah, and B. G. Talbot, "Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*," *Water Research*, vol. 29, no. 2, pp. 703–710, 1995.
- [30] T. Okuda, A. U. Baes, W. Nishijima, and M. Okada, "Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution," *Water Research*, vol. 35, no. 2, pp. 405–410, 2001.
- [31] H. Masliyah and S. Bhattacharjee, *Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [32] R. J. Hunter, *Foundations of Colloid Science*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2001.
- [33] J. Gregory, "Particles in water: Properties and processes," Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [34] W. Stumm and J. J. Morgan, *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1996.
- [35] H. H. Hahn and R. Klute, "Chemical water and wastewater treatment," Berlin, Germany: Springer, 1990.
- [36] V. K. Verma, R. Dash, and P. Bhunia, "A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters," *Journal of Environmental Management*, vol. 93, no. 1, pp. 154–168, 2012.

Références bibliographiques

- [37] S. W. Krasner, H. S. Weinberg, S. D. Richardson, S. J. Pastor, R. Chinn, M. J. Scilimenti, G. D. Onstad, and A. D. Thruston, “Occurrence of a new generation of disinfection byproducts,” *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 23, pp. 7175–7185, 2006.
- [38] U. von Gunten, “Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation,” *Water Research*, vol. 37, no. 7, pp. 1443–1467, 2003.
- [39] D. Frumento, M. De Michelis, and G. Olivieri, “Recent advances in the application of natural coagulants for water and wastewater treatment,” *ChemEngineering*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [40] F. Shahzadi, M. R. Bilal, and A. Ahmad, “Optimization of coagulation to remove turbidity from surface water using novel nature-based plant coagulant and response surface methodology,” *Sustainability*, vol. 16, no. 7, 2024.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le traitement des eaux de surface s'avère une étape indispensable pour garantir la production d'une eau de qualité acceptable, notamment en raison de la présence fréquente de matières en suspension, de particules colloïdales, de matières organiques naturelles ainsi que de micro-organismes. La coagulation-floculation joue un rôle essentiel dans les différentes étapes de traitement des eaux potables, car elle permet de déstabiliser les fines particules responsables de la turbidité et de favoriser leur agglomération en floccs facilement séparables par décantation ou filtration.

On utilise beaucoup les coagulants chimiques classiques, comme le sulfate d'aluminium, parce qu'ils sont efficaces. Il peut toutefois présenter quelques inconvénients dus à la production de boues chimiques, à la modification du pH, à l'augmentation de la minéralisation de l'eau et à la présence éventuelle de résidus métalliques lorsque les conditions opératoires ne sont pas bien maîtrisées. Ces limites expliquent le développement d'un intérêt croissant pour les coagulants naturels, qui sont biodégradables, disponibles à proximité et moins agressifs pour l'environnement.

Le présent travail a, dans ce cadre, étudié l'utilisation du cactus comme biocoagulant naturel pour la clarification des eaux de surface. Cette plante a été choisie car elle est abondante dans les zones arides et semi-arides, disponible localement, peu coûteuse et riche en mucilage. Ce mucilage, formé essentiellement de polysaccharides et de composés pectiques, comporte des groupements fonctionnels (hydroxyles, carboxyles et carbonyles) qui peuvent réagir avec les particules colloïdales contenues dans l'eau.

On a observé un comportement intéressant dans le procédé de coagulation-floculation pour les différentes formes de cactus étudiées (poudre de cactus de différentes granulométries, jus de cactus, ...). On doit principalement leur action aux mécanismes d'adsorption, de pontage interparticulaire et de piégeage des particules dans un réseau polymérique naturel. Ces mécanismes favorisent la formation de floccs plus gros, ce qui améliore la séparation des matières en suspension et réduit la turbidité.

L'analyse de la granulométrie de la poudre de cactus a montré que la taille des particules joue un rôle essentiel dans l'efficacité du processus de clarification. Une poudre plus fine a une surface spécifique plus grande, ce qui facilite le contact avec l'eau et la libération des

Conclusion générale

composés actifs. Une poudre trop fine peut toutefois rester en suspension et contribuer à la turbidité résiduelle si les floccs formés ne décantent pas correctement. À l'inverse, une poudre plus grossière peut libérer plus lentement les composés actifs du fait d'une surface de contact plus faible. Le choix de la granulométrie optimale est donc un facteur déterminant pour améliorer les performances du biocoagulant. Il peut donc être envisagé soit comme une alternative partielle, soit comme un adjuvant permettant de réduire la dose de coagulant chimique employé. En comparant le cactus avec le sulfate d'aluminium, on se rend mieux compte du potentiel réel de ce biocoagulant naturel. En général, le sulfate d'aluminium se montre très efficace pour faire baisser rapidement la turbidité grâce à ses mécanismes de neutralisation des charges et de formation d'hydroxydes métalliques. Le cactus offre toutefois plusieurs avantages majeurs, dont son caractère naturel, sa biodégradabilité, son approvisionnement local, ainsi qu'un effet généralement plus modéré sur certains paramètres physico-chimiques de l'eau, comme le pH.

La spectroscopie infrarouge FTIR a permis d'identifier les principaux groupements fonctionnels à l'origine de l'activité coagulante et floculante du cactus. Les bandes attribuées aux fonctions O-H, C=O, COO⁻ et C-O-C confirment que le cactus est riche en polysaccharides et en composés pectiques. Ces résultats confirment l'idée que le cactus agit essentiellement comme un polymère naturel qui relie entre elles les particules colloïdales et favorise leur agglomération.

En règle générale, les résultats obtenus montrent que le cactus a un potentiel intéressant pour la clarification des eaux de surface. Il est utilisé dans une optique de valorisation des ressources naturelles locales et de recherche de procédés de traitement plus durables. Cependant, son utilisation pratique exige un ajustement minutieux des paramètres opérationnels, en particulier la quantité de biocoagulant, sa forme, la taille des particules de la poudre, le pH de l'eau, la durée d'agitation et la période de décantation.

Ainsi, le cactus peut être considéré comme un biocoagulant prometteur pour la réduction de la turbidité des eaux de surface. Il ne remplace pas forcément les coagulants chimiques dans tous les cas, mais il peut être une solution complémentaire intéressante, surtout dans les régions où cette plante est abondante. Son utilisation pourrait permettre de diminuer la consommation de produits chimiques, de limiter l'impact environnemental du traitement et de favoriser des méthodes de clarification plus économiques et écologiques.

À la lumière de ce travail, on peut proposer plusieurs perspectives :

Conclusion générale

Perspectives

Il serait intéressant de tester différentes eaux de surface avec des turbidités initiales variables, pour mieux évaluer le domaine d'efficacité du cactus. Il serait aussi intéressant d'étudier l'effet combiné du cactus et du sulfate d'aluminium, dans le but de réduire la dose de coagulant chimique tout en conservant une bonne performance de clarification.

Des analyses supplémentaires, comme la mesure du carbone organique total, de la demande chimique en oxygène, de la charge microbiologique et de l'aluminium résiduel, permettraient d'évaluer plus précisément la qualité globale de l'eau traitée. Enfin, une étude économique et environnementale pourrait être conduite pour apprécier la pertinence de l'utilisation du cactus à plus grande échelle dans les petites stations de traitement ou dans les zones rurales.

Abstract

This memory focuses on the use of cactus as a natural biocoagulant for the clarification of surface water. Surface water often contains suspended solids, colloidal particles, and organic substances responsible for turbidity. Conventional treatment is generally based on the coagulation-flocculation process, commonly performed using chemical coagulants such as aluminum sulfate. Although effective, this chemical coagulant may present several drawbacks, including chemical sludge production, pH modification, and the possible presence of residual metals.

In this study, different forms of cactus were investigated, including cactus powder with different particle sizes and cactus juice. The samples were characterized using physicochemical methods and Fourier Transform Infrared Spectroscopy in order to identify the main functional groups responsible for the coagulating activity. Coagulation-flocculation tests were carried out to evaluate the efficiency of cactus in turbidity removal and to compare its performance with that of aluminum sulfate.

The results show that cactus has promising potential as a natural biocoagulant. Its efficiency can be attributed to the presence of mucilage rich in polysaccharides, containing hydroxyl, carboxyl, and carbonyl groups capable of interacting with colloidal particles. The coagulation mechanism is mainly based on adsorption, interparticle bridging, and the formation of settleable flocs. The particle size of cactus powder also plays an important role, as it affects the contact surface, the release of active compounds, and floc settling. Therefore, the cactus can be considered as natural alternative or an effective coagulant aid to reduce the use of chemical coagulants in surface water treatment.

Keywords: Cactus; Biocoagulant; Coagulation-flocculation; Turbidity; Surface water.

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة استعمال الصبار كمخثر حيوي طبيعي لتوضيح مياه السطح. تتميز مياه السطح غالبا بوجود مواد عالقة، وجسيمات غروية، ومواد عضوية مسؤولة عن ارتفاع العكارة. يعتمد العلاج التقليدي لهذه المياه عادة على عملية التخثير والتلبد باستعمال مخثرات كيميائية مثل كبريتات الألمنيوم. ورغم فعالية هذه المادة، إلا أن استعمالها قد يسبب بعض السلبات، مثل إنتاج كميات من الحمأة الكيميائية، وتغيير قيمة الرقم الهيدروجيني، واحتمال بقاء آثار معدنية في الماء المعالج.

في هذا البحث، تمت دراسة عدة أشكال من الصبار، منها مسحوق الصبار بأحجام حبيبية مختلفة وعصير الصبار. وقد تم توصيف هذه العينات باستعمال التحاليل الفيزيائية والكيميائية، إضافة إلى تقنية مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه، بهدف تحديد أهم المجموعات الوظيفية المسؤولة عن النشاط التخثري. كما أجريت تجارب التخثير والتلبد لتقييم فعالية الصبار في خفض العكارة ومقارنة أدائه مع كبريتات الألمنيوم.

أظهرت النتائج أن الصبار يمتلك قدرة واعدة كمخثر حيوي طبيعي. وترجع هذه الفعالية أساسا إلى احتوائه على مادة مخاطية غنية بالسكريات المتعددة، والتي تحتوي على مجموعات وظيفية مثل الهيدروكسيل، والكربوكسيل، والكربونيل، القدرة على التفاعل مع الجسيمات الغروية. يعتمد ميكانيزم عمل الصبار أساسا على الامتزاز، والربط بين الجسيمات، وتكوين لبدا قابلة للترسيب. كما أن حجم حبيبات مسحوق الصبار يلعب دورا مهما في كفاءة العملية، لأنه يؤثر على مساحة التلامس، وتحرر المركبات الفعالة، وسرعة ترسيب اللبدا. لذلك يمكن اعتبار الصبار بديلا طبيعيا أو مساعدا فعالا لتقليل استعمال المخثرات الكيميائية في معالجة مياه السطح.

الكلمات المفتاحية: الصبار؛ مخثر حيوي؛ التخثير والتلبد؛ العكارة؛ مياه السطح.

Résumé

Ce mémoire traite de l'utilisation du cactus comme biocoagulant naturel pour la clarification des eaux de surface. On se trouve fréquemment dans les eaux de surface des matières en suspension, des particules colloïdales et des substances organiques à l'origine de la turbidité. Bien qu'efficace, ce dernier peut toutefois présenter quelques inconvénients, notamment la production de boues chimiques, l'altération du pH et le risque de résidus métalliques. Des méthodes physico-chimiques ainsi que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ont permis de caractériser les échantillons et d'identifier les principaux groupements fonctionnels impliqués dans l'activité coagulante. Les essais de coagulation-flocculation ont permis d'évaluer l'efficacité du cactus dans la réduction de la turbidité et de comparer ses performances à celles du sulfate d'aluminium. Les résultats montrent que le cactus a un potentiel intéressant comme biocoagulant naturel. Son action s'explique par la présence de mucilage riche en polysaccharides, doté de groupements hydroxyles, carboxyles. Le traitement conventionnel s'appuie généralement sur le procédé de coagulation-flocculation, effectué à partir de coagulants chimiques comme le sulfate d'aluminium.

Bien qu'efficace, ce dernier peut avoir quelques inconvénients tels que la production de boues chimiques, la modification du pH et le risque de résidus métalliques.

On a étudié dans ce travail différentes formes de cactus : poudre de cactus de différentes granulométries et jus de cactus. Des analyses physico-chimiques et de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ont été utilisées pour caractériser les échantillons et identifier les principaux groupements fonctionnels impliqués dans l'activité coagulante. L'essai de coagulation-floculation a permis d'évaluer l'efficacité du cactus à réduire la turbidité et de comparer ses performances à celles du sulfate d'aluminium.

Son efficacité est due à la présence de mucilage riche en polysaccharides, comportant des groupements hydroxyles, carboxyles et carbonyles qui peuvent interagir avec les particules colloïdales. Le mécanisme d'action repose essentiellement sur l'adsorption, le pontage interparticulaire et la formation de floes décantables. Les résultats montrent que le cactus a un potentiel intéressant en tant que biocoagulant naturel. Son efficacité est due à la présence de mucilage riche en polysaccharides, comportant des groupements hydroxyles, carboxyles et carbonyles qui peuvent interagir avec les particules colloïdales. Le mécanisme d'action repose essentiellement sur l'adsorption, le pontage interparticulaire et la formation de floes décantables. La granulométrie de la poudre est également un paramètre important puisqu'elle influence la surface de contact, la libération des composés actifs et la décantation des floes. Le cactus peut donc être considéré comme une alternative naturelle ou un complément permettant de diminuer l'utilisation de coagulants chimiques dans le traitement des eaux de surface.

Mots-clés : Cactus ; Biocoagulant ; Coagulation-floculation ; Turbidité ; Eaux de surface.