

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

**Université BLIDA 1**  
**Faculté de Technologie**

**Département Génie des Procédés**



**Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER EN GÉNIE DES PROCÉDÉS**

**Spécialité : Génie l'Environnement**

Intitulé du Mémoire

**Épuration de la margine de l'huilerie**

**« Asissen »**

Présenté par:

Melle Bouchenafa Fella  
Melle Mellas Cherifa

Encadré par:

Dr HAMITOUCHE  
Adhya-Eddine

Soutenu publiquement le 16 / 06 / 2025 devant un jury composé de :

C. ZEDDAM

Pr.USDB

Présidente

M.BEDROUNI

Dr. USDB

Examineur

A. HAMITOUCHE

DR, CRAPC

Encadrant

O. BOURAS

Pr. USDB

CO. Encadrant

Promo 2024-2025

## **Résumé :**

Les margines d'olives sont parmi les effluents liquides difficiles traiter en raison de leur composition complexe

Dans cette étude, nous avons choisi le procédé de coagulation/floculation en utilisant des produits naturels. Le rendement abattement de la turbidité et la DCO obtenus sont supérieur à 90 et 94 %, respectivement.

Cette étude a visé l'optimisation du procédé de coagulation-floculation des margines d'olive en testant l'effet de différents pH et produits naturels, afin de limiter l'impact environnemental des déchets générés.

## **Abstract:**

Olive mill wastewater (OMW) is among the most difficult liquid effluents to treat due to its complex composition.

In this study, we selected the coagulation-flocculation process using natural products. The removal efficiencies for turbidity and chemical oxygen demand (COD) reached over 90% and 94%, respectively.

This study aimed to optimize the coagulation-flocculation process for olive mill wastewater by evaluating the effects of different pH levels and natural products, with the goal of minimizing the environmental impact of the resulting waste.

## **ملخص:**

تعدّ المياه العادمة الناتجة عن عصر الزيتون من بين أكثر المياه العادمة السائلة صعوبةً في المعالجة بسبب تركيبها الكيميائي المعقّد في هذه الدراسة، تم اعتماد تقنية التثخير-التلييد باستخدام مواد طبيعية وقد أظهرت النتائج فعالية عالية، حيث تجاوزت نسبة خفض الطلب الكيميائي على الأوكسجين وإزالة العكارة 90% و94%

يهدف هذا العمل إلى تحسين أداء عملية التثخير-التلييد من خلال دراسة تأثير اختلاف قيم درجة الحموضة والمواد الطبيعية المستعملة وذلك في إطار البحث عن حلول مستدامة تحد من الأثر البيئي السلبي للمياه العادمة الناتجة عن معاصر الزيتون.



## **Remerciement**

*Nous exprimons notre profonde gratitude à **Monsieur HAMITUCHE Adh'ya-eddine**, notre encadrant, pour ses précieux conseils, son encadrement rigoureux et son accompagnement tout au long de ce travail. Nous le remercions également pour nous avoir proposé ce sujet de recherche aussi enrichissant.*

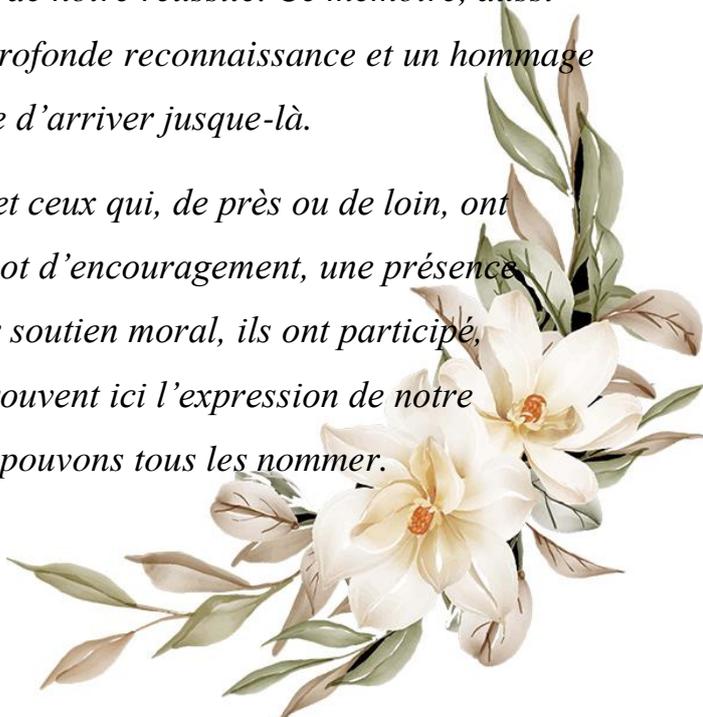
*Nos remerciements les plus sincères vont également à **Monsieur BOURAS Omar**, professeur au département de Génie des Procédés, pour sa disponibilité constante, son soutien bienveillant et son accompagnement tout au long de notre parcours universitaire.*

*Nos remerciements et notre profonde reconnaissance vont également à **Madame Karadaniz Lamia**, doctorante au laboratoire, pour son aide précieuse, son soutien constant et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance aux **membres du jury**, qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail. Leurs remarques et suggestions contribueront sans nul doute à l'amélioration de notre démarche scientifique.*

*Nos pensées les plus sincères vont à **nos parents**, véritables sources de force, de motivation et de persévérance. Leur soutien indéfectible, leurs sacrifices silencieux et leur amour inconditionnel ont été les fondements de notre réussite. Ce mémoire, aussi modeste soit-il, se veut un témoignage de notre profonde reconnaissance et un hommage à tout ce qu'ils ont accompli pour nous permettre d'arriver jusque-là.*

*Enfin, nous n'oublions pas toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. Par un mot d'encouragement, une présence bienveillante, un geste d'aide ou simplement leur soutien moral, ils ont participé, chacun à leur manière, à notre réussite. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance la plus sincère, même si nous ne pouvons tous les nommer.*



## ***Dédicaces***

***Tout d'abord, je tiens à remercier ALLAH de m'avoir donné de la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.***

*À celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car il est mon Père, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon model de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grace à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.*

*Celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, la première Femme Forte, courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte et qui cherche toujours à achever ses objectifs à tout prix ; celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être ma Mère continueront d'éclairer mon chemin.*

*À ma première amie d'enfance, mon épaule solide, Celui qui m'a révélé la véritable signification de la fraternité Et offert tant de moments de bonheur, Mes pensées les plus sincères et profondes vont à Ma sœur Habiba.*

*À mes frères Hamid et Yassine, mes soutiens fidèles et mes repères précieux, toujours là sans jamais juger, avec un mot doux et un geste d'encouragement au moment où j'en avais le plus besoin ; ce mémoire vous appartient autant qu'à moi.*

*A mes chères Rym, Yamina, Hamida, Serine, je n'oublierai jamais vos encouragements permanents et soutiens moraux, votre présence dans mon cœur est un trésor précieux*

*À mes chères cousines Houda, Rahil, Salsa, Nour et Habiba dont les encouragements constants et le soutien moral ont été une lumière apaisante tout au long de ce parcours ; votre présence dans mon cœur est un trésor que ni le temps ni l'éloignement ne sauraient effacer.*

*À mes nièces et à mon neveu, Lydia, Sofia et Rachid mes petites étoiles de tendresse et de joie, dont l'innocence et l'amour sincère ont adouci mes journées et nourri mon courage tout au long de ce chemin.*

*A mon Binôme Cherifa merci d'être la meilleure version de toi-même, ta contricution a été essentielle à cette réussite.*

*À toute personne formidable que je connaisse, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux allégués, et le fruit de votre soutien infaillible  
Enfin je dédie ce travail à moi-même, c'est le temps D'y être !*

**Fella**

*« J'ai imploré un Généreux en qui j'ai placé toute ma confiance ; celui qui espère en Le Miséricordieux ne sera jamais déçu. »*

*À mon cher grand-père, qu'Allah lui fasse miséricorde  
Le premier à avoir tenu ma main vers l'école, le premier à m'avoir dit que la connaissance est ma lumière, et que mon avenir se construit avec chaque mot que j'écris. Tu étais toujours fier de moi. Aujourd'hui, c'est moi qui suis fière d'être ta petite-fille. Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et fasse du paradis ta demeure.*

*À ma mère  
Sans tes sacrifices, tes nuits blanches et ta patience infinie, je ne serais jamais arrivée jusqu'ici. Tu étais la prière silencieuse, la force dans mes faiblesses, et l'épaule sur laquelle mon cœur trouvait du repos. Merci du plus profond de mon cœur.*

*À mon frère  
Compagnon de vie, partenaire de rêves, soutien discret depuis le tout début.  
À Pamuk  
ma petite joie, Sa présence illuminait mes journées et semait la douceur dans le chaos.  
À Sanaa  
Ma cousine de sang, ma sœur de cœur. Toujours fidèle, toujours présente.*

*À Lina  
Lina... chaleur douce dans mes moments de fatigue.*

*À Slimane  
Dans un moment de perdition, tu as été la direction. Ton soutien a marqué un véritable Tournant*

*À ma tante Najia lamia  
La première à m'avoir enseigné. Mes débuts ont fleuri entre tes mains. Merci pour ta tendresse inoubliable.*

*À mes amies "Picnics"  
Les plus beaux souvenirs de l'université : rires, fatigue, et complicité inoubliable.*

*À toutes mes amies non citées  
Votre présence a été précieuse. Merci du fond du cœur.*

*À mes enseignants  
Merci pour le savoir transmis, pour votre temps, et pour votre bienveillance. Ce succès est aussi le vôtre.*

*À fella  
Compagne de mémoire, ton prénom te va si bien ta présence a été la chaleur qui a adouci le poids de ce chemin.*

*À moi-même  
Merci d'avoir tenu bon, avancé, et cru en tes rêves malgré tout.*

*Cherifa*

## Table des matières

Résumé : .....	2
<i>Dédicaces</i> .....	4
LISTE DES ABREVIATIONS : .....	10
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS : .....	10
Introduction générale .....	11
<b>CHAPITRE I</b> .....	13
I Généralités sur l'huile d'olive .....	2
I.1 Définition des margines .....	4
I.2 Caractéristiques des margines .....	5
I.2.1 Caractéristiques physico-chimiques .....	5
I.2.2 Caractéristiques microbiologiques .....	5
I.2.3 Caractéristiques minérales .....	5
I.2.4 Caractéristiques organiques .....	5
I.3 Problématique des margines .....	6
I.4 Impact des margines sur l'environnement .....	6
I.5 Technologies de traitements des margines .....	7
I.5.1 Procédés physiques .....	8
I.5.2 Procédés biologiques .....	9
I.5.3 Procédés physico-chimiques .....	9
I.6 Coagulation-floculation .....	10
I.6.1 Mécanisme de la coagulation floculation .....	10
I.6.2 Colloïdes .....	11
I.6.3 Facteurs influençant la coagulation-floculation .....	11
I.7 Coagulants .....	12
I.7.1 Moringa Oleifera .....	12
I.7.2 Fenugrec .....	12
I.8 Les Flocculants .....	13
I.8.1 Bio-flocculant .....	13
<b>CHAPITRE II</b> .....	14
II Introduction .....	15
II.1 Echantillonnage .....	15
II.2 Prétraitement : .....	15
II.3 Matériel et produits utilisés .....	15

II.4	Caractérisation de la margine .....	16
II.5	Traitement des effluents par coagulation-floculation .....	18
II.5.1	Préparation des coagulants .....	18
II.5.2	Préparation de flocculant - Gel de cactus .....	19
II.6	Essais de coagulation - floculation (Jar-Test).....	19
II.7	Méthode expérimentale .....	20
	CHAPITRE III .....	22
III	Introduction .....	23
III.1	Caractérisation de la margine.....	23
III.2	Étude de la coagulation-floculation des margines par le Moringa et le Cactus.....	24
III.2.1	Mélange Moringa/Cactus à pH égal à 4.....	25
III.2.2	Mélange Moringa/Cactus à pH égal à 6 :.....	31
III.2.3	Mélange Moringa/Cactus à pH égal à 8 :.....	36
III.3	Essais Coagulation-Floculation par fenugrec et Cactus :.....	42
III.3.1	Mélange fenugrec/ Cactus à pH égal à 4 :.....	42
III.3.2	Mélange fenugrec/ Cactus à pH égal à 6: .....	48
III.3.3	Mélange fenugrec/ Cactus à pH égal à 8 :.....	54
III.4	Impact du pH sur la performance des couples coagulants/floculants : Comparaison entre Moringa/Cactus et Fenugrec/Cactus :.....	60
III.4.1	Couple Moringa / Cactus : .....	60
III.4.2	Couple fenugrec / Cactus :.....	61
IV	Conclusion Générale :.....	62
	Références bibliographiques .....	63

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure I-1 :Organigramme montrant le processus d'extraction de l'huile d'olive [6].....	3
Figure I-2 :Processus de coagulation floculation.....	10
Figure II-1:Photographie montrant l'huilerie Asissen (Tadmaït) .....	15
Figure II-2:Photographie montrant la margine après filtration .....	15
Figure II-4:Turbidimètre TB 300 IR.....	17
Figure II-5:Spectrophotomètre UV-Visible.....	17
Figure II-6:Multi-paramètre de type Consort C3050.....	18
Figure II-7:Kit DCO LCK114 .....	18
Figure II-8:Étapes de préparation de la poudre de graines de Moringa Oléifère .....	19
Figure II-9:Étapes de préparation de la poudre Fenugrec .....	19
Figure II-10:Etapes de préparation du gel de cactus.....	19
Figure II-11:Photographie montrant le Jar-test Lovibond utilisé .....	20
Figure II-12:Photographie montrant le Jar-test Lovibond utilisé .....	21
Figure III-1:Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs du grain de Moringa .....	26
Figure III-2:Absorbance à 274 et 395 nm en fonction de dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de la dose des grains de Moringa.....	27
Figure III-3:Evolution des rendements de la turbidité en fonction des doses du flocculant naturel pour les différentes valeurs du grain de Moringa .....	31
Figure III-4: Evolution de l'absorbance a 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs du grain de Moringa .....	32
Figure III-5:Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes doses des grains de Moringa .....	37
Figure III-6:Evolution de l'absorbance à 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes doses des grains de Moringa .....	38
Figure III-7:Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec .....	43
Figure III-8:Evolution de l'absorbance a 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs des fenugrecs.....	44
Figure III-9:Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec .....	48
Figure III-10:Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec .....	49
Figure III-11:Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec .....	54
Figure III-12:Evolution de l'absorbance a 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs des fenugrecs.....	55
Tableau I-1:Caractéristiques physico-chimiques des margines brutes [11]. .....	4
Tableau I-2:Impacts environnementaux des rejets de margines non traitées .....	7
Tableau II-1: Matériel et produits utilisés .....	16
Tableau II-2: Matériel et produits utilisés .....	20

Tableau III-1:Caractéristiques physico-chimiques de la margine utilisée .....	24
Tableau III-2:Conditions opératoires des essais de coagulation-floculation.....	25
Tableau III-3:Gamme de concentration de bio-coagulant et bio-floculant .....	25
Tableau III-4:Décantation des margines par le gel de cactus et la Moringa .....	28
Tableau III-5:Evolution de la taille des floes et du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées.....	29
Tableau III-6:Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant .....	30
Tableau III-7:Décantation des margines par le gel de cactus et la Moringa .....	34
Tableau III-8:Evolution de la taille des floes et du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées.....	35
Tableau III-9:Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant .....	36
Tableau III-10:Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant .....	39
Tableau III-11:Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant .....	40
Tableau III-12:Evolution du pH.....	41
Tableau III-13:Gamme de concentration de bio-coagulant et bio-floculant .....	42
Tableau III-14:Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus .....	45
Tableau III-15:Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus .....	46
Tableau III-16:Evolution du pH en fonction de la concentration du Fenugrec et du cactus.....	47
Tableau III-17:Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus .....	51
Tableau III-18:Evolution de la taille des floes et du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées en fonction des concentrations du Fenugrec et du cactus.....	52
Tableau III-19:Evolution du pH en fonction de la concentration du Fenugrec et du cactus.....	53
Tableau III-20:Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus. ....	57
Tableau III-21: Evolution de la taille des floes, du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées en fonction des concentrations du Fenugrec et du cactus.....	58
Tableau III-22:Evolution du pH en fonction de la concentration du Fenugrec et du cactus.....	59
Tableau III-23:Performance du couple Moringa /Cactus selon le pH .....	60
Tableau III-24:Performance du couple Moringa /Cactus selon le pH .....	61

## **LISTE DES ABREVIATIONS :**

PH Potentiel d'hydrogène, sans unité.

DCO Demande chimique en oxygène. mg/L.

DBO<sub>5</sub> Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours. mg/L.

## **LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS :**

Turbidité NTU L'unité de turbidité

Température °C Degré Celsius

Concentration g/L gramme par litre

Vitesse d'agitation tr/min Tour par minute

## Introduction générale

La pollution de l'eau, de l'air et des sols, qu'elle soit d'origine accidentelle ou volontaire, résulte des activités industrielles, agricoles, ainsi que de l'urbanisation croissante liée aux dynamiques démographiques. Elle constitue aujourd'hui une source majeure de dégradation de l'environnement et suscite un intérêt croissant à l'échelle internationale. En effet, à mesure que la population mondiale augmente et que l'industrialisation s'intensifie, les problèmes liés à la pollution deviennent de plus en plus préoccupants [1].

Parmi les secteurs industriels les plus polluants figure l'industrie oléicole, notamment en raison des quantités importantes de sous-produits qu'elle génère : les grignons (résidus solides) et les margines (effluents liquides). Ces dernières sont particulièrement toxiques en raison de leur forte concentration en composés phénoliques, reconnus pour leur faible biodégradabilité [2].

En Algérie, l'absence de solutions de traitement adaptées conduit à un rejet direct des margines dans l'environnement, sans traitement préalable. Cette situation entraîne de graves conséquences écologiques : colmatage des sols, émissions de mauvaises odeurs, altération de la qualité des terres agricoles, et forte demande en oxygène dans les milieux aquatiques [3]

Pour remédier à cette problématique, plusieurs techniques de traitement physiques, chimiques ou biologiques ont été développées. Toutefois, leur application reste limitée, notamment dans les pays en développement, en raison de leur coût élevé et de la complexité de leur mise en œuvre.

Parmi les méthodes étudiées, le procédé de coagulation-floculation se démarque par sa simplicité, son efficacité et son faible coût. Il permet d'agglomérer les particules en suspension ou colloïdales sous forme de floes, qui peuvent ensuite être séparés par décantation.

La présente étude vise à évaluer l'efficacité de ce procédé pour le traitement des margines, en mettant l'accent sur l'utilisation de coagulants naturels tels que les graines de *Moringa Oleifera*, de fenugrec et le gel de cactus.

Différentes concentrations de ces réactifs seront testées afin d'optimiser les conditions opératoires selon plusieurs paramètres physico-chimiques : pH, turbidité, matières en suspension (MES), et demande chimique en oxygène (DCO).

L'objectif final est d'identifier les meilleures conditions de traitement permettant de réduire la charge polluante des margines tout en minimisant leur impact environnemental.

Dans cette optique, le présent travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier est consacré à une revue bibliographique portant sur les margines, leur impact environnemental ainsi que les différentes techniques de traitement existantes.
- Le deuxième chapitre décrit le matériel utilisé ainsi que les protocoles expérimentaux mis en œuvre.
- Le troisième chapitre présente et analyse les résultats obtenus, accompagnés d'une discussion approfondie.
- Enfin une conclusion générale résume les principaux résultats de l'étude.

**CHAPITRE I**  
**RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

## I Généralités sur l'huile d'olive

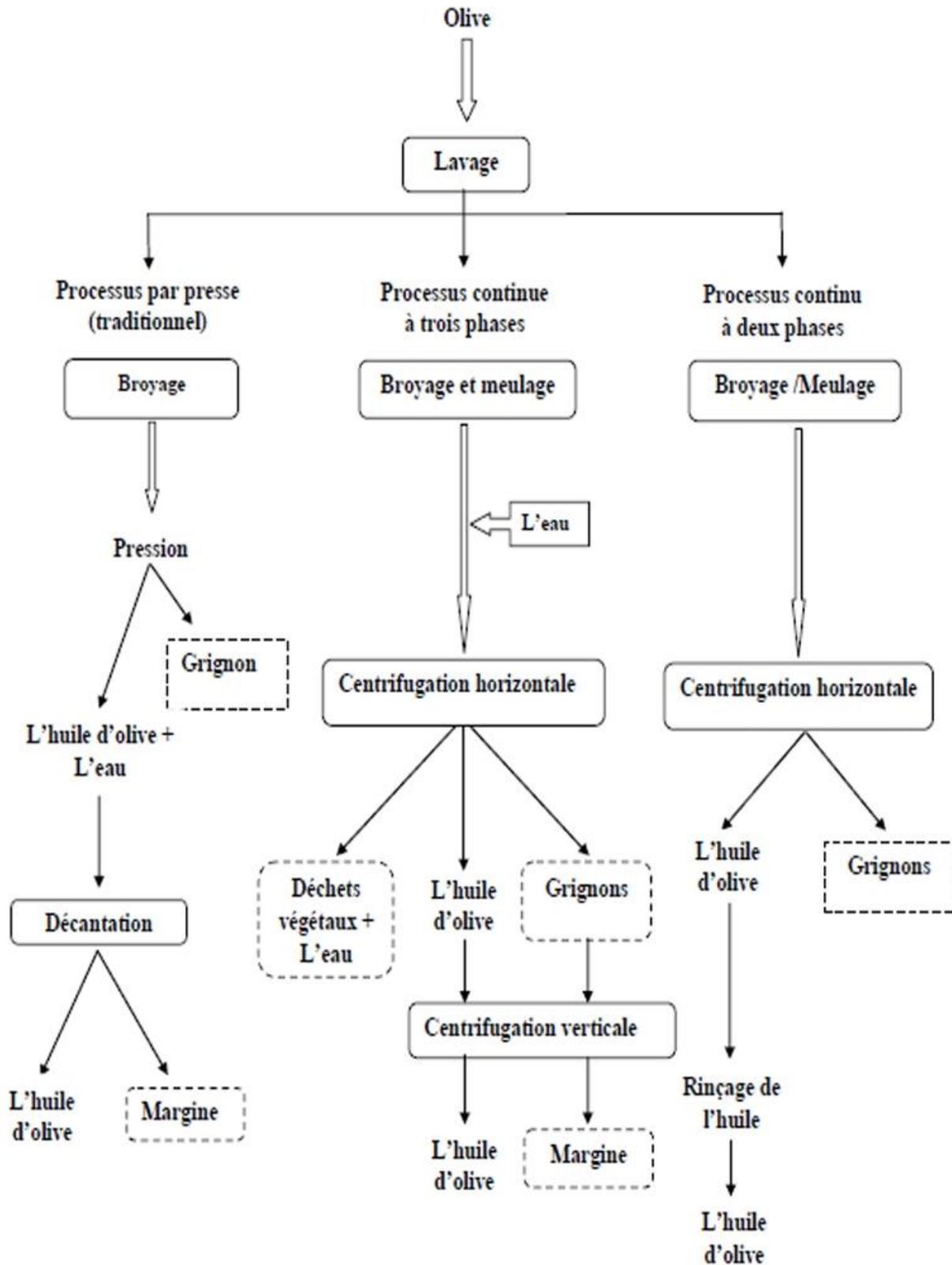
L'huile d'olive vierge peut être considérée comme le jus de fruit d'olive directement consommable, obtenue par des procédés mécaniques et physiques et dans des conditions appropriées pour ne pas altérer l'huile. Pour cela l'industrie d'huile d'olive est une activité économique importante de plusieurs pays, particulièrement, ceux du bassin méditerranéen.

La production de l'huile d'olive est basée essentiellement sur trois techniques d'extraction [4] :

- La méthode traditionnelle dite par pressage ou discontinue qui traite 8 à 10 tonnes d'olives par jour.
- La méthode moderne dite par centrifugation ou continue qui traite 30 à 32 tonnes par jour.
- Le procédé à deux phases dit « écologique »

Les opérations de base communes à chaque technique sont les suivantes [5] :

- a) Opérations de réception : ce sont les opérations préliminaires de nettoyages, de lavages et de stockage des olives pour les préparer à la suite du procédé.
- b) Opérations de broyage et d'extraction : elles se résument essentiellement dans :
  - Le broyage : vise à faire éclater la drupe pulpeuse gorgée d'huile, le concassage du noyau et l'écrasement de l'amande contenu. Cette opération s'effectue à l'aide des moulins (en pierre de marteaux ou disques).
  - Le malaxage : c'est une opération qui permet de donner à la pâte une bonne homogénéité. Elle se fait à température appropriée qui favorise la séparation d'huile. La séparation des phases, grasse (huile), solide (grignons) et aqueuse (eaux de végétation) : cette étape nécessite l'ajout de l'eau chaude.



**Figure I-1 :** Organigramme montrant le processus d'extraction de l'huile d'olive [6]

## I.1 Définition des margines

Les margines également appelées Olive Oil Mill Wastewater (OMW) sont des effluents liquides générés par l'extraction de l'huile d'olive. Généralement, 40 à 50% de ces eaux proviennent du fruit (eau de végétation), tandis que le reste de l'eau est ajoutée pendant la trituration [8].

Ces effluents se caractérisent par une couleur allant du brun au brun rougeâtre, un aspect trouble, ainsi qu'un pH fortement acide (pH = 4,30). Ils sont riches en matière organique et en composés phénoliques, ces derniers étant responsables de leur couleur et de leur toxicité.

Les margines sont également caractérisées par une odeur spécifique, souvent perçue comme nauséabonde, rappelant fortement celle de l'huile d'olive. Sur le plan physico-chimique, elles présentent des niveaux très élevés de demande chimique en oxygène (DCO) et une conductivité électrique importante, traduisant une forte charge polluante et une concentration significative en sels et en composés organiques dissous.

Le rejet direct de ces effluents dans l'environnement constitue une menace sérieuse pour les écosystèmes aquatiques et les sols [9].

Le Tableau (I.1) ci-dessous présente les principaux éléments contenus dans les margines pour les deux systèmes d'extraction (en continu et en discontinu) :

**Tableau I-1:**Caractéristiques physico-chimiques des margines brutes [11].

Paramètres	Système d'extraction	
	Discontinu	Continu
<b>pH</b>	4,5 à 5	4,7 à 5,2
<b>Conductivité électrique (mS /cm)</b>	16	8
<b>Demande Chimique en Oxygène DCO (g/L)</b>	120 à 130	45 à 60
<b>Matière en Suspension MES (g/L)</b>	1 à 2	6 à 9
<b>Graisses</b>	0,5 à 1	3 à 10
<b>Matière volatile MV (g/L)</b>	88 à 105	44 à 55
<b>Matière Sèche MS (g/L)</b>	120 à 170	50 à 60

Ces caractéristiques physico-chimiques sont assez variables en fonction des conditions climatiques, de la variété des oliviers, de la qualité des olives, du degré de maturation des fruits, du temps de conservation et de la procédure d'extraction [9,10].

## **I.2 Caractéristiques des margines**

### **I.2.1 Caractéristiques physico-chimiques**

Les margines présentent une composition chimique très complexe et hétérogène. Elles contiennent une variété de composés organiques et minéraux, de nature et de concentration très différentes.

### **I.2.2 Caractéristiques microbiologiques**

Les études microbiologiques effectuées sur plusieurs échantillons de margines ont confirmé l'absence totale de micro-organismes pathogènes. Des analyses microbiologiques ont montré que les levures et les champignons sont capables de se développer mieux que les bactéries. Ces micro-organismes supportent la salinité élevée et le pH acide caractéristiques de ces effluents et résistent plus que les bactéries aux substances phénoliques. [12]

### **I.2.3 Caractéristiques minérales**

Les margines contiennent des quantités significatives de sels minéraux dont 80% sont solubles (phosphates et chlorures) et 20% insolubles (carbonates et silicates) [13]. Les éléments les plus représentatifs sont le potassium (47%), les phosphates (14%) et le sodium (7%) [14]. Ces valeurs montrent que les margines peuvent être utilisées comme fertilisants des terres agricoles.

### **I.2.4 Caractéristiques organiques**

Les margines issues de l'extraction de l'huile d'olive présentent une composition organique complexe et fortement polluante. Elles contiennent principalement de l'huile (1 à 14 %), des polysaccharides (13 à 53 %), des protéines (8 à 16 %), des acides organiques (3 à 10 %), des polyalcools (3 à 10 %) et des composés phénoliques représentant 2 à 15 %, soit une concentration pouvant atteindre 10 g/L [11, 15-16]. La forte charge polluante de ces effluents se traduit par une demande chimique en oxygène (DCO) très élevée, variant entre 80 et 200 g/L, ce qui dépasse de 200 à 400 fois celle des eaux usées domestiques [17].

Cette richesse organique résulte de la destruction des tissus de l'olive lors des étapes de trituration et d'extraction. Les glucides sont présents sous forme de cellulose, de pectines et de sucres simples tels que la raffinose, le saccharose, l'arabinose, la xylose, le mannose et le fructose [18]. La fraction azotée est majoritairement constituée de protéines, avec une présence confirmée de tous les acides aminés, notamment l'acide aspartique, l'acide glutamique et l'arginine. Les acides organiques identifiés incluent les acides formique, oxalique, lactique, malique, oléique, palmitique et citrique [19].

Les composés phénoliques, aux structures cycliques diverses, sont présents en forte concentration dans les margines, en raison de leur faible solubilité dans l'huile par rapport à l'eau. Cette concentration s'explique par leur transfert préférentiel vers la phase aqueuse durant l'extraction [20].

D'après Céline et al. [21], ces substances proviennent principalement de l'hydrolyse enzymatique des glucosides et esters présents dans la pulpe des olives.

### **I.3 Problématique des margines**

Les margines figurent parmi les effluents les plus polluants issus de l'industrie agroalimentaire. Lorsqu'elles sont rejetées dans l'environnement sans traitement préalable, elles peuvent provoquer des impacts écologiques considérables. Selon Nefzaoui [7], la charge polluante quotidienne générée par un habitant est estimée à 54 g de DBO, tandis qu'un seul mètre cube de margines équivaut à la pollution produite par environ 1200 habitants. Cette charge polluante élevée s'explique principalement par leur forte acidité, leur richesse en matières grasses, en composés phénoliques et en matières en suspension.

### **I.4 Impact des margines sur l'environnement**

Les margines sont considérées parmi les effluents les plus polluants des industries agroalimentaires dans les pays du bassin méditerranéen.

Ces eaux fortement polluées causent de sérieux dégâts environnementaux et leur pouvoir polluant est dû principalement à des causes diverses. L'absence de méthodes de traitements adaptées pousse les propriétaires de moulins à huile à rejeter ces eaux dans la nature sans aucun contrôle avec des substances toxiques.

Le tableau (I.2) ci-dessous présente les conséquences environnementales des rejets de margine dans le milieu naturel.

**Tableau I-2:** Impacts environnementaux des rejets de margines non traitées

	<b>Causes</b>	<b>Effets</b>	<b>Références</b>
<b>Sols</b>	-Composés Phénoliques -Acidité - Huiles Et MG -MES	-La Germination Des Plantes -Pollution D'aquifère -Une Réduction De La Fertilité Du Sol	23
<b>Station D'épuration Des Eaux Usées</b>	Acidité • MES Huile Et MG Matières Organiques -Polyphénols	•Perturbation Persistances De Activité Des Boues	23
<b>Air</b>	-Composés Volatils -Oxydation	-Modifications Des Cycles Biogéochimiques -L'émission De Plusieurs Gaz	24
<b>Espèces Aquatiques</b>	Matière Organique • Huile Et MG •Composés Phénoliques	Augmentation De La DCO Formation Des Croutes Dégradation De L'esthétique Toxicité De La Microflore	24

### **I.5 Technologies de traitements des margines**

Depuis les années 1970, les margines ont attiré l'attention des chercheurs, des industriels et des institutions publiques, dans le but de développer des solutions efficaces pour leur traitement, leur valorisation ou leur élimination.

Bien qu'aucune méthode ne permette à elle seule de résoudre complètement ce problème, plusieurs techniques ont été proposées, chacune présentant des avantages et des limites selon les contextes économiques, techniques et environnementaux. Les procédés de traitement peuvent être classés selon trois catégories :

- ✓ Procédés physiques.
- ✓ Procédés biologiques.

- ✓ Procédés chimiques

### I.5.1 Procédés physiques

Les procédés physiques visent à séparer les matières organiques et minérales des margines, en agissant principalement sur leur phase aqueuse.

#### A. Processus thermique

- **Distillation** : Elle a été testée en Tunisie (ONAS, 1977) et a permis un abattement de 90 % de la DCO, mais le distillat obtenu est chargé en composés volatils et nécessiterai donc un traitement complémentaire.
- **Evaporation naturelle** : Elle est réalisée dans des bassins peu profonds et dépend des conditions climatiques. Ce procédé favorise une autoépuration biologique (levures) pouvant réduire la DBO de moitié en deux mois [25].
- **Evaporation forcée** : Les margines sont nébulisées et chauffées pour évaporer l'eau, puis brûlées. Cette méthode optimise l'espace utilisé, mais génère de mauvaises odeurs et a un coût énergétique élevé.
- **Incinération** : Elle est similaire à l'évaporation forcée et utilise la chaleur des matières organiques pour leur propre combustion. Un système modulaire développé en Italie atteint des températures de 750 à 850 °C.

#### B. Techniques membranaires

- **Ultrafiltration(UF)** :  
L'UF repose sur l'utilisation de membranes permettant la rétention des particules selon leur taille (0,002 à 0,1 µm). Sous une pression modérée, ce procédé assure un tamisage moléculaire efficace. Il est particulièrement adapté au traitement des margines très chargées, en assurant une séparation fine des composés organiques et colloïdaux [26].
- **Osmose inverse (OI)**  
L'osmose inverse est une technique de séparation membranaire qui permet, sous haute pression (jusqu'à 80 bar), de diviser une solution en deux phases : une concentrée et une autre diluée. Des essais appliqués aux margines ont permis d'obtenir un effluent limpide et incolore, démontrant l'efficacité du procédé pour une purification poussée [13].
- **Eélectrodialyse**

Ce procédé électro-membranaire repose sur le transfert sélectif des ions à travers des membranes échangeuses d'ions, sous l'effet d'un champ électrique. Il est principalement utilisé pour la récupération des composés phénoliques contenus dans les margines [13].

Les procédés membranaires permettent un traitement efficace des margines avec une faible consommation d'énergie et la valorisation de sous-produits, mais leur usage est limité par la production de déchets solides et le coût élevé des installations.

### I.5.2 Procédés biologiques

- **Le lagunage** repose sur la biodégradation naturelle des matières organiques en bassins peu profonds, sous conditions anaérobies. Ce procédé améliore la qualité physico-chimique des eaux mais exige de grandes superficies. [27]
- **Le traitement aérobie**, difficile à appliquer directement en raison de la forte charge organique, nécessite une dilution préalable. Il permet la dégradation de composés complexes (polyphénols, tanins) par des micro-organismes spécifiques, améliorant l'efficacité des traitements ultérieurs comme la digestion anaérobie. [28]
- **La digestion anaérobie** est efficace pour réduire la DCO et produire du méthane, tout en limitant les boues et les odeurs. Toutefois, son application nécessite souvent une dilution des margines et l'ajout de nutriments (urée) pour stabiliser le processus. [29]
- **Les procédés d'oxydation avancée** telles que l'ozonation, l'électrochimie (anodes en diamant ou métaux nobles) et le procédé Fenton permettent de réduire significativement la DCO et les composés organiques persistants. Bien que coûteux, ils sont utiles en prétraitement ou en complément de procédés biologiques. [30]

### I.5.3 Procédés physico-chimiques

#### A. Electrocoagulation

L'électrocoagulation est une technique dérivée de la coagulation-floculation, qui génère directement des cations métalliques dans l'eau via dissolution des électrodes, permettant la déstabilisation des polluants et leur élimination par flottation.

Dans ce contexte, **Rais et al.** [31] ont obtenu des réductions importantes : 99,7 % du phosphore, 95,8 % du potassium, 92 % de la matière organique non biodégradable, avec une baisse de 85,7 % de la conductivité. Dans une autre étude, **Hanafi et al.** [32] ont atteint jusqu'à 99 % de réduction de la

couleur, 85 % pour la DCO et 80 % pour les polyphénols, avec des margines diluées cinq fois dans les conditions optimales suivantes : pH 7, 15 min.

## B. Adsorption

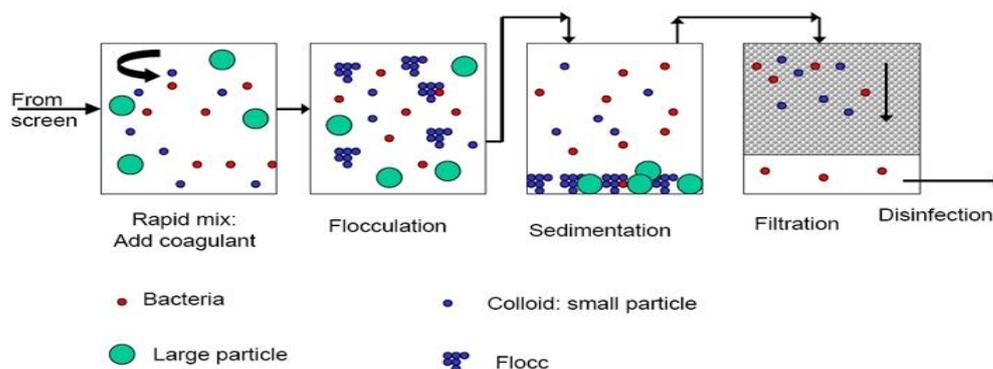
L'adsorption est un procédé de traitement reposant sur la fixation des polluants organiques sur un support solide à grande surface spécifique.

Plusieurs études ont exploré son application aux margines. En effet, **Zerrouq et al.** [33] ont utilisé une argile jaune dans l'élimination d'une margine de Fès et ont obtenu une réduction de 60 % de la DCO et une élimination totale des polyphénols, avec une légère augmentation du pH (de 5,5 à 6,35).

Pour leur part, **Jeddi et al.** [34] ont montré que la bentonite permet d'éliminer efficacement certains polyphénols (12 à 40 % pour l'acide caféique et jusqu'à 80 % pour l'acide tannique en 30 minutes) en 5 h.

## I.6 Coagulation-floculation

La coagulation et floculation sont des processus souvent indissociables. En effet, la coagulation, en diminuant les forces de répulsion entre les particules, favorise les collisions et la formation d'agrégats ; et la floculation, en permettant la croissance des agrégats accélère la séparation des phases. Ils éliminent près de 80% des matières en suspension [35].



**Figure I-2** :Processus de coagulation floculation

### I.6.1 Mécanisme de la coagulation floculation

- **Coagulation** : Elle permet de neutraliser la charge négative des colloïdes par l'ajout de coagulants, favorisant leur rapprochement. La floculation facilite ensuite l'agrégation de ces particules en flocc plus gros

- **Floculation** : Elle permet le regroupement des particules déstabilisées en floes de plus grande taille, facilitant ainsi leur séparation par sédimentation. Cependant, ces floes sont peu résistants et peuvent se briser sous l'effet d'une agitation rapide.
- **Décantation** : Elle permet alors de séparer les floes formés, dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules sédimentent au fond du bassin, formant un dépôt extrait régulièrement, tandis que l'eau clarifiée est dirigée vers les étapes suivantes du traitement. Les colloïdes, en raison de leur petite taille et de leur surface spécifique élevée, ne décantent pas naturellement. Il est donc nécessaire, pour les éliminer de les regrouper en agrégats de 10 à 100  $\mu\text{m}$ .

### I.6.2 Colloïdes

Les composés présents dans l'eau se répartissent en trois catégories :

- **Les matières en suspension (MES)** : particules d'origine minérale ou organique, ainsi que des micro-organismes. Elles sont responsables de la turbidité et peuvent être éliminées par décantation ou filtration.
- **Les matières colloïdales** : particules très fines ( $< 1 \mu\text{m}$ ), issues des mêmes sources que les MES, mais trop petites pour décanter naturellement. Elles nécessitent un traitement physico-chimique comme la coagulation-floculation.
- **Les matières dissoutes** : composés de très petite taille (ions, gaz, substances organiques solubles) non éliminables par décantation.

### I.6.3 Facteurs influençant la coagulation-floculation

- **pH** : Le pH joue un rôle crucial. Une valeur non optimale peut ralentir la coagulation. De plus, l'ajout de coagulants modifie généralement le pH, d'où la nécessité de l'ajuster.
- **Dose de coagulant** : Une dose excessive peut entraîner une re-stabilisation des particules et un surcoût, tandis qu'une dose insuffisante réduit l'efficacité du traitement. Il est parfois nécessaire d'ajuster le pH avec un acide ou une base pour atteindre les conditions optimales.
- **Vitesse d'agitation** : Une agitation rapide est nécessaire durant la coagulation pour assurer un bon contact entre les particules et les coagulants. En revanche, la floculation exige une agitation lente pour permettre la formation de floes sans les briser.
- **Température** : La température influence la vitesse de réaction. La floculation est plus efficace à température élevée ; elle est ralentie dans les eaux froides.

## **I.7 Coagulants**

Les coagulants chimiques, notamment ceux à base de fer ou d'aluminium, sont couramment utilisés pour leur efficacité. Toutefois, leur usage soulève plusieurs limites : production de boues métalliques, impact sur le pH, coût élevé et risques potentiels pour la santé (présence Résiduelle de métaux) [35].

Compte tenu des inconvénients liés aux coagulants chimiques – notamment leur toxicité potentielle, la production de boues non biodégradables et le coût élevé du traitement

Notre étude s'est orientée vers l'utilisation de coagulants naturels. Ces bio-coagulants, issus de ressources végétales, sont reconnus pour leur biodégradabilité, leur faible impact environnemental, leur non-toxicité, ainsi que leur efficacité dans l'élimination des matières en suspension et des polluants organiques.

-Dans ce travail, nous avons étudié l'efficacité de deux coagulants naturels :

### **I.7.1 Moringa Oleifera**

*Moringa Oleifera* Lam est une plante largement utilisée dans le monde pour ses nombreuses propriétés médicinales, nutritionnelles, industrielles et environnementales [36]. Parmi ses diverses applications, l'utilisation des graines de *Moringa* comme bio-coagulant naturel a suscité un intérêt croissant en traitement des eaux. Ces graines sont reconnues comme l'un des coagulants naturels non toxiques les plus efficaces [34]. Elles présentent une capacité élevée à éliminer les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd), le chrome (Cr) le chrome (Cr), et l'arsenic (As) tout en étant particulièrement performantes dans le traitement des eaux à forte turbidité [35,36]. En plus de son efficacité en coagulation, les graines de *Moringa* jouent un rôle dans l'ajustement du pH de l'eau, en réduisant son alcalinité. Elles présentent également des propriétés

Antimicrobiennes : certaines protéines contenues dans les graines inhibent la croissance de Bactéries pathogènes. Cette action antimicrobienne contribue à prévenir les maladies liées à l'eau contaminée, ce qui renforce l'intérêt de *Moringa Oleifera* dans le traitement des eaux, notamment en milieu rural ou à faibles ressources.

### **I.7.2 Fenugrec**

Le fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L.) est une légumineuse annuelle aromatique originaire des régions méditerranéennes, d'Asie et d'Afrique du Nord. Aujourd'hui, il est cultivé dans de nombreuses régions du monde [37].

Ses graines sont largement reconnues pour leurs propriétés médicinales, notamment dans la régulation du métabolisme, la réduction de l'inflammation, ainsi que dans la gestion du diabète, grâce à leur richesse en fibres, flavonoïdes et alcaloïdes [38].

Outre leurs bienfaits thérapeutiques, les graines de fenugrec présentent des propriétés coagulantes naturelles. Plusieurs études ont montré leur capacité à déstabiliser les particules colloïdales dans l'eau et à favoriser la formation de floccs, notamment grâce à leur teneur en mucilages et protéines [39]. Ces composés agissent par des mécanismes d'adsorption et de pontage, similaires à ceux des coagulants conventionnels, mais avec l'avantage d'être biodégradables, non toxiques et respectueux de l'environnement.

## **I.8 Les Flocculants**

Les flocculants sont des agents utilisés pour favoriser l'agglomération des particules déstabilisées (colloïdes) en floccs de taille suffisante, facilitant ainsi leur sédimentation. Leur usage permet une amélioration de la décantation, une meilleure qualité de l'eau traitée et une réduction du volume de boues [40]. On distingue généralement deux grandes familles de flocculants : les flocculants synthétiques, souvent à base de polymères chimiques, et les flocculants naturels, issus de matières organiques biodégradables.

### **I.8.1 Bio-flocculant**

#### **Gel de cactus (*Opuntia ficus-indica*) :**

Le gel de cactus est un liquide visqueux, vert pâle, composé à plus de 96 % d'eau. Il est obtenu après nettoyage, broyage et filtration des cladodes, et constitue un flocculant bio-organique intéressant. Il présente un pH proche de 6 et une masse volumique d'environ 1,008 kg/L, ce qui le rend adapté à des procédés de traitement naturels et peu polluants [41].

Ce flocculant végétal contient des polysaccharides capables d'interagir avec les colloïdes présents dans les eaux usées, facilitant ainsi la formation de floccs denses et décantables. Son efficacité a été démontrée dans plusieurs études, notamment dans le traitement des eaux fortement turbides et chargées en matière organique [41].

**CHAPITRE II**  
**MATERIEL ET METHODES**  
**EXPERIMENTALES**

## II Introduction

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser un procédé naturel, efficace et économique dans le but d'obtenir une eau épurée qui comporte des meilleurs rendements d'abattement des paramètres d'analyses physico-chimiques tel que la turbidité, la couleur, ... etc.

### II.1 Echantillonnage

Les margines utilisées, ils ont été récupérés de l'huilerie « Asissen » située dans la région de Tadmaït de la wilaya de Tizi-Ouzou, le mois de février 2025 (Figure 3), la margine est préalablement homogénéisée puis stockées dans des bouteilles de plastiques de capacité 5L dans la chambre froide.



Figure II-1: Photographie montrant l'huilerie Asissen (Tadmaït)

### II.2 Prétraitement :

Après transfert de l'échantillon au niveau du laboratoire de l'équipe Traitement des Effluents Liquides par voie biologique - CRAPC, nous avons procédé d'abord à la filtration de la margine d'olives pour éliminer toutes les particules grossières



Figure II-2: Photographie montrant la margine après filtration

### II.3 Matériel et produits utilisés

Le matériels et les produits utilisés sont rassemblés dans le Tableau 4 :

**Tableau II-1: Matériel et produits utilisés**

<b>Matériels utilisés</b>	<b>Produit utilisés</b>	<b>Appareillage</b>
Bécher, éprouvette, fiole jaugée, micropipette, pissette, spatule, barreau magnétique,	-Hydroxyde de sodium (NoaH) - L'acide chlorhydrique (HCl) - Graines de Moringa Oleifera, -Fenugrec - Gel de cactus - Eau distillée	Jar test, Conductimètre ; Balance de précision ; pH-mètre, Agitateur magnétique, Spectrophotomètre (UV/Visible) ; Multi-paramètre

#### II.4 Caractérisation de la margine

##### ❖ Mesure du pH

Nous avons utilisé un pH-mètre de marque OHAUS (modèle STARTER 2C), après l'avoir étalonné à l'aide de solutions tampons de pH 4, 7 et 10.

L'électrode est immergée dans un bécher contenant un échantillon de margine soumis à une agitation constante. La valeur du pH est relevée après stabilisation de la lecture.

La température est mesurée automatiquement dans les conditions normales ( $T = 25\text{ °C}$ ) lors de chaque mesure de pH.

##### ❖ Mesure de la turbidité

La turbidité exprimée en NTU, a été mesurée à l'aide du turbidimètre Lovibond TB 300 IR étalonné préalablement avec des solutions standards.

Les tests consistent à effectuer les opérations suivantes :

- ✓ L'échantillon dilué 1/100 est versé dans une cuvette propre et sèche jusqu'au trait de jauge.
- ✓ La cuvette est ensuite fermée, puis placée dans le compartiment prévu à cet effet sur le turbidimètre.
- ✓ Le couvercle de l'appareil est refermé pour assurer une mesure correcte.
- ✓ La valeur de la turbidité affichée est alors lue et enregistrée.



**Figure II-3:**Turbidimètre TB 300 IR

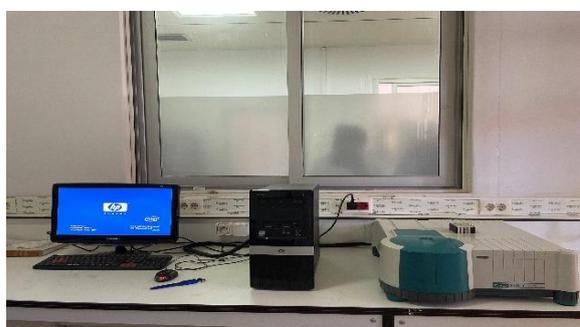
❖ **Mesure par spectroscopie UV-Visible :**

Les analyses sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre Varian Cary 50 scan piloté par un ordinateur et fonctionnant dans un domaine de longueurs d'onde allant de 200–1100 nm.

Les cuvettes utilisées en quartz ont un trajet optique de 1cm.

Pour chaque mesure, nous avons effectué les opérations suivantes :

1. Dilution de l'effluent au 1/200 avec de l'eau distillée.
2. Utiliser le logiciel du spectrophotomètre et réglage de la longueur d'onde à 274 et 395 nm.
3. Effectuer un blanc avec de l'eau distillée pour corriger les absorbances.
4. Mesurer l'absorbance de l'échantillon dilué à l'aide d'une cuvette en quartz.
5. Lire la valeur de l'absorbance affichée par l'ordinateur.



**Figure II-4:**Spectrophotomètre UV-Visible

❖ **Mesure de la conductivité :**

La conductivité électrique des échantillons a été mesurée à l'aide d'un multi paramètre Consort C3050 (figure II.6), après rinçage préalable de la sonde à l'eau distillée. Celle-ci a été immergée dans l'échantillon, et la lecture de la conductivité (en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou  $\text{mS}/\text{cm}$ ) a été effectuée après stabilisation du signal.



**Figure II-5:** Multi-paramètre de type Consort C3050

#### ❖ Mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques contenues dans un effluent par voie chimique. Elle se mesure à l'aide d'un oxydant puissant dans des conditions contrôlées en laboratoire.



**Figure II-6:** Kit DCO LCK114

## II.5 Traitement des effluents par coagulation-floculation

### II.5.1 Préparation des coagulants

- Graines de moringa oléifère

Les graines ont été décortiquées à la main pour obtenir des amandes ensuite broyées dans un mélangeur type BOMANN pour obtenir une poudre assez fine puis séchées dans l'étuve à 105 C pendant 24 heures.



### Figure II-7:Étapes de préparation de la poudre de graines de Moringa Oléifère

- **Graines de fenugrec**

Nous avons broyé les graines de Fenugrec ont été broyées dans un mélangeur de type BOMANN jusqu'à obtenir une poudre assez fine ensuite séchées dans l'étuve à 105 C pendant 24 heures.



Figure II-8:Étapes de préparation de la poudre Fenugrec

### II.5.2 Préparation de flocculant - Gel de cactus

Les cladodes (raquettes) d'OFI (cactus) ont été collectées durant le mois d'avril 2025 de Koléa wilaya de Tipaza. Une fois les épines des cladodes retirés, nous les avons soumises aux opérations suivantes (Figure 10) :

- ✓ Lavages puis découpage en petits cubes puis élimination de la peau externe
- ✓ Ecrasement avec un mortier et un pilon
- ✓ Filtration à l'aide d'un tissu pour extraire le gel visqueux.
- ✓ Conservation du gel dans un récipient en verre stérile ferme à une température de 4 °C pour les utilisations ultérieures.



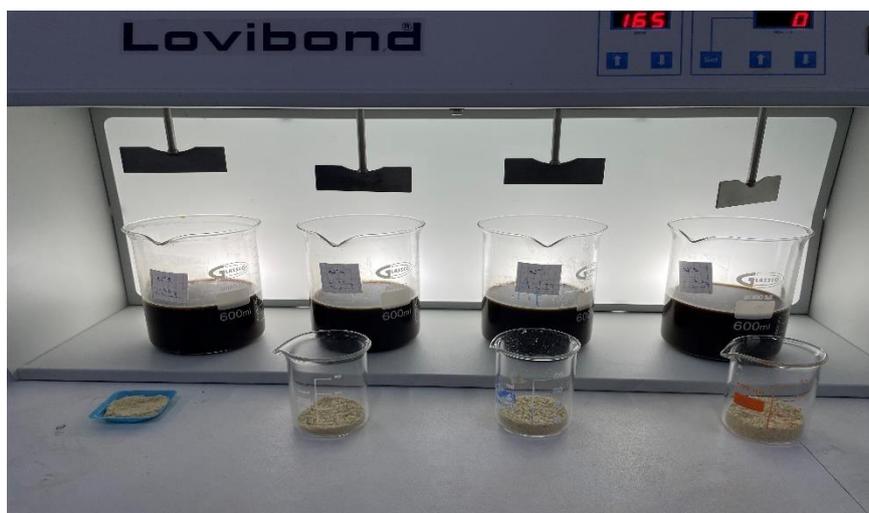
Figure II-9:Etapes de préparation du gel de cactus.

### II.6 Essais de coagulation - floculation (Jar-Test)

Lors des essais de coagulation floculation, nous avons utilisé un jar test à quatre postes.

Les essais sont réalisés dans des béchers de 1000 mL.

Le pH est ajusté par ajout du HCl (1N-10N) et NaOH (10N).



**Figure II-10:** Photographie montrant le Jar-test Lovibond utilisé

## II.7 Méthode expérimentale

Les conditions d'expérimentation de la coagulation-floculation sont résumées dans le Tableau II.2 :

Tableau II-2: Matériel et produits utilisés

Etapes	Durée	Nombre de tours par minute
Coagulation (Agitation rapide)	5 min	150 tr/min
Floculation (Agitation lente)	20 min	50 tr/min
Phase de décantation	24 heures	

- **Préparation**

Avant de procéder aux tests, il est indispensable de déterminer certaines analyses caractéristiques de la margine, telles que : la couleur, la turbidité, le pH ainsi que la température.

- **Etapes de l'essai :**

- 1- Positionnement des quatre béciers de 1000 mL dans l'équipement du Jar-Test
- 2- Remplissage des béciers par la margine
- 3- Démarrage de l'appareil à une vitesse de 150 tours par minute.
- 4- Ajout simultané dans chaque bécier de la dose coagulant (grain de Moringa ou Fenugrec) déterminée pour chaque échantillon.

- 5- Agitation continue (150 tr/mn) pendant 5 minutes
- 6- Vérification de la taille des floes
- 7- Ajout simultané dans chaque bécber de la quantité de floeulant fixée (gel de Cactus) déterminée pour chaque échantillon
- 8- Réduction de la vitesse d'agitation jusqu'à 50tr/mn pendant 20 minutes
- 9- Versement des échantillons dans des éprouvettes puis décantation pendant 24 heures
- 10- Observation visuelle puis récupération du volume du surnageant de tous les bécbers.
- 11- Mesure des paramètres suivants : Turbidité et pH final, Volume des boues puis calcul du rendement

La Figure II.13 ci-dessous illustre la méthode d'évaluation visuelle destinée à estimer la taille des floes formés suite à l'ajout de coagulants et de floeulants. Ces floes peuvent être classés selon leur taille apparente en différentes catégories allant de A à G, permettant ainsi une comparaison qualitative de l'efficacité de la floeulation.

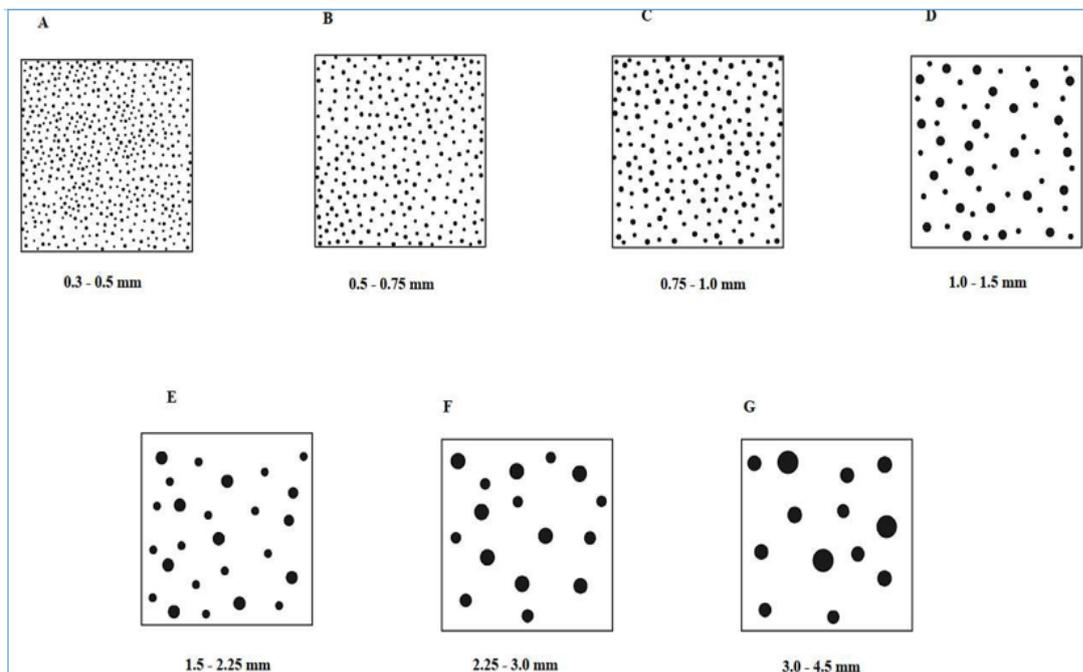


Figure II-11: Photographie montrant le Jar-test Lovibond utilisé

**CHAPITRE III**  
**RESULTATS ET DISCUSSION**

### III Introduction

Le présent chapitre expose les résultats des essais expérimentaux réalisés sur les eaux usées des margines à l'aide du procédé de coagulation-floculation, L'objectif principal était d'évaluer l'efficacité de deux coagulants naturels, la Moringa et le Fenugrec. chacun est combiné séparément avec un floculant naturel, le Cactus, afin d'améliorer la qualité de l'eau.

Pour chaque combinaison (Moringa/Cactus et Fenugrec/Cactus), des essais ont été réalisés à l'aide de l'appareil Jar Test, en faisant varier la valeur du pH initial à trois niveaux : 4, 6 et 8, afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur l'efficacité du traitement.

Pour chaque essai, plusieurs paramètres ont été mesurés :

- ✓ Le rendement d'élimination de la turbidité,
- ✓ Le rendement de l'eau traitée,
- ✓ La densité optique à 274 et 395 nm,
- ✓ Le rendement des boues générées,
- ✓ Le pH avant et après traitement,
- ✓ Ainsi que la taille et l'aspect des floes obtenus.

Les résultats ont été synthétisés dans des tableaux comparatifs, permettant d'identifier les conditions optimales pour chaque mélange. Cette étude va nous permettre de mettre en lumière l'intérêt de recourir à des solutions naturelles, efficaces et respectueuses de l'environnement pour le prétraitement des effluents oléicoles.

#### III.1 Caractérisation de la margine

Les caractéristiques physico-chimiques de la margine brute utilisée dans notre étude, sont données dans le Tableau III.1.

L'examen de ces premiers résultats de la caractérisation des margines montre qu'elles présentent une coloration brune à brune rougeâtre, qui devient de plus en plus sombre au cours de leurs stockages, avec un aspect trouble et une odeur forte qui rappelle celle d'huile d'olive.

**Tableau III-1:**Caractéristiques physico-chimiques de la margine utilisée

<b>Paramètres</b>	<b>Résultats</b>	<b>Unités</b>
<b>pH</b>	4.30	/
<b>Turbidité</b>	8010	NTU
<b>Conductivité</b>	8.75	ms/cm
<b>DCO</b>	47700	mg/L O <sub>2</sub>
<b>Phosphate</b>	835	mg/L
<b>Azote</b>	886	mg/L

L'analyse de ces résultats fait apparaître les phénomènes suivants :

- Les margines sont donc des effluents acides (pH=4.30) dû à la richesse des margines en acides organiques (acides phénoliques, acides gras, etc....)
- Cette acidité a des effets sur la flore et présente des risques de corrosion des conduites et des ouvrages.
- Les valeurs de la turbidité sont élevées 8010 NTU causée essentiellement par la présence des matières en suspension
- La valeur de conductivité retrouvée est de 8,75 ms/cm, cette valeur reflète la teneur élevée des margines en sels minéraux.
- Une charge importante de matières organiques avec une DCO de 47700 mg/L d'O<sub>2</sub>

### **III.2 Étude de la coagulation-floculation des margines par le Moringa et le Cactus**

Les essais de la coagulation-floculation ont été réalisés au laboratoire à une température de 23 °C, en utilisant un bio-coagulant (grain de Moringa Oleifera) et un bio-floculant (gel de cactus) voir les tableaux III.2-3. Ces essais ont été effectués en utilisant un Jar-test.

**Tableau III-2:** Conditions opératoires des essais de coagulation-floculation.

	Vitesse (tr/min)	Temps (min)
Coagulation	150	5
Floculation	50	20

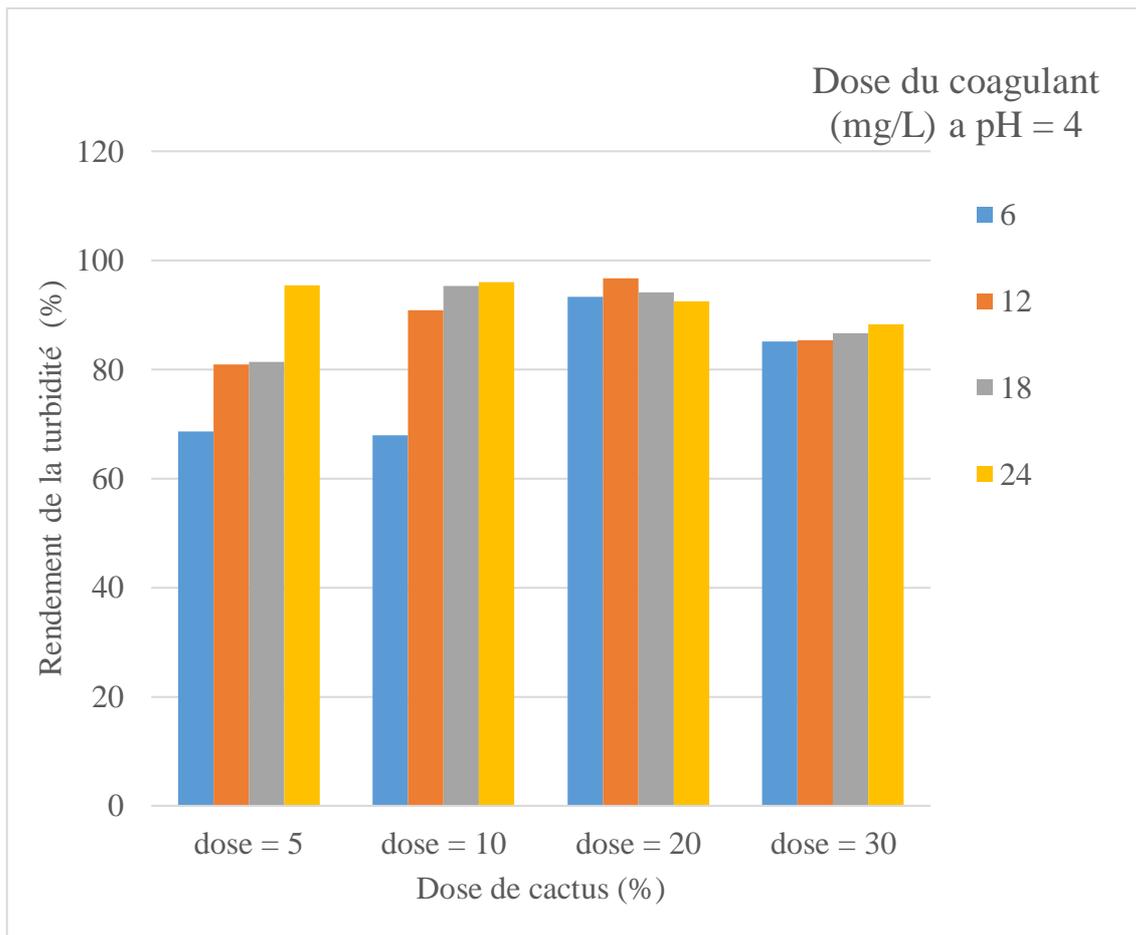
**Tableau III-3:** Gamme de concentration de bio-coagulant et bio-floculant

Dose de grain de Moringa (g/L)	6	12	18	24
Dose gel de cactus %	5	10	20	30

### III.2.1 Mélange Moringa/Cactus à pH égal à 4

Afin d'évaluer l'efficacité du procédé de coagulation-floculation pour la réduction de la turbidité des eaux usées de la margines, nous avons réalisés des essais en utilisant la poudre de graines de Moringa comme coagulant et le gel de cactus comme floculant, à une valeur de pH égale à 4.

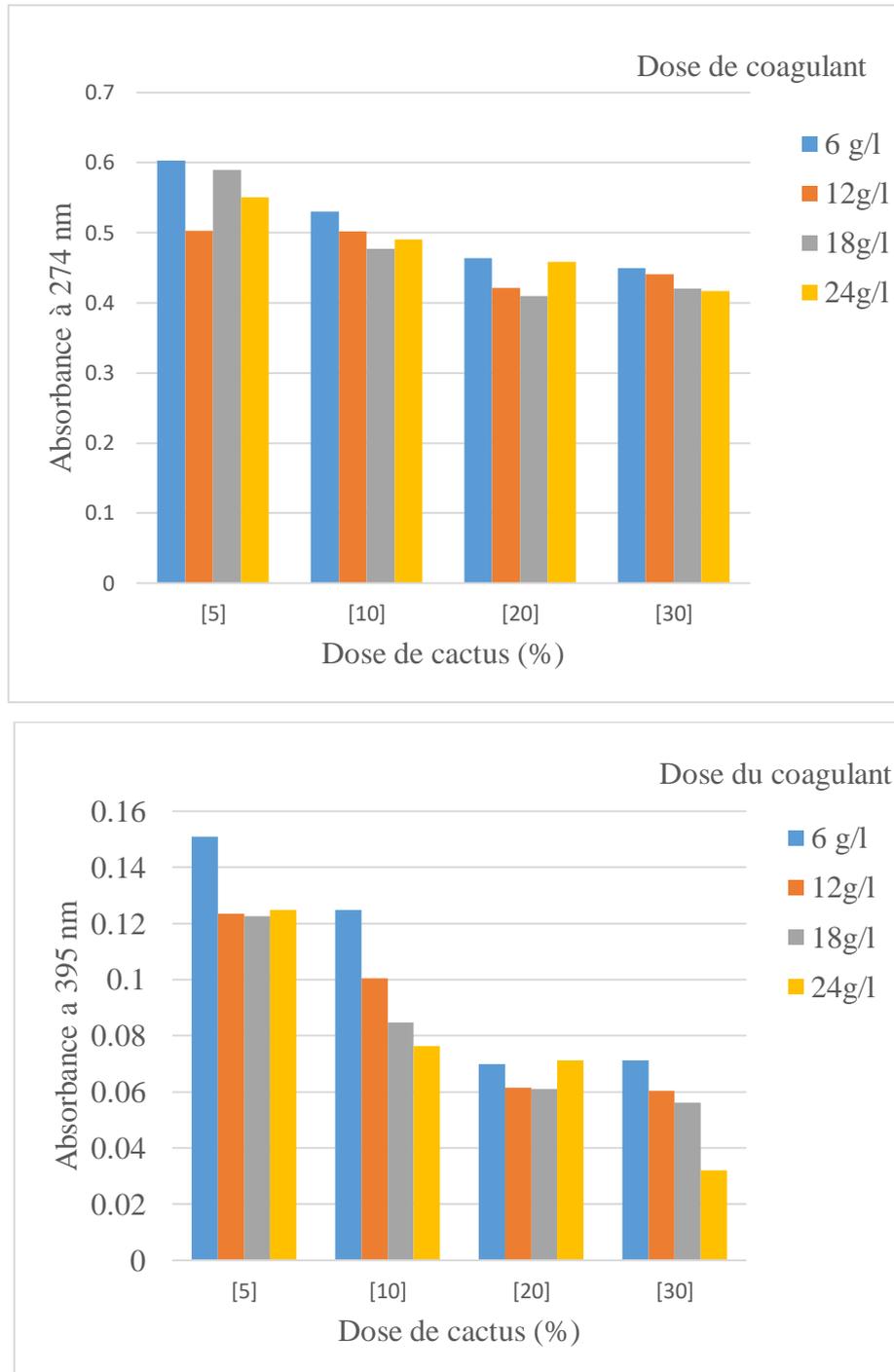
Après une décantation de 1 heure, les résultats obtenus ont été analysés et présentés dans les tableau III.4 et le **Figure III.1** Les résultats montrent que le rendement d'élimination de la turbidité l'aspect visuel des margines après décantation, la taille des floes, le rendement des boues, le rendement des eaux traitées, ainsi que les valeurs de pH (initial, ajusté, après coagulation et final).



**Figure III-1:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs du grain de Moringa

L'efficacité du mélange naturel Moringa/Cactus dans l'élimination de la turbidité des eaux usées de margine a été évaluée à pH = 4. Les résultats obtenus ont montré une réponse claire du système en fonction des concentrations appliquées, avec rendements de la turbidité variant entre 67,87 % et 95,38 %, ce qui témoigne de la capacité réelle de ce couple à agir efficacement même en milieu acide.

Le meilleur rendement a été enregistré pour une concentration de 24 g/L de poudre de moringa combinée à 5 % de gel de cactus, atteignant une réduction maximale de 95,38 %. Cette performance met en évidence l'interaction efficace entre les composés actifs des deux biopolymères, facilitant l'agglomération et la décantation des particules colloïdales.



**Figure III-2:** Absorbance à 274 et 395 nm en fonction de dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de la dose des grains de Moringa

La Figure III.2 présentent l'évolution de l'absorbance aux longueurs d'onde de 274 nm et 395 nm en fonction de la dose du coagulant utilisée, et ce pour quatre concentrations des grains de Moringa.

À 274 nm, nous observons une diminution progressive de l'absorbance lorsque la dose de coagulant augmente, ce qui indique une meilleure élimination des composés organiques aromatiques. Toutefois, à partir de 20 mg/L, la diminution devient moins marquée, suggérant une saturation dans l'efficacité de la coagulation à cette longueur d'onde.

À 395 nm, L'absorbance est globalement plus faible que celle à 274 nm. Cependant, une réduction similaire de l'absorbance est observée avec l'augmentation de la dose de coagulant, confirmant l'efficacité du traitement. À 30 mg/L, l'absorbance devient très faible, en particulier pour les concentrations les plus élevées, ce qui montre une meilleure clarification du milieu.

L'évaluation visuelle après décantation a permis de constater une clarification notable des échantillons, avec une accumulation visible de flocs au fond des récipients. Les observations détaillées sont présentées dans le Tableau III.4.

**Tableau III-4:**Décantation des margines par le gel de cactus et la Moringa

Dose de gel de cactus %	Aspect visuel des margines après décantation	Dose de grain de moringa (g/L)	Aspect
5		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Floues
10		6	Floues
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
20		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Floues
		24	Nuageux
30		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Clair

L'observation visuelle des échantillons après décantation révèle que l'eau traitée présente encore une certaine turbidité résiduelle, variable selon les concentrations utilisées. Pour des doses de Moringa comprises entre 6 et 24 g/L, l'aspect de l'eau décantée varie de presque claire à légèrement trouble, ce qui reflète une efficacité acceptable du traitement sans atteindre une transparence totale.

Après décantation, une séparation nette est observée entre une couche supérieure plus limpide et une couche inférieure contenant les sédiments accumulés.

Le rendement des boues, le rendement des eaux traitées ainsi que la taille des floccs ont été calculés et regroupés dans le tableau III 5.

**Tableau III-5:** Evolution de la taille des floccs et du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées.

<b>Dose de flocculant (%)</b>	<b>Taille des Floccs après coagulation (mm)</b>	<b>Dose de Coagulant (g/L)</b>	<b>Tailles des Floccs après floculation</b>	<b>Rendement des boues %</b>	<b>Rendement d'eau traite %</b>
<b>5</b>	1-1.5	6	1-1.5	14,28	85,71
	0.5-0.75	12	1-1.5	17,09	82,91
	2.25-3	18	2.25-3	20,95	79,05
	1-1.5	24	1-1.5	36,66	63,34
<b>10</b>	1.5-2.25	6	0.5-0.75	20	80
	1-1.5	12	0.75-0.1	26,66	73,34
	1-1.5	18	2.25-3	33,33	66,67
	2.25-3	24	2.25-3	30	70
<b>20</b>	1-1.5	6	1.5-2.25	46,66	53,34
	0.5-0.75	12	2.25-3	41,66	58,34
	2.25-3	18	3-4.5	31,66	68,34
	3-4.5	24	3-4.5	32	68
<b>30</b>	0.3-0.5	6	0.75-1	33,33	66,67
	0.5-0.75	12	2.25-3	31,66	68,34
	0.75-1	18	2.25-3	32	68
	1-1.5	24	3-4.5	32,66	67,33

Ces résultats illustrent la relation entre les concentrations du coagulant et du flocculant, la taille des floccs et le volume des boues produites. Une augmentation proportionnelle de la taille des floccs et du volume des boues avec l'augmentation des doses est observée indiquant ainsi un impact positif sur la réduction de la turbidité, avec un effet léger sur le volume d'eau épurée récupérée.

**Tableau III-6:** Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant

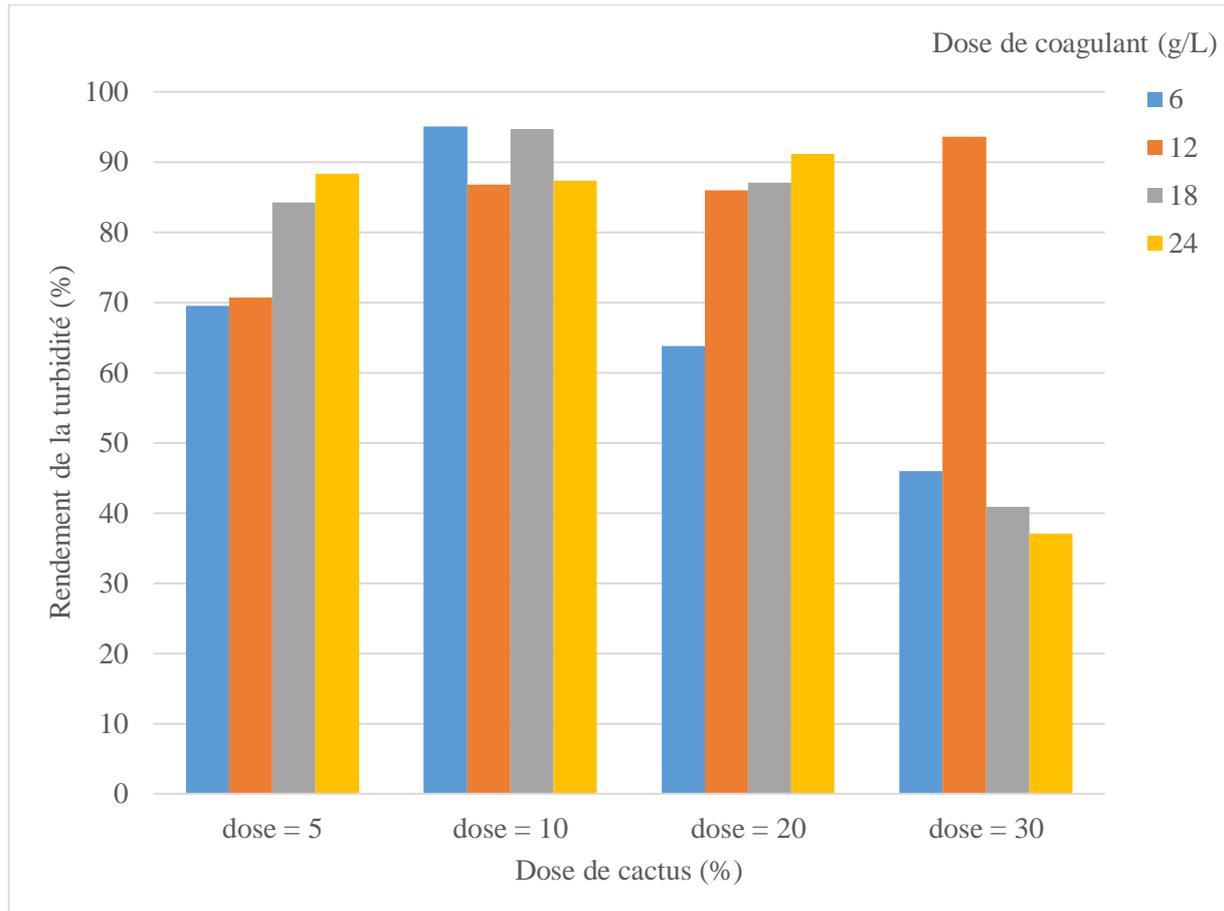
pH initial	pH ajuste	Dose coagulant (g/L)	p H après coagulation	pH ajuste	Dose floculant	pH finale
4,30	4.08	6	4.1	4.07	5	4.03
		12	4.09	/		4.05
		18	4.11	4.06		4
		24	4.13	4.05		4.05
4,30	4.06	6	4.09	/	10	4.09
		12	4.11	4.08		4.05
		18	4.12	4.06		4.01
		24	4.13	4.07		4.9
4,30	4.01	6	4.23	4.07	20	4.09
		12	4.11	4.05		4.10
		18	4.20	4.08		4.10
		24	4.12	4.07		4.11
4,30	4.06	6	4.11	4,07	30	4.13
		12	4.13	4,04		4.13
		18	4.16	4,08		4.11
		24	4.17	4,07		4.12

Lors des essais effectués à pH égal 4, il a été constaté que l'ajout de Moringa provoque une légère augmentation du pH, tandis que le gel de cactus entraîne parfois une baisse, parfois une hausse, selon la concentration utilisée.

Toutefois, ces variations restent faibles et n'ont pas permis de modifier de manière significative l'acidité initiale du milieu. Ainsi, le pH est globalement resté acide durant tout le processus.

### III.2.2 Mélange Moringa/Cactus à pH égal à 6 :

Des essais expérimentaux ont été réalisés dans les mêmes conditions que les essais précédents, mais nous avons poursuivi notre travail à pH 6. Les résultats obtenus sont regroupés dans la figure III.3.

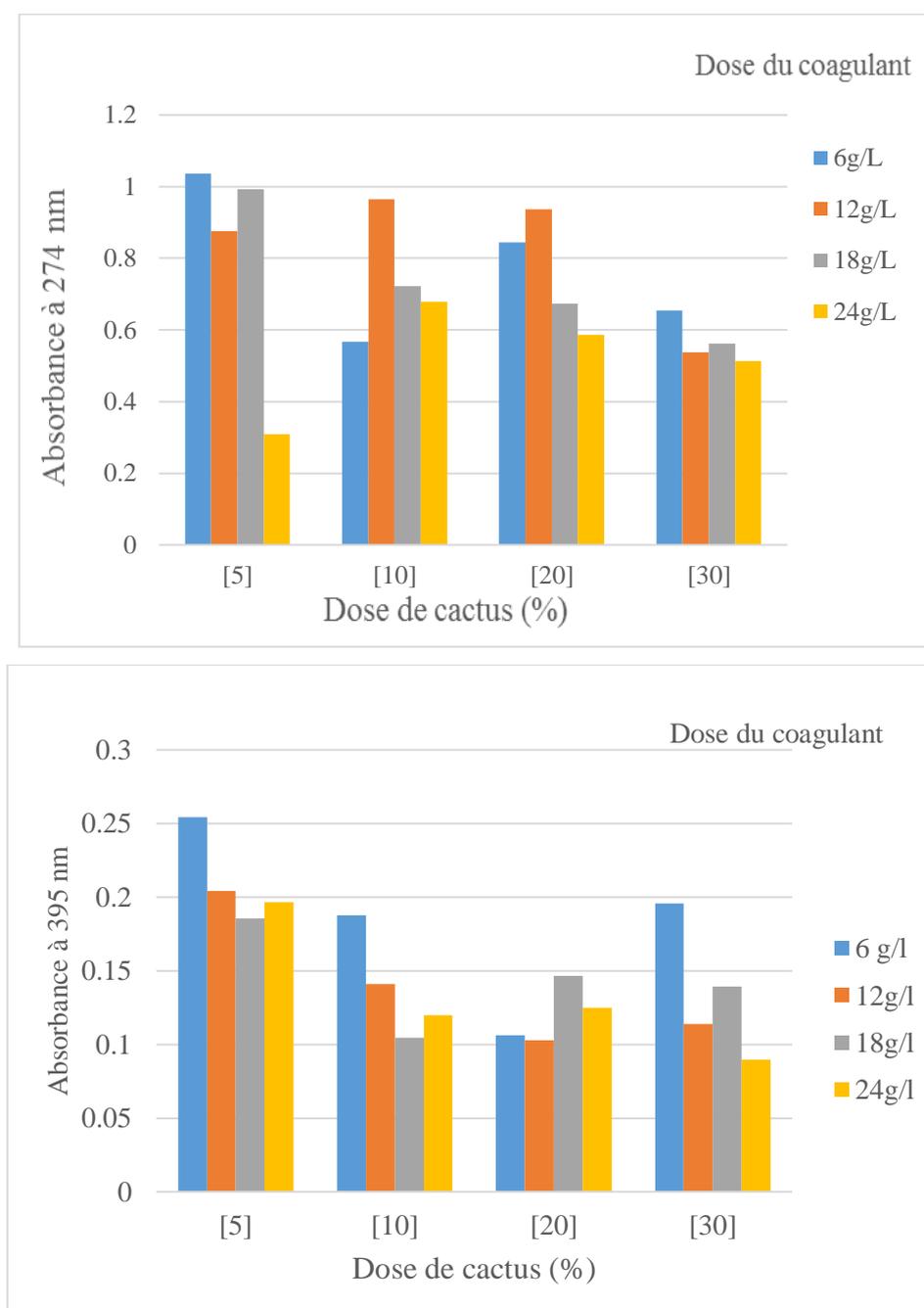


**Figure III-3:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction des doses du flocculant naturel pour les différentes valeurs du grain de Moringa

L'analyse des histogrammes représentant les rendements de la turbidité montre une variation significative selon les concentrations utilisées, avec des valeurs comprises entre 37,05 % et 95,01 %. Ces résultats illustrent l'efficacité importante du couple Moringa/Cactus dans le procédé de coagulation-floculation des particules colloïdales en suspension.

Les meilleurs rendements ont été obtenus pour la concentration égale à 18 g/L, avec une réduction maximale de la turbidité atteignant 95,01 %. Cette performance confirme la capacité des coagulants/floculants naturels à améliorer de manière notable la qualité des eaux usées oléicoles épurées.

L'analyse de l'absorbance à 274 et 395 nm a permis de constater les choses suivants :



**Figure III-4:** Evolution de l'absorbance a 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs du grain de Moringa

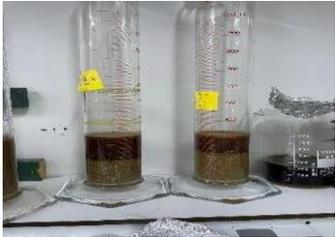
Les deux histogrammes indiquent clairement l'évolution de l'absorbance à 274 nm et 395 nm pour différentes doses des grains de moringa et de cactus.

À 274 nm, nous observons que l'absorbance diminue avec l'augmentation de la dose de flocculant, en particulier entre 5 et 10 mg/L, ce qui indique une meilleure élimination des matières organiques. L'efficacité maximale semble autour de 20 mg/L, au-delà de laquelle les résultats se stabilisent. La concentration de 24 g/L présente une réduction plus significative, montrant une meilleure efficacité du flocculant à forte concentration.

À 395 nm, nous relevons la même tendance d'évolution, une baisse de l'absorbance quand la dose de moringa augmente. Toutefois, les valeurs d'absorbance restent faibles, ce qui suggère que les composés absorbant à cette longueur d'onde sont moins présents ou mieux éliminés dès faibles doses. À 30 % de cactus, les absorbances sont relativement proches pour toutes les concentrations, suggérant une efficacité similaire à forte dose.

L'aspect visuelle après l'étape de la décantation, a permis de confirmer la qualité du traitement, les résultats obtenus sont relevés dans le tableau III. 7

**Tableau III-7:**Décantation des margines par le gel de cactus et la Moringa

Dose flocculant naturel %	Aspect visuel des eaux après décantation	Dose coagulant Naturel (g/l)	Aspect
5		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
10		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
20		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
30		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux

L'observation visuelle des échantillons après décantation révèle que l'eau traitée présente encore une certaine turbidité résiduelle, variable selon les doses du couples coagulant/flocculant utilisées. Pour des doses de Moringa comprises entre 6 et 24 g/L, l'aspect de l'eau décantée varie de presque claire à légèrement trouble, ce qui reflète une efficacité acceptable du processus sans atteindre une transparence totale. Après 24 heures de décantation, une séparation nette est observée entre une couche supérieure plus limpide et une couche inférieure contenant les sédiments accumulés.

Les rendements des boues, des eaux traitées ainsi que la taille des floccs ont été calculés puis présenté dans le Tableau III. 8.

**Tableau III-8:** Evolution de la taille des floes et du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées

Dose flocculant naturel %	Taille des floes après coagulation (mm)	Concentration du gel de cactus (%)	Taille des floes après floculation (mm)	Rendement des boues (%)	Rendement de l'eau traitée (%)
5	0,3-0,5	6	0,5-0,75	55,71	44,29
	0,75-1	12	0,75-1	53,33	46,67
	1-1,5	18	0,75-1	50	50
	2,25-3	24	1,5-2,25	56,66	43,34
10	0,75-1	6	1,0-1,5	16,66	83,34
	0,3-0,5	12	1,5-2,25	35	65
	3-4,5	18	0,75-1	51,66	48,34
	2,25-3	24	3-4,5	48,33	51,67
20	0,3-0,5	6	0,5-0,75	43,33	56,67
	0,5-0,75	12	0,75-1,0	56,66	43,34
	0,75-1	18	3-4,5	53,33	46,67
	1-1,5	24	1,5-2,25	66,66	33,34
30	0,3-0,5	6	2,25-3	76,66	23,34
	0,5-0,75	12	2,25-3	70	30
	0,5-0,75	18	3-4,5	48,33	51
	0,75-1	24	3-4,5	63,33	36,66

L'analyse des données met en évidence une augmentation proportionnelle de la taille des floes et du volume des boues avec l'augmentation des concentrations de coagulant et de flocculant utilisées. Les résultats montrent clairement qu'une élévation des doses de poudre de Moringa et du gel de Cactus entraîne une croissance significative de la taille des floes ainsi que du volume des boues produites. Cette relation directe entre la quantité de coagulant/flocculant et la taille des floes constitue un facteur clé pour comprendre l'impact du traitement sur la réduction de la turbidité et sur le volume des boues générées. Toutefois, il convient de noter que l'augmentation du volume des boues peut entraîner une légère diminution du volume d'eau traitée récupérable.

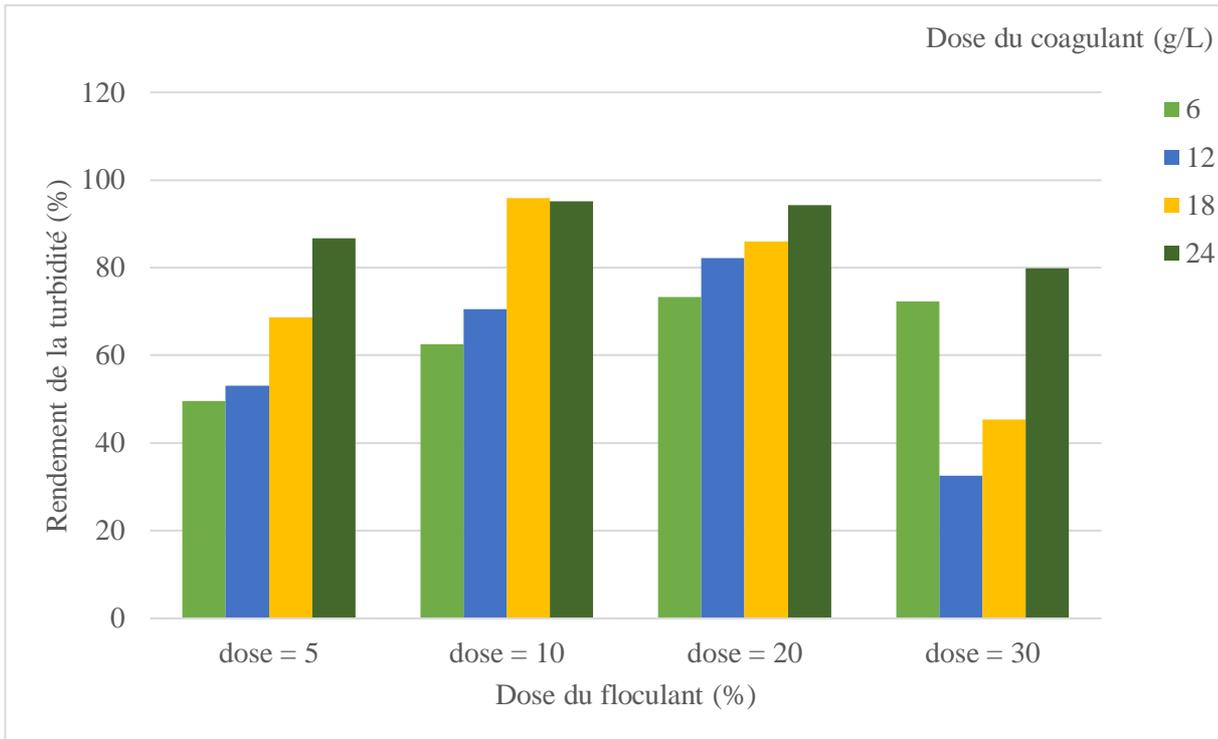
Lors des essais, il a été observé que l'ajout du coagulant Moringa provoque une légère augmentation du pH, tandis que l'ajout du flocculant Cactus entraîne des variations modérées du pH, avec des hausses ou des baisses selon la concentration utilisée. Cependant, ces fluctuations restent faibles et n'impactent pas significativement l'efficacité du processus de coagulation-floculation, comme l'illustrent les données présentées dans le tableau III.9.

**Tableau III-9:** Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant

pH initial	pH ajusté	Dose du coagulant (g/L)	pH après coagulation	pH ajusté	Dose du floculant	pH final
4,30	6,01	6	6,11	6,03	5	6
		12	6,08	6,03		5,64
		18	6,08	6,03		5,68
		24	6,05	6,03		5,78
4,30	6,01	6	6,11	6,08	10	5,16
		12	6,11	6,07		5,17
		18	6,11	6,08		6,12
		24	6,11	6,08		6,16
4,30	6,01	6	6,16	6,06	20	5,44
		12	6,10	6,07		5,98
		18	6,11	6,09		6,02
		24	6,11	6,08		6,02
4,30	6,02	6	6,14	6,03	30	5,95
		12	6,10	6,06		4,77
		18	6,08	/		6,16
		24	6,07	/		4,98

### III.2.3 Mélange Moringa/Cactus à pH égal à 8 :

Des essais expérimentaux ont été réalisés dans les mêmes conditions que les essais précédents, mais nous avons poursuivi notre travail à pH égal à 8. Les résultats obtenus sont regroupés dans la figure III.5.

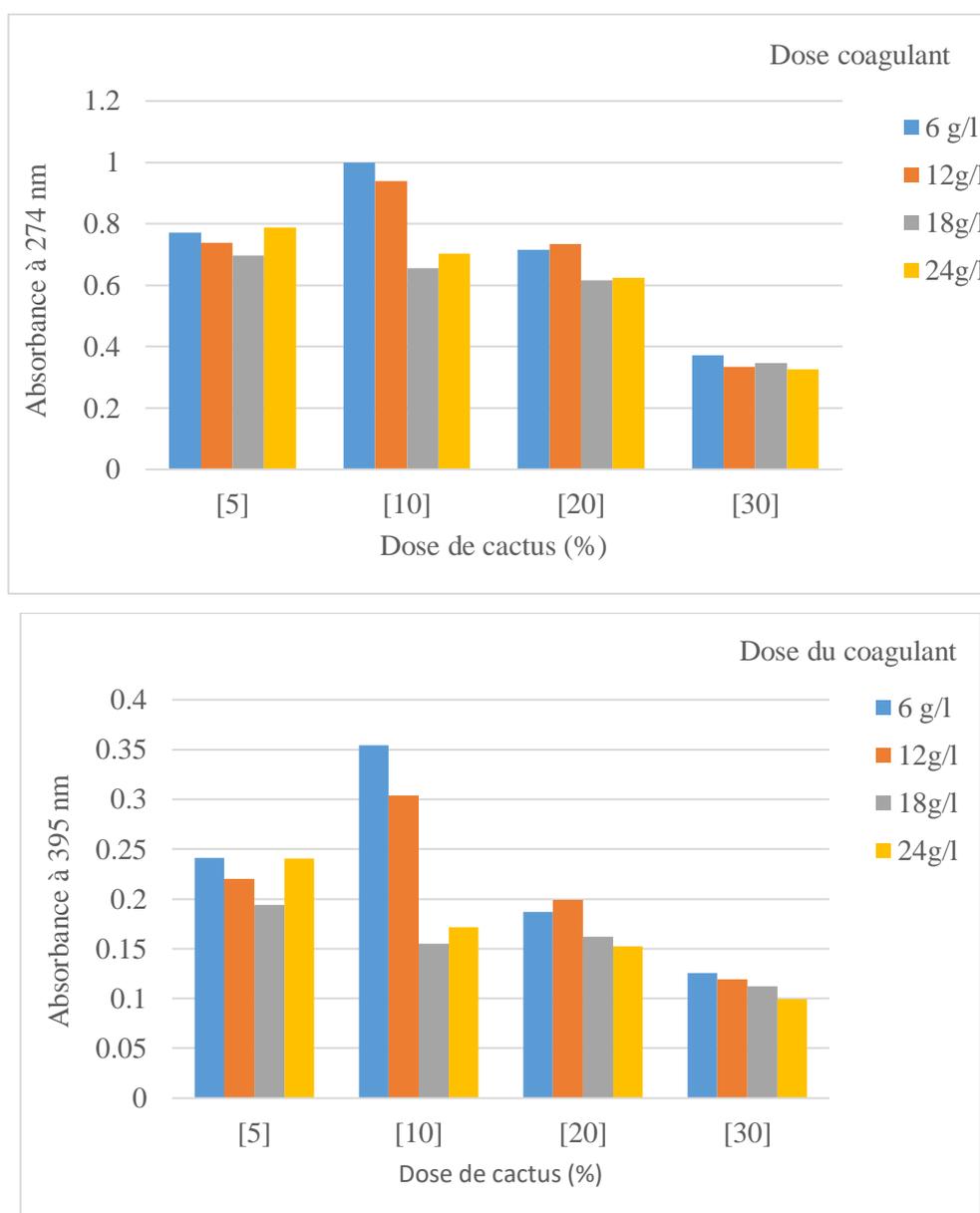


**Figure III-5:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes doses des grains de Moringa

Ces résultats montrent que les rendements d'élimination de la turbidité varient entre 53,07 et 95,13 %, ce qui témoigne de l'efficacité du mélange Moringa/Cactus dans le traitement des eaux.

Le rendement maximal de réduction de la turbidité, atteignant 95,13 %, a été observé pour des concentrations de 18 g/L de Moringa et 24 % de Cactus.

L'analyse par UV-Visible a 274 et a 395 nm, permet d'obtenir les informations suivantes :



**Figure III-6:** Evolution de l'absorbance à 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes doses des grains de Moringa

Les histogrammes illustre l'évolution de l'absorbance à 274 nm et 395 nm pour les différentes doses de grain de moringa et du cactus.

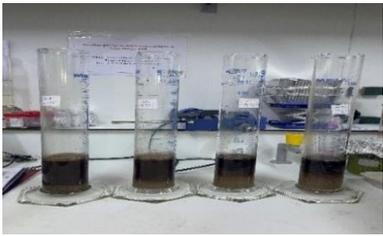
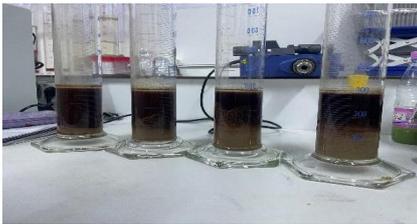
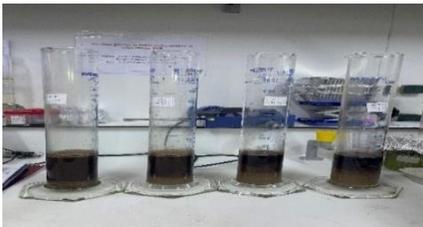
L'absorbance à 274 nm, associée principalement à la présence de composés organiques aromatiques, montre une tendance générale à la baisse avec l'augmentation de la dose du coagulant. Cette réduction

est particulièrement marquée à 30 %, indiquant une bonne efficacité d'élimination des matières organiques à cette dose.

A 395 nm, cette longueur d'onde qui reflète d'autres types de matières organiques ou des particules colloïdales, l'absorbance reste globalement faible mais montre une variabilité plus marquée selon les doses utilisées.

L'observation visuelle des échantillons permet de déduire les informations suivantes regroupées dans les tableaux III.10-12.

**Tableau III-10:** Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant

Dose de gel de cactus %	Aspect visuel des margines après décantation	Dose de grain de moringa (g/L)	Aspect
5		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Clair
10		6	Clair
		12	Nuageux
		18	Clair
		24	Clair
20		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Clair
		24	Nuageux
30		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Clair

Après 24 heures de décantation, nous observons une séparation nette en deux phases : une phase inférieure correspondant aux boues, et une phase supérieure, plus limpide, représentant l'eau traitée (surnageant).

Les rendements volumiques de ces différentes phases, ainsi que la taille des floccs et leur évolution, sont présentés dans le Tableau III.11.

**Tableau III-11:** Evolution du pH en fonction des concentrations en coagulant-floculant

<b>Dose de floculant (%)</b>	<b>Taille des floccs après coagulation (mm)</b>	<b>Dose de coagulant (g/L)</b>	<b>Tailles des floccs après floculation</b>	<b>Rendement des boues</b>	<b>Rendement de l'eau traite</b>
<b>5</b>	0,3-0,5	6	0.5-0.75	86.67	13.33
	0,75-1	12	0.75-1	82.4	17.6
	1-1,5	28	0.75-1	72.34	27.66
	1,5-2,25	24	1-1.5	56.67	43.33
<b>10</b>	0.3-0.5	6	0.75-1	85.67	14.33
	0,5-0,75	12	0.75-1	77.34	22.66
	0,75-1	18	1-1.5	66.67	33.33
	0,75-1	24	1-1.5	53.34	46.66
<b>20</b>	0.3-0.5	6	0.5-0.75	40	60
	0.3-0.5	12	0.5-0.75	63.33	36.67
	0.5-0.75	15	0.75-1	66.67	33.33
	0.5-0.75	24	0.75-1	60	30
<b>30</b>	0.5-0.75	6	0.75-1	43.34	56.66
	0.5-0.75	12	0.75-1	16.67	83.33
	0.75-1	18	1-1.5	26.67	73.33
	1-1,5	24	1.25-2.25	46.67	53.33

L'analyse des données du Tableau III.11, révèle que la taille des floccs formés après les étapes de coagulation et de la floculation, le rendement en boues, d'eau traitée ainsi que les caractéristiques visuelles des effluents varient de manière significative en fonction des concentrations en coagulant et en floculant utilisées.

La taille des floccs observée après la coagulation est inférieure à celle obtenue après la floculation. En effet, le coagulant naturel agit principalement par neutralisation des charges électriques des particules colloïdales, favorisant ainsi une agglomération rapide mais initiale des particules. En revanche, la taille des floccs augmente avec augmentation des concentrations du Moringa et du cactus. L'augmentation de la taille des floccs s'accompagne d'une élévation du volume des boues produites, ce qui réduit d'autant le pourcentage de volume d'eau traitée récupérée.

Le pH joue un rôle déterminant au cours du processus de coagulation-floculation, influençant directement les mécanismes de déstabilisation colloïdale. Pour cela nous avons effectué des mesures de pH après chaque étape. Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau III.12.

**Tableau III-12:**Evolution du pH

pH initial	pH ajuste	Dose coagulant (g/L)	pH après coagulation	pH ajuste	Dose floculant	pH finale
4,30	8,02	6	7.11	8.03	5	7.14
	8.02	12	7	8.02		6.42
	8.02	18	6.91	8.01		6.78
	8.02	24	7	8.02		6.62
4,30	8.02	6	7.39	8.01	10	6.16
	8.02	12	7.25	8.01		6.07
	8.02	18	7.09	8.04		6
	8.02	24	7.07	8.02		6.02
4,30	8.02	6	7.82	8.03	20	6.86
	8.02	12	7.05	8.03		6.71
	8.02	18	7.59	8.01		6.59
	8.02	24	7.58	8.03		6.39
4,30	8.01	6	7.88	8.02	30	6.53
	8.01	12	7.67	8.03		6.85
	8.01	18	7.56	8		6.22
	8.0	24	7.37	8.04		6.52

Ces résultats montrent que l'augmentation de la dose de Moringa n'as pas provoqué une grande diminution du pH. Cela signifie que l'emploi des graines de Moringa dans la purification de l'eau a un impact négligeable sur son pH et donc il peut être utilisé comme coagulant. En revanche, le jus de

cactus a provoqué une baisse du pH en raison du caractère acide du gel utilisé, ou le pH gel de cactus est égal à 6,5.

### III.3 Essais Coagulation-Floculation par fenugrec et Cactus :

Suite à l'étude menée sur l'association Moringa/Cactus, une nouvelle combinaison de bio-réactifs a été explorée : le fenugrec en tant que bio-coagulant, associé au gel de cactus comme bio-floculant.

Les essais ont été réalisés dans des conditions expérimentales comparables, avec une variation contrôlée du pH à trois niveaux (4, 6 et 8), dans le but d'analyser l'effet de ces agents naturels sur l'évolution des caractéristiques physico-chimiques d'un effluent chargé en matières organiques et en turbidité.

Les concentrations utilisées pour chaque réactif sont présentées dans le Tableau III.3.

**Tableau III-13:** Gamme de concentration de bio-coagulant et bio-floculant

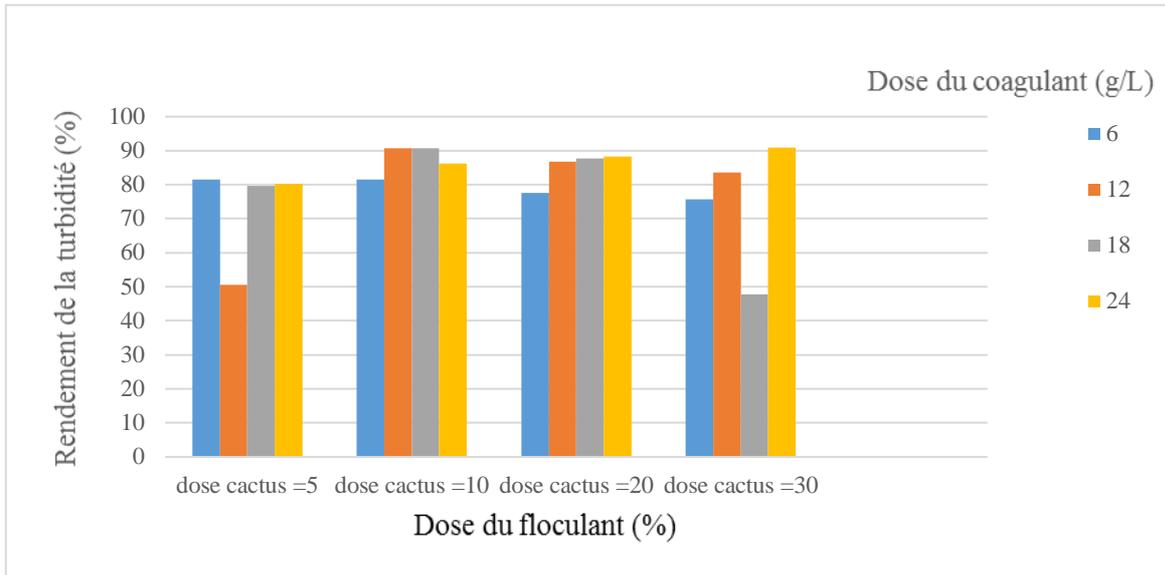
<b>Dose de fenugrec (g/L)</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>24</b>
<b>Dose gel de cactus %</b>	5	10	20	30

#### III.3.1 Mélange fenugrec/ Cactus à pH égal à 4 :

Afin d'évaluer l'efficacité du procédé de coagulation-floculation pour la réduction de la turbidité des eaux usées, nous avons réalisés des essais en utilisant la poudre de fenugrec comme coagulant et le gel de cactus comme floculant, à un pH proche de 4.

Les résultats obtenus ont été analysés et présentés dans les tableaux et figures correspondants.

Ils portent sur le rendement d'élimination de la turbidité, l'aspect visuel après décantation, la taille des floes formés, les rendements de boues et d'eau traitée, ainsi que les valeurs de pH (initial, ajusté, après coagulation et final).

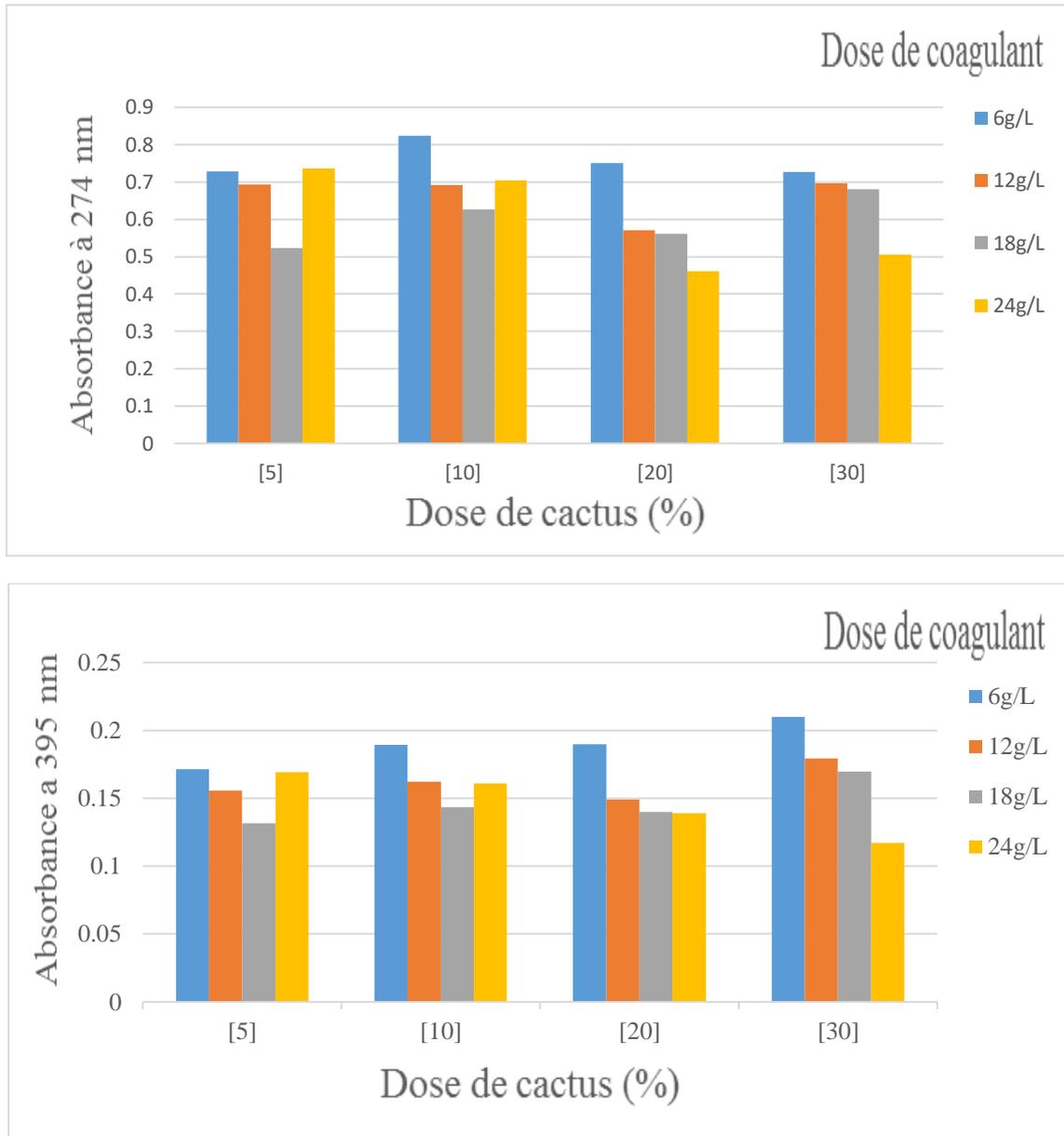


**Figure III-7:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec

L'efficacité du mélange naturel Fenugrec/Cactus dans la réduction de la turbidité des eaux usées a été évaluée à pH = 4. Les résultats ont montré une amélioration progressive des performances en fonction des concentrations appliquées, avec un rendement maximal de 90,76 %.

Cette efficacité a été obtenue pour une concentration de 12 g/L de fenugrec associée à 10 % de gel de cactus. Cette combinaison a permis de favoriser l'agrégation des particules présentes dans l'effluent, facilitant ainsi leur floculation et leur décantation.

Les images regroupées dans tableau **Tableau III.14**



**Figure III-8:** Evolution de l'absorbance à 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs des fenugrecs

La **Figure III-8** présente l'évolution de l'absorbance aux longueurs d'onde de 274 nm et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel utilisée, pour quatre concentrations de graines de fenugrec à pH = 4.

À 274 nm, on observe une diminution générale de l'absorbance avec l'augmentation de la dose, traduisant une meilleure élimination des composés organiques aromatiques. Cette diminution devient plus marquée à partir de 20 g/L. À faible dose (5 g/L), l'absorbance reste élevée, indiquant une efficacité réduite. À 30 g/L, la baisse est significative, surtout pour la concentration de 24 g/L, révélant une performance accrue du traitement.

À 395 nm, l'absorbance est également en baisse avec l'augmentation de la dose, montrant une clarification progressive du milieu. Les valeurs les plus faibles sont atteintes à 30 g/L pour la

concentration de 24 g/L, ce qui traduit une meilleure efficacité à ce niveau.

L'évaluation visuelle après décantation a confirmé une clarification nette des échantillons, avec formation de floes bien visibles au fond des récipients. Les détails de ces observations figurent dans le **Tableau III.14**

**Tableau III-14:**Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus

Dose de gel de cactus %	Aspect visuel des margines après décantation	Dose coagulant Naturel (g/l) (fenugrec)	Aspect
5		6	Nuageux
		12	nuageux
		18	nuageux
		24	floues
10		6	floues
		12	nuageux
		18	nuageux
		24	Nuageux
20		6	nuageux
		12	nuageux
		18	floues
		24	nuageux
30		6	nuageux
		12	nuageux
		18	nuageux
		24	clair

L'observation visuelle des échantillons après décantation montre que l'eau traitée conserve une légère turbidité résiduelle, dont l'intensité varie en fonction des doses appliquées du coagulant/floculant naturel. Pour les concentrations testées, l'eau décantée présente un aspect allant de claire à modérément trouble, traduisant une efficacité de traitement relativement satisfaisante. Après 24 heures de décantation, une stratification nette est observée, avec une couche supérieure plus limpide reposant sur une couche inférieure où les floes se sont accumulés.

Les rendements en boues et en eaux clarifiées ainsi que la taille des floes formés ont été évalués et sont présentés dans le Tableau correspondant.

**Tableau III-15:** Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus

<b>Dose de floculant (%)</b>	<b>Taille des floes après coagulation (mm)</b>	<b>Dose de coagulant (g/L)</b>	<b>Tailles des floes apres floculation</b>	<b>Rendement des boues %</b>	<b>Rendement d'eau traite %</b>
5	0.75-1	6	0.75-1	48.33	51.67
	0.5-0.75	12	0.75-1	50	50
	0.5-0.75	18	0.75-1	46.66	53.34
	1-1.5	24	1.5-2.25	53.33	46.67
10	0.3-0.5	6	0.3-0.5	51.67	48.33
	0.3-0.5	12	0.3-0.5	48.33	51.67
	0.5-0.75	18	1-1.5	46.67	53.33
	0.3-0.5	24	1.5-2.25	56.66	43.34
20	0.5-0.75	6	0.75-1	50	50
	0.75-1	12	1-1.5	48.33	51.67
	1-1.5	18	1.5-2.25	63.33	36.67
	1-1.5	24	1.5-2.25	43.33	56.67
30	0.5-0.75	6	0.75-1	33.33	66.67
	0.75-1	12	0.75-1	58.33	41.67
	1-1.5	18	1.5-2.25	36.66	63.34
	0.5-0.75	24	2.25-3	43.33	56.67

L'observation visuelle des échantillons après décantation montre que l'eau traitée conserve une légère turbidité résiduelle, dont l'intensité varie en fonction des doses appliquées du coagulant/floculant naturel. Pour les concentrations testées, l'eau décantée présente un aspect allant de claire à modérément trouble, traduisant une efficacité de traitement relativement satisfaisante. Après 24 heures de décantation, une stratification nette est observée, avec une couche supérieure plus limpide reposant sur une couche inférieure où les floes se sont accumulés.

Les rendements en boues et en eaux clarifiées ainsi que la taille des floes formés ont été évalués et sont présentés dans le Tableau correspondant.

**Tableau III-16:** Evolution du pH en fonction de la concentration du Fenugrec et du cactus.

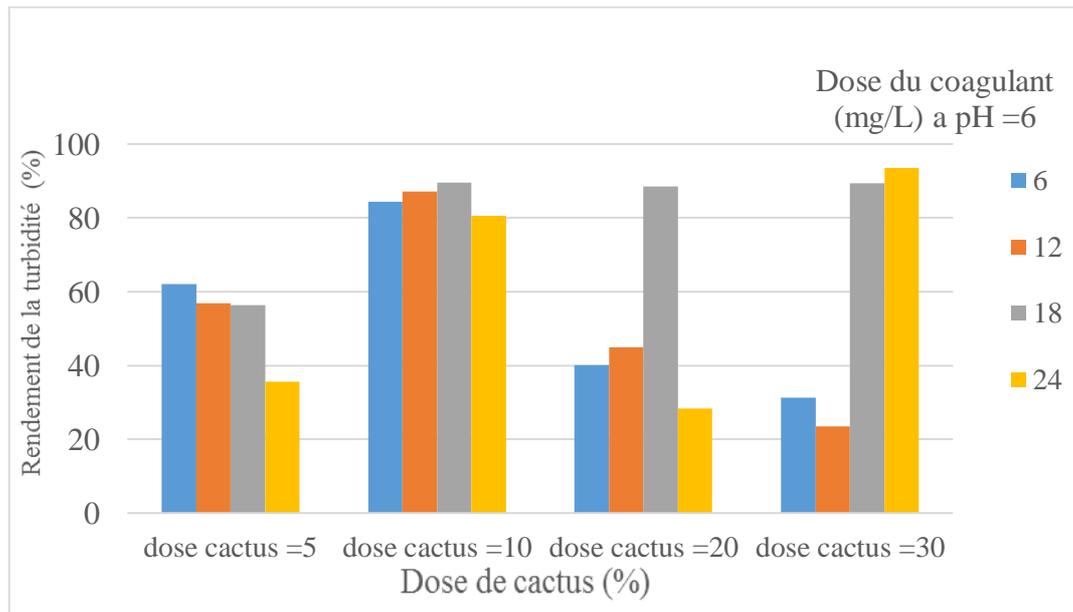
Ph initial	Ph ajuste	Dose coagulant (g/L)	Ph apres coagulation	Ph ajuste	Dose floculant	Ph finale
4.30	4.05	6	4.04	/	5	4.30
		12	4.07	/		4.02
		18	4.10	/		4.8
		24	4.15	4.09		4.19
4.30	4.08	6	4.14	4.05	10	3.98
		12	4.13	4.05		4.05
		18	4.16	4.05		3.98
		24	4.17	4.05		4.01
4.30	4.04	6	4.14	4.06	20	4.07
		12	4.15	4.08		4.00
		18	4.16	4.06		4.05
		24	4.19	4.06		4.05
4.30	4.08	6	4.13	4,05	30	4.09
		12	4.12	4,06		4.10
		18	4.14	4,08		4.01
		24	4.13	4,03		4.22

Lors des essais effectués à pH égal à 4, il a été observé que l'ajout du floculant naturel fenugrec entraîne une légère variation du pH, parfois une augmentation, parfois une diminution selon la dose

utilisée. Cependant, ces changements restent minimes et n'affectent pas significativement l'acidité initiale du milieu. Le pH est donc globalement resté acide tout au long du processus.

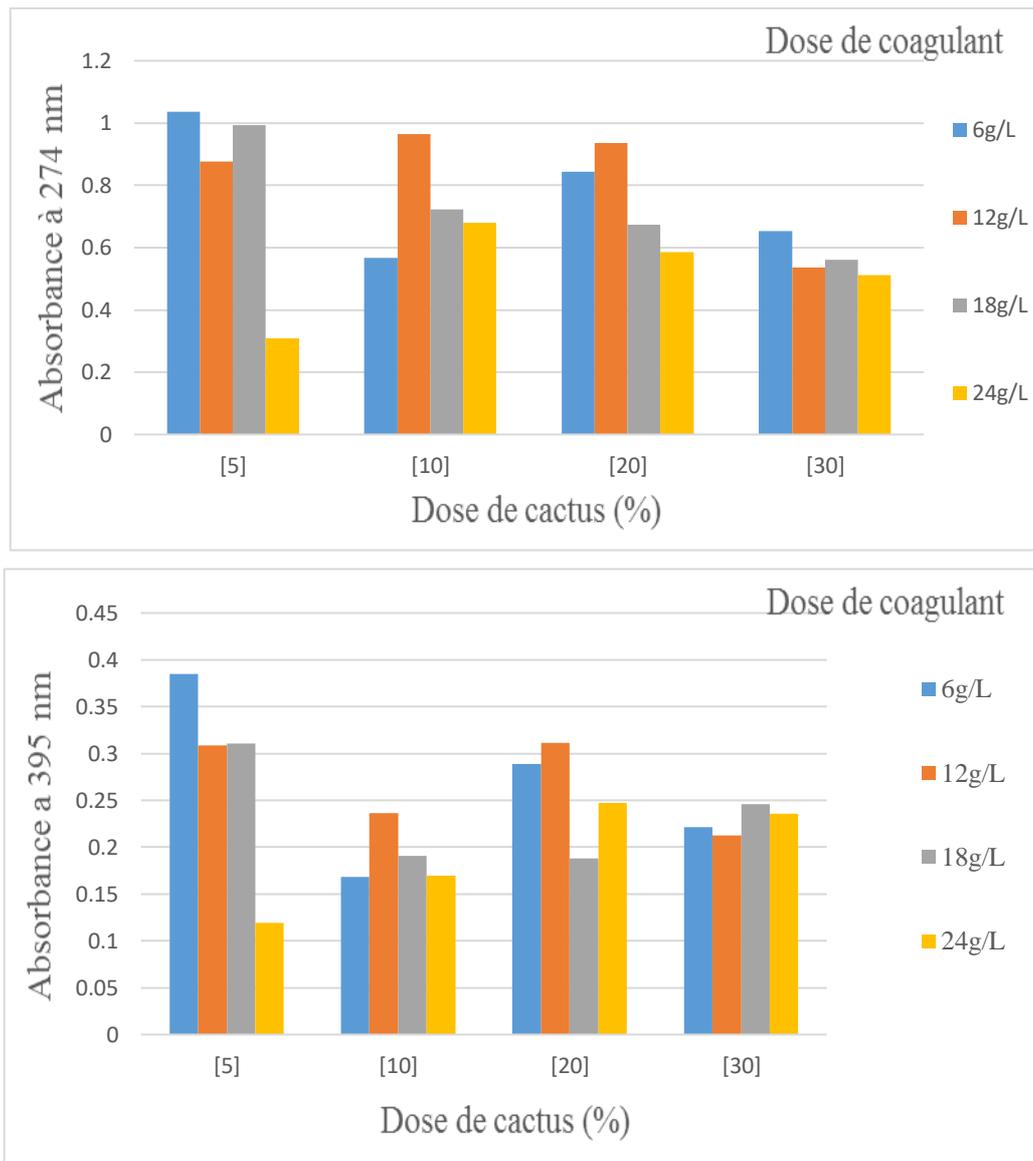
### III.3.2 Mélange fenugrec/ Cactus à pH égal à 6:

Des essais complémentaires ont été réalisés dans les mêmes conditions que précédemment, en poursuivant l'étude à un pH de 6 avec le fenugrec. Les résultats sont présentés dans la **Figure III.9**



**Figure III-9:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec

Un rendement maximal a été obtenu avec une concentration de 24 g/L de fenugrec et 30 % de gel de cactus, correspondant à un taux d'élimination optimal de 93,53 %. À des concentrations inférieures à 24 g/L de fenugrec, une diminution des taux d'abattement de la turbidité a été observée, indiquant une augmentation de la turbidité avec la baisse des concentrations. Ce lien entre le fenugrec et le gel de cactus favorise efficacement l'agrégation des particules en suspension, améliorant ainsi la clarification de l'eau.



**Figure III-10:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec

L'évaluation de l'efficacité du flocculant naturel à base de fenugrec, à travers les mesures d'absorbance aux longueurs d'onde de 274 nm et 395 nm, met en évidence une amélioration progressive du traitement des margines avec l'augmentation de la dose de flocculant.

À 274 nm, associée aux composés organiques aromatiques, une forte absorbance est observée à faible dose (5 g/L), traduisant une faible efficacité d'élimination de la matière organique. Une diminution significative de l'absorbance est enregistrée entre 10 et 24 g/L, avec une stabilisation au-delà de 24 g/L, suggérant une dose optimale

De manière similaire, à 395 nm, les absorbances diminuent sensiblement avec l'augmentation de la dose, jusqu'à atteindre un plateau à 30 g/L, traduisant un effet de saturation. Ces résultats confirment l'efficacité du fenugrec en tant que flocculant naturel, particulièrement en conditions acides, et sont cohérents avec la littérature, qui souligne une efficacité croissante des flocculants naturels jusqu'à une concentration optimale, suivie d'une phase de stabilisation ou de légère diminution

Les images regroupées dans le Tableau **III-17** prises lors des expériences ont confirmé toutes les informations et interprétations

**Tableau III-17:** Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus

Dose flocculante naturel % (Cactus)	Aspect visuel des eaux après décantation	Dose coagulant Naturel (g/l) (fenugrec)	Aspect
5		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
10		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
20		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
30		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux

Après décantation, l'eau traitée montre une turbidité résiduelle variable selon les doses de coagulant/flocculant (6-24 g/L). L'aspect va de presque limpide à légèrement trouble, témoignant d'une efficacité correcte sans pureté totale. Une séparation nette se forme entre la couche claire et les sédiments au fond. Les rendements et la taille des floccs sont présentés au Tableau III.18

**Tableau III-18:** Evolution de la taille des floes et du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées en fonction des concentrations du Fenugrec et du cactus.

Dose flocculant naturel % (Cactus)	Taille des floes après coagulation (mm)	Concentrations du gel de cactus (%)	Taille des floes après floculation (mm)	Rendement des boues (%)	Rendement de l'eau traitée (%)
5	0.3-0.5	6	0.5-0.75	13.34	86.66
	0.5-0.75	12	1-1.5	46,67	53,33
	0.75-1	18	2.25-3	33.34	66.66
	1.5-2.25	24	3-4.5	36.37	63.33
10	0.3-0.5	6	0.75-1	46.67	53.33
	0.75-1	12	1-1.5	43.34	56.66
	1-1.5	18	2.25-3	33.34	66.66
	1.5-2.25	24	1-1.5	50	50
20	0.3-0.5	6	1-1.5	13.34	86.66
	0.5-0.75	12	1.5-2.25	26.67	73.33
	0.75-1	18	2.25-3	30	70
	0.5-0.75	24	1-1.5	26.67	73.33
30	0.5-0.75	6	0.75-1	25	75
	0.75-1	12	1.5-2.25	30	70
	0.75-1	18	1.5-2.25	13.34	86.66
	1-1.5	24	2.25-3	63.34	73.33

L'analyse des résultats met en évidence une corrélation claire entre l'augmentation des concentrations de fenugrec et de gel de cactus, et la croissance de la taille des floes ainsi que du volume des boues produites. L'augmentation progressive des doses favorise la formation de floes plus volumineux, traduisant une meilleure efficacité du traitement, mais elle s'accompagne également d'une élévation

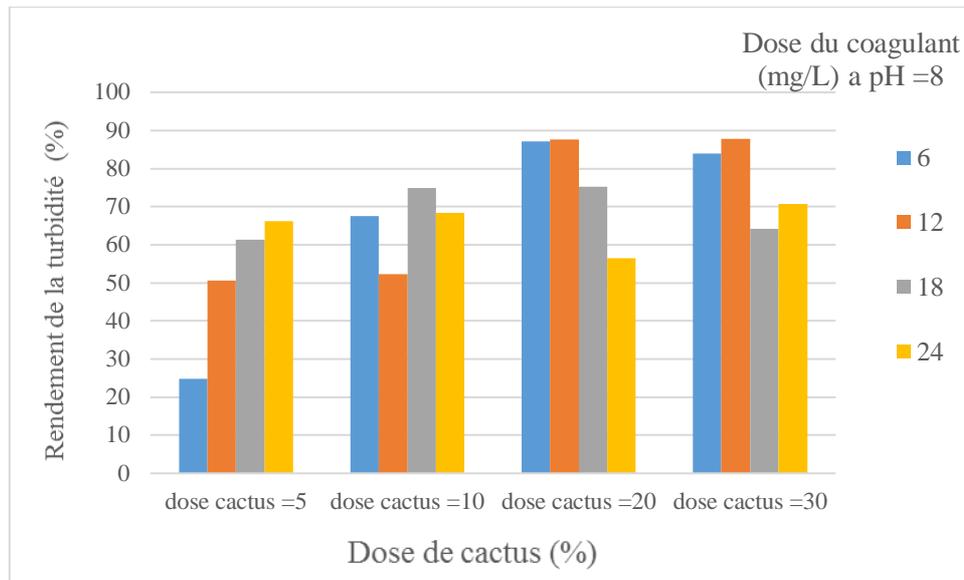
du volume des boues, ce qui peut légèrement réduire le volume d'eau traitée récupérable. Il a également été observé que l'ajout du fenugrec influence légèrement le pH du milieu, avec des variations modérées selon les concentrations. Le gel de cactus entraîne également de légères fluctuations du pH, sans impact significatif sur l'efficacité globale du traitement. Ces observations sont détaillées dans le Tableau III.19..

**Tableau III-19:** Evolution du pH en fonction de la concentration du Fenugrec et du cactus.

Ph initial	Ph ajuste	Dose coagulant (g/L)	Ph après coagulation	Ph ajuste	Dose floculant	Ph finale
4.30	6.02	6	6.16	6.06	5	5.78
		12	6.11	6.04		5.54
		18	6.10	6.03		5.48
		24	6.04	/		5.46
4.30	6.03	6	6.12	6	10	4.99
		12	6.11	6.01		5.03
		18	6.07	/		5.02
		24	6.08	/		5.02
4.30	6.02	6	6.08	/	20	5.49
		12	6.15	6.01		5.30
		18	6.11	6.04		4.9
		24	6.05	/		5.37
4.30	6.01	6	6.18	6.01	30	5.28
		12	6.20	6.02		5.21
		18	6.30	6.08		6.53
		24	6.08	/		6.49

### III.3.3 Mélange fenugrec/ Cactus à pH égal à 8 :

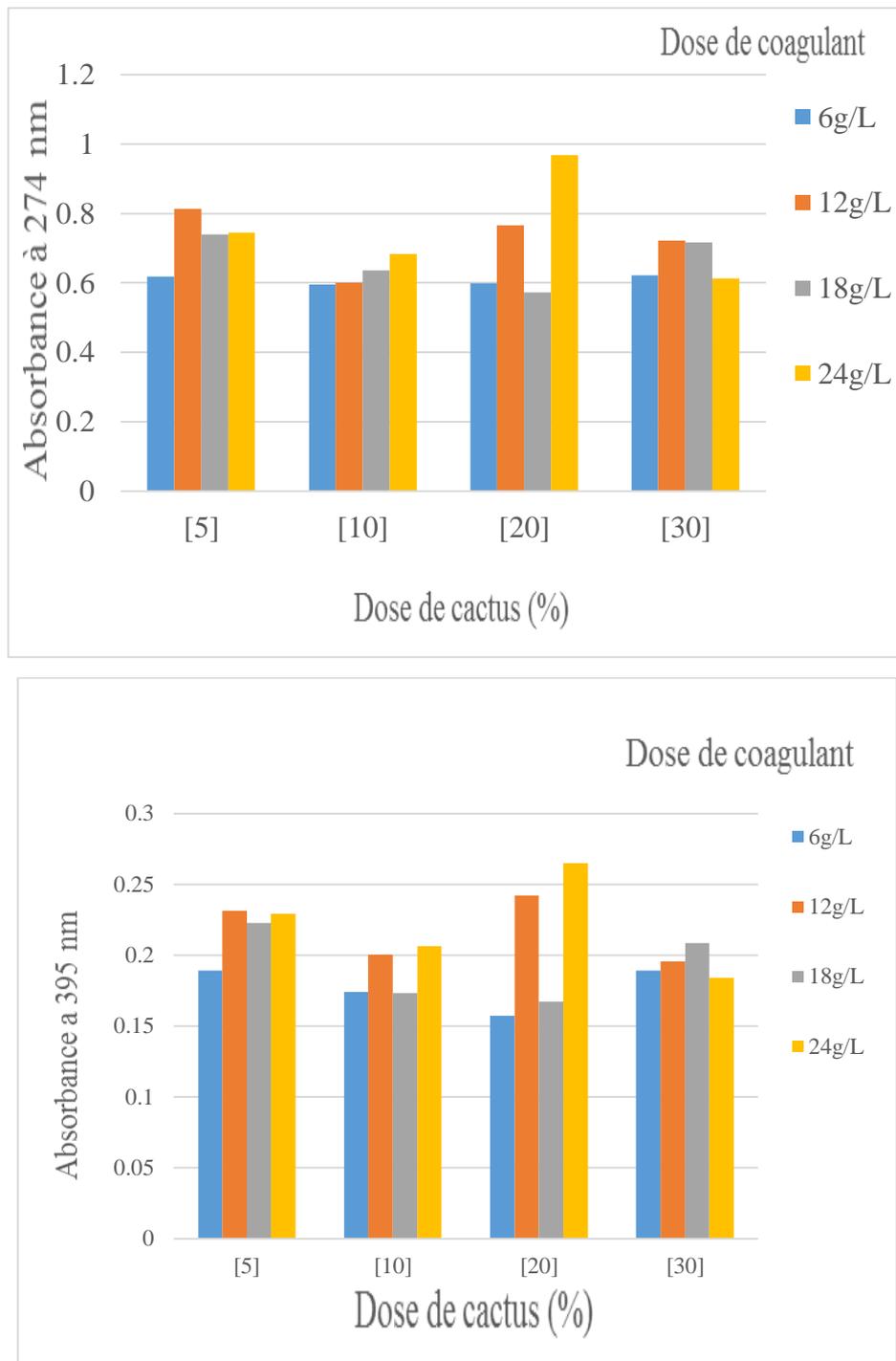
Des essais expérimentaux ont été réalisés dans les mêmes conditions que précédemment, en poursuivant l'étude à un pH égal à 8 avec le fenugrec. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.11



**Figure III-11:** Evolution des rendements de la turbidité en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs de fenugrec

Les résultats obtenus révèlent que l'efficacité du couple Fenugrec/gel de cactus dans l'élimination de la turbidité varie entre 24,84 % et 87,83 %, traduisant une amélioration significative de la clarté de l'eau traitée. Cette performance est attribuée à la capacité du mélange à piéger et regrouper les particules colloïdales en suspension.

Le taux d'abattement le plus élevé, soit 87,83 %, a été atteint à pH 8 avec une dose de 12 mg/L de Fenugrec combinée à 30 % de gel de cactus, ce qui confirme l'efficacité de ce couple dans les opérations de coagulation-floculation.



**Figure III-12:** Evolution de l'absorbance à 274 et 395 nm en fonction de la dose du flocculant naturel pour les différentes valeurs des fenugrecs

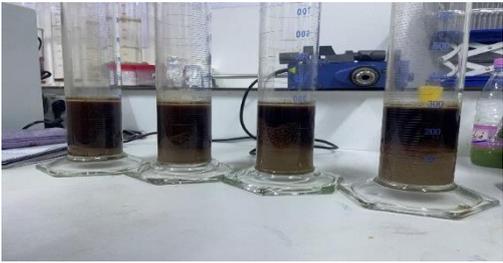
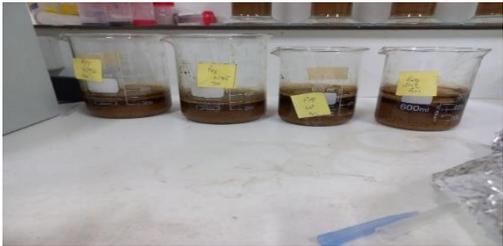
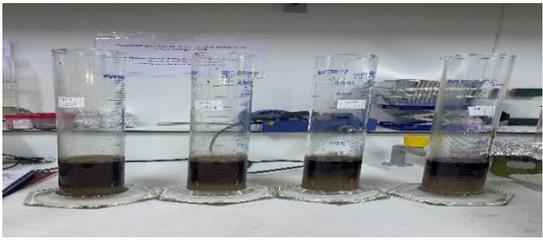
Les histogrammes de la figure 16 montrent l'évolution de l'absorbance à 274 nm et 395 nm selon différentes doses du flocculant naturel à base de fenugrec (6, 12, 18 et 24 g/L).

À 274 nm, l'absorbance diminue globalement avec l'augmentation de la dose. Cette baisse n'est toutefois pas régulière. Une diminution plus nette est observée à 18 g/L, surtout pour les solutions à 10 et 30 g/L. Cela montre une efficacité accrue du flocculant à partir de cette dose. À 24 g/L, l'absorbance

augmente légèrement dans certains cas, ce qui peut indiquer une saturation du système ou une redispersions des particules.

À 395 nm, L'absorbance diminue régulièrement entre 5 et 20 g/L. Les doses de 18 et 24 g/L donnent les meilleurs résultats en termes de réduction de la turbidité.

**Tableau III-20:** Aspect visuel des margines après coagulation-floculation par fenugrec/cactus.

Dose de gel de cactus %	Aspect visuel des margines après décantation	Dose coagulant Naturel (g/l) (fenugrec)	Aspect
5		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
10		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Nuageux
20		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	floues
		24	Nuageux
30		6	Nuageux
		12	Nuageux
		18	Nuageux
		24	Clair

Après une décantation de 24 heures, une distinction claire entre deux couches a été observée : une couche inférieure constituée des boues formées, et une couche supérieure plus claire représentant l'eau clarifiée.

Les volumes respectifs des boues et de l'eau traitée, ainsi que la taille des floccs obtenus, ont été mesurés et synthétisés dans le Tableau III.21.

**Tableau III-21:** Evolution de la taille des floccs, du pourcentage du volume des boues et des eaux traitées en fonction des concentrations du Fenugrec et du cactus.

Dose de flocculant (%)	Taille des floccs après coagulation (mm)	Dose de coagulant (g/L)	Tailles des floccs après floculation	Rendement des boues %	Rendement d'eau traite %
5	0.3-0.5	6	0.5-0.75	11.67	88.33
	0.3-0.5	12	0.75-1	15	85
	0.5-0.75	18	1-1.5	46.67	53.33
	0.5-0.75	24	1.5-2.25	50	50
10	0.3-0.5	6	0.5-0.75	13.33	66.67
	0.5-0.75	12	0.75-1	31.67	68.33
	0.3-0.5	18	1-1.5	40	60
	0.75-1	24	1.5-2.25	43.33	56.67
20	0.3-0.5	6	0.75-1	35	65
	0.5-0.75	12	1-1.5	40	60
	0.5-0.75	18	1.5-2.25	48.33	51.67
	0.75-1	24	2.25-3	60	40
30	0.3-0.5	6	0.5-0.75	33.33	66.67
	0.5-0.75	12	1-1.5	45	55
	0.75-1	18	1.5-2.25	53.33	46.67
	1-1.5	24	2.25-3	66.67	33.33

L'analyse des données du Tableau III.21 montre que la taille des floccs formés, le volume des boues, le volume d'eau traitée ainsi que les caractéristiques visuelles des échantillons varient significativement en fonction des concentrations de poudre de fenugrec et de gel de cactus utilisées.

Il a été observé que la taille des floccs augmente progressivement avec l'augmentation des concentrations des deux substances, ce qui entraîne également une augmentation du volume des boues produites. Cette relation directe entre la concentration des coagulants naturels et la taille des floccs impacte la quantité d'eau récupérable après traitement, avec une légère diminution du volume d'eau traitée en raison de l'augmentation des boues.

Des mesures du pH ont été réalisées après chaque étape du processus de coagulation-floculation afin de suivre son influence sur l'efficacité du traitement. Les résultats sont présentés dans le Tableau III.22.

**Tableau III-22:** Evolution du pH en fonction de la concentration du Fenugrec et du cactus

Ph initial	Ph ajuste	Dose coagulant (g/L)	Ph après coagulation	Ph ajuste	Dose floculant	Ph finale
4.30	8	6	7.83	8.05	5	6.34
		12	7.78	8.03		6.15
		18	7.72	8.01		6.31
		24	7.66	8.02		6.06
4.30	8.04	6	7.81	8.05	10	5.57
		12	7.71	8.05		6.06
		18	7.56	8.08		6.23
		24	7.63	8.06		6.17
4.30	8.04	6	7.70	8.04	20	6.14
		12	7.69	8.07		6.64
		18	7.65	8.07		6.29
		24	7.65	8.02		5.95
4.30	8.01	6	7.81	8.02	30	5.95
		12	7.81	8.05		5.94
		18	7.75	8.05		5.94
		24	7.57	8.02		6.64

Les résultats indiquent que l'augmentation de la concentration de poudre de fenugrec n'a pas provoqué de variation significative du pH, ce qui suggère que l'utilisation du fenugrec comme coagulant n'a pas d'impact majeur sur l'acidité du milieu. En revanche, l'ajout du gel de cactus entraîne une diminution notable du pH, attribuable à la nature acide de ce gel, dont le pH est d'environ 6,5.

### III.4 Impact du pH sur la performance des couples coagulants/floculants : Comparaison entre Moringa/Cactus et Fenugrec/Cactus :

#### III.4.1 Couple Moringa / Cactus :

Tableau III-23: Performance du couple Moringa /Cactus selon le pH

	pH=4	pH=6	pH=8
Dose de Moringa	24	6	18
Dose de cactus	10	10	10
pH initial	4.30	4.30	4.30
Rendement du turbidité	95.3	95.01	94.89
Rendement des boues	30	16.66	33.33
Rendement d'eau traite	70	83.34	66.67
pH final	4.10	5.16	6
Couleur	Nuageux	Clair	Clair

D'après les résultats obtenus, l'efficacité du couple coagulant naturel Moringa/cactus varie selon le pH. À pH 6, les performances sont optimales avec une dose minimale de Moringa (6g/L), un rendement élevé de réduction de turbidité (95,01 %), un rendement d'eau traitée maximal (83,34 %) et une eau claire, ce qui indique une coagulation-floculation efficace en milieu neutre. À pH 4 et 8, des doses plus importantes de Moringa (24 et 18 g/L respectivement) sont nécessaires pour atteindre une efficacité comparable sur la turbidité, mais avec une production de boues plus importante et un rendement d'eau traitée réduit[42], les protéines cationiques du Moringa sont plus actives autour du pH neutre, favorisant la neutralisation des charges négatives des particules colloïdales, ce qui expliquerait les résultats observés à pH 6. Le cactus, utilisé à dose constante, renforce la floculation par la présence de mucilage, [41]contribuant à la formation de floccs plus denses et décantables. De plus, l'aspect visuel de l'eau traitée à pH 6 et 8, contre une légère turbidité résiduelle à pH 4, confirme la supériorité du traitement en pH 6. Ainsi, d'après ces auteurs et nos résultats, le pH 6 constitue la

condition optimale pour maximiser l'efficacité de ce procédé tout en limitant la consommation de coagulant et la production de boues.

### III.4.2 Couple fenugrec / Cactus :

**Tableau III-24:**Performance du couple Moringa /Cactus selon le pH

	pH=4	pH=6	pH=8
Dose de Moringa	12	18	26
Dose de cactus	10	10	20
pH initial	4.30	4.30	4.30
Rendement du turbidité	90.76	89.52	87.05
Rendement des boues	48.33	33.34	35
Rendement d'eau traite	57.67	66.67	65
Ph final	4.05	5.02	6.14
Couleur	Nuageux	Clair	Clair

D'après ces résultats, l'efficacité du couple coagulant naturel fenugrec/cactus varie également en fonction du pH de l'eau traitée. À pH 6, les performances sont les meilleures avec une réduction maximale de la turbidité (93,53 %), un rendement d'eau traitée élevé (73,33 %) et une eau claire, ce qui indique une meilleure coagulation-floculation en milieu légèrement neutre. À pH acide (4) et basique (8), malgré des rendements de turbidité encore élevés (90,76 % et 87,05 % respectivement), l'eau reste nuageuse à pH 4 et la quantité de boues produites est plus importante, notamment à pH 4 (48,33 %), ce qui témoigne d'une agglomération moins efficace des particules. De plus, la dose nécessaire de fenugrec varie selon le pH, avec une dose minimale requise à pH 8 (6g/L), ce qui pourrait s'expliquer par une meilleure activité des composés actifs du fenugrec dans un environnement basique, comme l'a mentionné [42] pour d'autres coagulants naturels. D'après ces auteurs, les mucilages et protéines présents dans les graines végétales agissent différemment selon le pH, influençant l'efficacité de la floculation ; nos résultats confirment que le pH 6 constitue une condition optimale, offrant un compromis idéal entre rendement d'eau traitée, faible production de boues et clarté de l'eau. [43], les bio coagulants naturels comme le fenugrec manifestent une efficacité maximale proche de la neutralité, ce qui justifie l'observation d'une performance supérieure à pH 6 dans ce traitement combiné fenugrec/cactus.

#### **IV Conclusion Générale :**

Cette étude a mis en évidence l'efficacité du procédé de coagulation-floculation utilisant des coagulants naturels, en particulier les graines de *Moringa Oleifera* et de fenugrec, en association avec le gel de cactus, pour le traitement des margines issues de l'industrie oléicole. Les résultats expérimentaux ont démontré que ces combinaisons permettent une réduction significative de la turbidité des effluents, tout en s'inscrivant dans une démarche respectueuse de l'environnement. Le pH 6 s'est révélé optimal pour les deux couples testés, avec un rendement supérieur observé pour le couple *Moringa*/cactus (95,01 %) comparé au couple fenugrec/cactus (93,53 %).

Au-delà de leur performance, ces coagulants naturels présentent plusieurs avantages environnementaux et économiques notables. Leur utilisation contribue à limiter le recours aux coagulants chimiques conventionnels, souvent coûteux et potentiellement nocifs, tout en réduisant la production de boues toxiques. De plus, ces ressources végétales sont locales, renouvelables et facilement accessibles, ce qui les rend particulièrement adaptées aux petites et moyennes huileries .

En s'appuyant sur des matériaux naturels, ce procédé s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire et de développement durable, valorisant des sous-produits agricoles tout en protégeant les écosystèmes aquatiques et les sols contre les effets néfastes des margines brutes. Le couple fenugrec/cactus, en particulier, se distingue par sa disponibilité locale et son coût réduit, en faisant une solution économiquement viable pour les structures oléicoles à faibles moyens.

Ainsi, le procédé étudié représente une alternative écologique, durable et économiquement soutenable pour la dépollution des margines, répondant efficacement aux enjeux environnementaux et socio-économiques des territoires producteurs d'huile d'olive.

## Références bibliographiques

- [1] Labdaoui D. Impact socio-économique et environnemental du modèle d'extraction des huiles d'olive à deux phases et possibilités de sa diffusion dans la région de Bouira. Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2017.
- [2] Zaier H., Chmingui W., Rajhi H., Bouzidi D., Roussos S., Rhouma A. Physico-chemical and microbiological characterization of olive mill wastewater (OMW) of different regions of Tunisia (North, Sahel, South). *JNS Agri Biotech*, 2017, 48(2), p. 2888–2897.
- [3] Mebirouk A. Caractérisation physico-chimique des margines et étude de leur impact environnemental. 2002.
- [4] Harakat R., Lazrak A., Chafiki D., Soutenu A.R. Impact des margines sur les eaux souterraines de la nappe phréatique de la vallée de Ghmat au sud de Marrakech (Maroc). Université Cadi Ayyad, 2011.
- [5] Sifoun N. Traitement des effluents des huileries d'olive par oxydation au H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Mémoire de fin d'études, Université de Boumerdès, 2008.
- [6] Morillo J.A., Antizar-Ladislao B., Monteoliva Sánchez M., Ramos Cormenzana A., Russell N.J. Bioremediation and biovalorisation of olive mill waste. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2009, 82(1), p. 25–39.
- [7] Nefzaoui A. Valorisation des sous-produits de l'olivier. In : Tisserand J.-L. (ed.). Fourrages et sous-produits méditerranéens. Options Méditerranéennes : Série A, 1991, n°16.
- [8] Benyahia N., Zein K. Analyse des problèmes de l'industrie de l'huile d'olive et solutions récemment développées. 2<sup>e</sup> Conf. internat. SESEC II, Lausanne, Suisse, 2003.
- [9] Khoufi S., Aloui F., Sayadi S. Treatment of olive oil mill wastewater by combined electro-Fenton reaction and anaerobic digestion. *Water Res.*, 2006, 40(10), p. 2007–2016.
- [10] Fadil K., Chahlaoui A., Ouahbi A., Zaid A., Borja R. Aerobic biodegradation and detoxification of wastewaters from the olive oil industry. *Process Biochem.*, 2003, 51, p. 37–41.
- [11] De Ursinos J.A.F.R., Padilla R.B. Use and treatment of olive mill wastewater: Current situation and prospects in Spain. *Grasas y Aceites*, 1992, 43, p. 101–106.
- [12] Aissam H., Penninckx M.J. Reduction of phenolics content and COD in olive oil mill wastewaters by indigenous yeasts and fungi. *Process Biochem.*, 2007, 42(8), p. 1203–1208.
- [13] Ranalli A. L'effluent des huiles d'olives : propositions en vue de son utilisation et son épuration. *Olivae*, 1991, 39, p. 18–34.
- [14] Biodeterioration and Biodegradation. Biodegradation of different molecular-mass polyphenols derived from olive mill wastewaters by *Geotrichum candidum*. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2016, 63(4), p. 407–413.
- [15] Sayadi S., Allouche N., Jaoua M., Aloui F. Detrimental effects of high molecular-mass polyphenols on olive mill wastewater biotreatment. *Process Biochem.*, 2000, 35, p. 725–735.

- [16] Fountoulakis M.S., Dokianakis S.N., Kornaros M.E., Aggelis G.G., Lyberatos G. Removal of phenolics in olive mill wastewaters using the white-rot fungus *Pleurotus ostreatus*. *Water Res.*, 2002, 36, p. 4735–4744.
- [17] Al-Malah K., Azzam M.O.J., Abu-Lail N.I. Olive mills effluent (OME) wastewater post-treatment using activated clay. *Sep. Purif. Technol.*, 2000, 20, p. 225–234.
- [18] Fezzani B., Ben Cheikh R. Extension of the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1) to include phenolic compounds biodegradation. *J. Hazard. Mater.*, 2009, 162(1), p. 1563–1570.
- [19] Parinos C.S., Stalikas C.D., Giannopoulos T.S., Pilidis G.A. Chemical and physicochemical profile of wastewaters produced from Spanish-style green olives processing. *Waste Manag.*, 2007, 27(11), p. 145–339.
- [20] Jail A., Boukhoubza F., Nejmeddine A., Sayadi S., Hassani L. Co-treatment of olive-mill and urban wastewaters by stabilization ponds. *Desalination*, 2010, 176, p. 893–900.
- [21] Justino C.I.L., Pereira R., Rocha-Santos A.C.F.T.A.P. Olive oil mill wastewaters before and after treatment: A critical review from the ecotoxicological point of view. *Sci. Total Environ.*, 2012, 435–436, p. 615–629.
- [22] Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de la Vie. Étude d'élaboration d'un plan national de gestion des margines. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Tunisie, 2007.
- [23] Larid I., Elaichi K. Étude de profil des polyphénols extraits à partir des margines : essai de biodégradation avec la microflore indigène et sélectionnée. Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida, 2019.
- [24] Dhaouadi H., Marrot B. Olive mill wastewater treatment in a membrane bioreactor: Process feasibility and performances. *Chem. Eng. J.*, 2008, 145(2), p. 225–231.
- [25] Brun J.-P. Procédés de séparation par membranes : transport, techniques membranaires, applications. Elsevier Masson, 1988.
- [26] Ranalli A. The effluent from olive mills: Proposals for re-use and purification with reference to Italian legislation. *Olivae*, 1991, 37, p. 30–39.
- [27] Khoufi S., Aloui F., Sayadi S. Treatment of olive oil mill wastewater by combined process: aerobic digestion and chemical oxidation. *J. Hazard. Mater.*, 2006, 136(3), p. 937–944.
- [28] Rincón B., Borja R., Martín M.A. Enhancement of the aerobic biodegradation of olive mill wastewater by the removal of phenolic inhibitors. *Process Biochem.*, 2006, 41(3), p. 595–602.
- [29] Borja R., Banks C.J. Anaerobic digestion of olive mill wastewater after ozonisation. *Process Biochem.*, 1994, 29(4), p. 303–309.
- [30] Mantzavinos D., Kalogerakis N. Treatment of olive mill effluents: Part II. Complete detoxification by advanced oxidation processes. *Environ. Int.*, 2005, 31(2), p. 145–149.
- [31] Rais Z. et al. Margines : traitement, valorisation dans la germination des graines de tomate et dans la filière de compostage. *Rev. Sci. Eau*, 2017, 30(1), p. 57–62.

- [32] Hanafi F., Sadif N., Assobhei O., Mountadar M. Traitement des margines par électrocoagulation avec des électrodes plates en aluminium. *Rev. Sci. Eau*, 2009, 22, p. 473–485.
- [33] Zerrouq F., Chabani M., Rida M.E., Desbrières J. Coagulation–flocculation of raw wastewater by chitosan and chitosan derivatives. *Desalination*, 2008, 219(1–3), p. 1–9.
- [34] Jeddi K., Ayed L., Assas N. Decolorization and detoxification of olive mill wastewater by *Geotrichum candidum*. *Desalination*, 2009, 249(3), p. 1097–1101.
- [35] Mouchet P. Traitement des eaux avant utilisation. *Matières particulières. Tech. Ing.*, 2000, Réf. G1170.
- [36] Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, 2003.
- [37] Acharya S.N., Thomas J.E., Basu S.K. Fenugreek: an “old world” crop for the “new world”. *Biodiversity*, 2008, 9(1–2), p. 24–27.
- [38] Sowmya P., Rajyalakshmi P. Hypocholesterolemic effect of germinated fenugreek seeds in human subjects. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 1999, 53(4), p. 359–365.
- [39] Ndabigengesere A., Narasiah K.S. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Res.*, 1998, 32(3), p. 781–791.
- [40] Bensaadi F. Étude de la coagulation-flocculation des eaux usées par des produits naturels. *Mémoire de Master, Université de Béjaïa*, 2015.
- [41] Beltrán-Heredia J., Sánchez-Martín J. Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent. *Desalination*, 2009, 249(1), p. 353–358.
- [42] Ghebremichael K.A., Gunaratna K.R., Dalhammar G. Single-step ion exchange purification of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2006.
- [43] Khoufi S., Aloui F., Sayadi S. Treatment of olive oil mill wastewater by combined aerobic digestion and chemical oxidation. *J. Hazard. Mater.*, 2006, 136(3), p. 937–944.