

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali BOUNAAMA de Khémis Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Technologie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master

En génie des procédés l'environnement

Spécialité : génie de l'environnement

**ETUDE DES EFFETS
DE L'OPUNTIA FICUS INDICA
SUR LES REJETS DES EAUX DE PEINTURE**

Présenté par :

Mohammed Belkebir Kenza

Saidi Khawla

Soutenu devant le jury :

Président : Mme Hamad Taous

Examineur : Mme Houria Rezala

Promotrice : Mme Mesli Chahrazad

Année universitaire 2019 / 2020



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier *ALLAH* qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre très grande gratitude et profond respect à notre promotrice *Mme. MESLI Chahrazad*, pour avoir dirigé ce travail, et pour l'aide précieuse qu'elle nous apporté, pour tous ses efforts, ses conseils judicieux et pour son attention toute particulière, tout au long de la préparation de ce travail.

Nous tenons à remercier également l'ensemble du personnel et enseignants département de Technologie, qui ont contribué à notre formation.

On remercie toute la promotion génie de l'environnement et génie pharmaceutique.

Enfin, A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, d'une manière directe ou indirecte à l'élaboration de ce travail de fin d'études.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents

En témoignage de mon affection et reconnaissance pour tout ce qu'ils m'ont
donné

Sans vous je ne serais jamais arrivé jusque là

Je vous remercie pour votre soutien et votre amour inconditionnel

Vous n'avez jamais hésité à vous sacrifier pour ma réussite et mon bonheur.

À mes frères : *Zin Eddine et Islam.*

À ma sœur *Djehina* et à ma belle tante *Asma*, qui m'ont soutenu, je vous aime et
je vous souhaite du succès dans votre vie.

À mes belles familles *MOHAMMED BELKEBIRE* et *SELLAH.*

À Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien
acquis.

À mes amis.

Surtout ma partenaire dans ce projet, *Khawla*, à qui je souhaite bonne chance.

À tous ceux qui m'ont transmis leur savoir.

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donnée la force de continuer.

KENZA

Dédicaces

A ma mère *Fatiha*

Qui n'a jamais cessé de croire en moi et m'a soutenu moralement et matériellement.

Pour tous les sacrifices qu'elle a consentis pour mon éducation et mon bien être.

A mon mari *Omar* et mes Petites princesses *Tasnime* et *Aslihan*

A mes frères : *Othmane, Mohamed Réda, Alaa Eddine, Ali et Salah*

A ma sœur : *Samia*

A tous mes amis et mes proches sans exception qu'ils soient proches ou loin

A mon binôme *Kenza* et toute sa famille

A tous mes enseignants du primaire jusqu'au supérieur.

Ainsi qu'à tous mes camarades de la promotion génie des procédés de l'environnement

KHAWLA

الملخص

Opuntia ficus indica، المعروف باسم التين الشوكي ، هو نبات منتشر على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم. يتم استخدامه على شكل مسحوق أو عصير مستخلص من مضارب النبات. تهدف هذه الدراسة إلى إظهار قدرة الصبار على تقليل عوامل معينة لتلوث المياه، وهي التعكر، والمواد الصلبة العالقة، وCOD وبعض المعادن الثقيلة. بالإضافة إلى ذلك، تظهر النتائج الرئيسية لدراسات مختلفة قدرات التخثر / التلبد العالية جدًا للتخلص من الملوثات. بشكل عام، قلل الصبار بشكل كبير من حيازة العديد من ملوثات مياه الصرف الصحي. غالبًا ما تتجاوز النسبة المئوية لإزالة التعكر، COD وMES نسبة 90٪. من الاستخدامات الأخرى المحتملة للصبار إزالة المعادن الثقيلة مثل الكروم والزنك والنحاس والحديد والرصاص، بمعدل اختزال يتجاوز 90٪ للزنك والكروم. في ضوء هذه النتائج، يعد OFI حلاً بيئيًا وبديل مستدام، للأملاح المعدنية والبوليمرات الاصطناعية، للمعالجة عن طريق التخثر / التلبد لمياه الصرف الصحي التي تحتوي على الأصباغ. **الكلمات المفتاحية:** التين الشوكي، التلبد / التخثر، مسحوق الصبار، عصير الصبار.

Résumé

L'*Opuntia ficus indica* (OFI), connu sous le nom de Figuier de Barbarie, est une plante très répandue dans le monde.

Il est utilisé sous forme de poudre ou de jus, extrait à partir des raquettes de la plante

Cette étude vise à montrer, la capacité du cactus sur la réduction de certains paramètres de pollution d'une eau, à savoir la turbidité, les MES, la DCO et certains métaux lourds.

De plus, les principaux résultats, des différents travaux, montrent des capacités très élevées de coagulation-floculation pour l'élimination des polluants.

Généralement, le cactus a réduit de manière significative la teneur de nombreux polluants des eaux usées. Le pourcentage d'élimination de la turbidité, DCO et les MES a souvent dépassé les 90%.

D'autres utilisations possibles de cactus sont l'élimination des métaux lourds telle que le chrome, zinc, cuivre, fer et le plomb, avec un taux de réduction dépassant les 90% pour le zinc et le chrome.

En vue de ces résultats, l'OFI est une solution écologique et une alternative durable, aux sels métalliques et aux polymères de synthèse, pour le traitement par coagulation floculation, des eaux usées qui contiennent des colorants.

Mots clés : Opuntia Ficus Indica, Coagulation/Floculation, La poudre de cactus, Le jus de cactus.

Abstract

Opuntia ficus indica (OFI), known as the prickly pear, is a plant widely distributed around the world.

It is used as a powder or juice, extracted from the rackets of the plant

This study aims to show the ability of the cactus to reduce certain parameters of water pollution, namely turbidity, suspended solids, COD and certain heavy metals.

In addition, the main results from various studies show very high coagulation-flocculation capacities for the elimination of pollutants.

Generally, the cactus significantly reduced the tenure of many wastewater pollutants. The percent removal of turbidity, COD and SS has often exceeded 90%.

Other possible uses of cactus are the removal of heavy metals such as chromium, zinc, copper, iron and lead, with a reduction rate exceeding 90% for zinc and chromium.

In view of these results, OFI is an ecological solution and a sustainable alternative, to metal salts and synthetic polymers, for the treatment by coagulation flocculation, of wastewater that contains dyes.

Key words : Opuntia Ficus Indica, Coagulation / Flocculation, Cactus powder, Cactus juice.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Opuntia Ficus Indica

I.1. Introduction.....	03
I.2. Distribution géographique.....	03
I.3. Description botanique.....	04
I.4. Position systématique.....	05
I.5. Métabolisme et physiologie de la plante.....	06
I.6. Exigences écologiques.....	07
I.7. Cladodes	07
I.7.1. Morphologie.....	07
I.7.2. Compositions chimiques.....	08
I.7.3. Domaines d'applications du mucilage.....	11
I.8. Intérêts et utilisations.....	11
I.8.1. Usage alimentaire.....	11
I.8.2. Intérêts cosmétologiques.....	12
I.8.3. Usage médical.....	12
I.8.4. Usage agronomique.....	13
I.8.5. Intérêt économique.....	13
I.9. Utilisation de l'Opuntia ficus indica dans le traitement des eaux.....	13
I.10. Conclusion.....	15

Chapitre II : Généralités sur les eaux usées

II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition des eaux usées.....	16

Sommaire

II.3. Catégories d'eaux usées.....	17
II.3.1. Les rejets domestiques.....	17
II.3.2. Les rejets industriels.....	18
II.3.3. Les eaux agricoles.....	19
II.3.4. Les effluents d'origine naturelle.....	19
II.4. Les eaux usées de l'industrie de peinture.....	19
II.5. Principales substances polluantes présentes dans les eaux usées.....	21
II.5.1. Les micro-organismes.....	21
II.5.2. Les matières en suspension (MES).....	21
II.5.3. Les micropolluants organiques et non organiques.....	21
II.5.4. Les substances nutritives.....	22
II.6. Caractéristiques de la pollution des eaux usées.....	22
II.6.1. Paramètres organoleptiques.....	23
II.6.2. Paramètres physiques.....	23
II.6.3. Paramètres chimiques.....	25
II.6.4. Paramètres biologiques.....	27
II.7. les normes de rejets des eaux usées.....	27
II.7.1. Normes internationales.....	27
II.7.2. Normes Algériennes.....	27
II.8. Conclusion.....	29

Chapitre III : Procédé de coagulation-floculation

III.1. Introduction.....	30
III.2. Les colloïdes.....	30
III.3. La théorie de double couche électrique.....	31
III.3.1. Stabilité des particules.....	31
III.3.2. Potentiel Zêta.....	33
III.4. La coagulation-floculation.....	33
III.4.1. Déstabilisation des particules colloïdales.....	35
III.4.2. Les coagulants et floculant.....	37

Sommaire

III.4.3. Paramètres influençant la coagulation - floculation.....	38
III.5. Les avantages et les inconvénients de la coagulation –floculation.....	39
III.5.1. Avantages.....	39
III.5.2. Inconvénients.....	40
III.6. Conclusion.....	40

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1. Introduction.....	41
IV.2 Matériels & méthodes.....	41
IV.2.1. Préparation de cactus.....	41
IV.2.2. Procédure Jar-Test.....	43
IV.2.3. Méthodes d’analyses.....	44
IV.3. Résultats et discussions.....	46
IV.3.1. Analyse du bio-floculant.....	46
IV.3.2. Application de cactus pour le traitement d’effluents industriels.....	47
IV.4. Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Références bibliographiques.....	64

Listes des figures

Listes des figures

Figure I.1 : Répartition mondiale d'Opuntia ficus indica.....	04
Figure I.2 : L'Opuntia ficus indica.....	05
Figure I.3 : Cycle photosynthétique des plantes de type CAM.....	06
Figure I.4 : Morphologie des cladodes d'opuntia ficus indica.....	08
Figure II.1 : Rejet d'une eau usée dans l'environnement.....	16
Figure II.2 : eaux usées domestiques.....	17
Figure II.3 : les déchets liquides produits par une usine de peinture.....	20
Figure II.4 : Composants des eaux usées et leurs effets.....	22
Figure III.1 : Potentiel électrique de particules colloïdales.....	32
Figure III.2 : Modèle de Stern.....	33
Figure III.3 : coagulation-floculation.....	34
Figure III.4 : La compression de la double couche.....	35
Figure III.5 : Coagulation floculation par neutralisation des charges.....	36
Figure III.6 : illustration du phénomène de pontage.....	36
Figure IV.1 : Poudre du cactus.....	42
Figure IV.2 : Jus de cactus.....	43
Figure IV.3 : Flocculateurs type Jar-test.....	44
Figure IV.4 : Spectre I.R du jus de cactus.....	46
Figure IV.5 : Spectre IR de la poudre d'OFI.....	46
Figure IV.6 : Les taux d'élimination en fonction des combinaisons utilisés....	56
Figure IV.7 : Les taux d'élimination des métaux lourds.....	58

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification botanique d'Opuntia ficus indica.....	05
Tableau I.2 : Principaux composants des cladodes du figuier de Barbarie.....	09
Tableau I.3 : Composition des cladodes en acides organiques à deux différents temps de récolte.....	10
Tableau I.4 : Composition en polyphénols des cladodes du l'OFI.....	11
Tableau I.5 : Produits potentiels et sous-produits du Figuier de Barbarie.....	13
Tableau II.1 : Concentration moyenne des eaux usées domestiques.....	18
Tableau II.2 : Classification des eaux selon la conductivité.....	24
Tableau II.3 : Normes de rejets internationales.....	27
Tableau II.4 : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels.....	28
Tableau III.1 : Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de Stokes.....	31
Tableau III.2 : Phénomènes se produisant durant la coagulation – floculation...	34
Tableau III.3 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer.....	37
Tableau III.4 : Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium...	38
Tableau IV.1 : Les conditions utilisées pour préparer la poudre cactus.....	42
Tableau IV.2 : Résultats de traitement de l'article 1.....	48
Tableau IV.3 : Résulta de traitement de l'article 2.....	49
Tableau IV.4 : Résultats de traitement de l'article 3.....	50
Tableau IV.5 : Bilan de traitement des différents effluents par la poudre d'OFI...	51
Tableau IV.6 : Traitement des eaux usées avec la combinaison de JC / SA.....	54
Tableau IV.7 : L'utilisation le bio-floculant (JC) seul.....	55

Liste des tableaux

Tableau IV.8 : Traitement des eaux usées avec la combinaison de chaux / JC..... 56

Tableau IV.9 : Traitement des eaux usées avec JC seul..... 57

Liste des abréviations

Liste des abréviations

CAM : Crassulacean Acid Metabolism

CE : Conductivité Electrique

COT : Carbone Organique Total

COV : composés organiques volatils

CT : Coupe Transversale

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

DCE : Double Couche Electrique

DCO : Demande Chimique en Oxygène

I.R.T.F : Infra Rouge à Transformée de Fourier

JC : Jus de Cactus

MES : Matières En Suspension

MM : Matières Minérale

MVS : Matières Volatiles en Suspension

OFI : Opuntia Ficus Indica

PC : Poudre de Cactus

pH : potentiel Hydrogène

pZ : potentiel Zéta

SA : Sulfate d'Aluminium

SAA : Spectrométrie d'Absorption Atomique

TSC : Température de Séchage de Cactus



Introduction générale

Introduction générale

Pourquoi pouvons-nous vivre sur cette planète ? Pourquoi animaux et plantes peuvent-ils vivre ici ? Si nous nous efforçons de trouver la réponse à ces inquisitions, nous pouvons facilement percevoir que l'eau est la source de la vie. Selon les biologistes, toute forme de vie provenait de la mer, c'est-à-dire de l'eau.

Près de 71% de la surface totale de la terre est recouverte d'eau, seulement 2,5% de cette quantité peut être considérée comme de l'eau douce.

Cependant, ces ressources en eau limitées sont menacées par la pollution, principalement générée par des facteurs humains. Le secteur agricole, la production industrielle, l'exploitation minière, la production d'électricité et d'autres facteurs sont certains des contributeurs à la pollution des masses d'eau, qui éventuellement affecter les humains en général. [1]

C'est ainsi que les rejets des eaux dites 'usées' ont considérablement évolué en quantité et en complexité. Le traitement ou l'épuration des eaux usées a donc pour objectif de réduire la charge polluante qu'elles véhiculent afin de rendre au milieu aquatique une eau de qualité, respectueuse des équilibres naturels et de ses usages futurs. [2]

Les procédés mécaniques et physiques comme le dégrillage, le dessablage et les traitement biologiques par boue activées ont permis d'éliminer une grande partie des matières contenues dans l'eau. Mais après ces opérations l'eau contient toujours une quantité des substances composées de matières en suspension, des colloïdes, les métaux lourds et de des particules très fines difficilement décantables.

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes et peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. [3] Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension. [4]

Introduction générale

Des coagulants chimiques conventionnels tels que l'alun, le chlorure de poly-aluminium (PAC) et les composés ferriques ont été utilisés pour éliminer les particules en suspension et colloïdaux ainsi que les composés organiques.

Bien que ces composés aient d'excellentes performances de coagulation, le coût chimique associé et l'impact négatif sur l'environnement doivent être pris en considération. Par exemple, les sels d'aluminium sont suspectés de provoquer la maladie d'Alzheimer. Dans ce contexte, les coagulants naturels à base de plantes peuvent être des alternatives potentielles aux coagulants chimiques.

Le genre *Opuntia ficus indica* (OFI) est le plus grand de la famille des Cactacées, OFI a été utilisé auparavant comme coagulant naturel pour le traitement de l'eau potable et le traitement de flux industriels tels que les effluents de peinture. [5]

Pour illustrer notre travail, nous avons choisi de valoriser un bio-floculant, extrait des raquettes de la plante d'OFI. Le but de notre recherche est de commenter les différentes études qui ont étudié la possibilité d'utiliser l'OFI comme floculant dans un coagulant - floculation des eaux usées provenant de déchets industriels contenant des niveaux élevés de demande chimique en oxygène (DCO), de turbidité, de métaux lourds et de colorants.

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

- Les caractères botaniques de l'OFI, la systématique, ainsi les importances de cette plante dans le traitement des eaux usées dans le premier chapitre.
- Le second chapitre traite des généralités sur les eaux usées : leurs l'origine et les caractéristiques physico-chimique et ceux biologiques sont largement abordées.
- Dans le chapitre suivant, consacrée au procédé physicochimique de la coagulation-floculation, ses mécanismes, les coagulants et floculants utilisés et les paramètres qui influencent ce procédé.
- Le dernier chapitre est consacré aux matériaux et méthodes et les résultats de plusieurs études précédentes et nous discussions à leur sujet, et nous avons terminé par une conclusion.

Chapitre I

Opuntia ficus indica

I.1. Introduction

L'Opuntia est originaire d'Amérique (Mexique), se trouve actuellement dans tous les continents. Il existe, généralement, dans les régions à climat tropical et subtropical et à faible pluviométrie.

Le figuier de barbarie appartient au genre Opuntia, est subdivisé en onze sous genres. Le sous genre le plus important en Algérie est le sous genre Platy-opuntia. Toutefois, sa grande adaptation à la sécheresse a été expliquée par sa capacité d'emménagement des réserves d'eau et sa capacité de réduction de la transpiration par le biais de ses caractéristiques physiologiques et morphologiques [6].

I.2. Distribution géographique

Le genre Opuntia est originaire du Mexique. Sa distribution géographique est localisée principalement dans : le Mexique, la Sicile, le Chili, le Brésil, la Turquie, la Corée, Argentine et l'Afrique du Nord.

Il a été introduit d'abord en Espagne et plus tard, au 16ème siècle au Nord et au sud de l'Afrique. Il s'est diffusé rapidement dans le bassin méditerranéen. Il est développé sur la partie ouest de la Méditerranée : Sud de l'Espagne, le Portugal et l'Afrique du Nord (la Tunisie, l'Algérie et le Maroc) [7]. Dans certains pays tels que l'Italie, l'Espagne, le Mexique, la culture du cactus est pratiquée de façon intensive et moderne avec des programmes de recherche et développement pour la production du fruit ou de fourrage et même pour des usages industriels. En revanche, en Australie et en Afrique du Sud, ce végétal, en particulier la variété asperme est considérée comme une mauvaise herbe [8].

La Figure I.1, montre la distribution géographique du figuier de barbarie dans le monde.

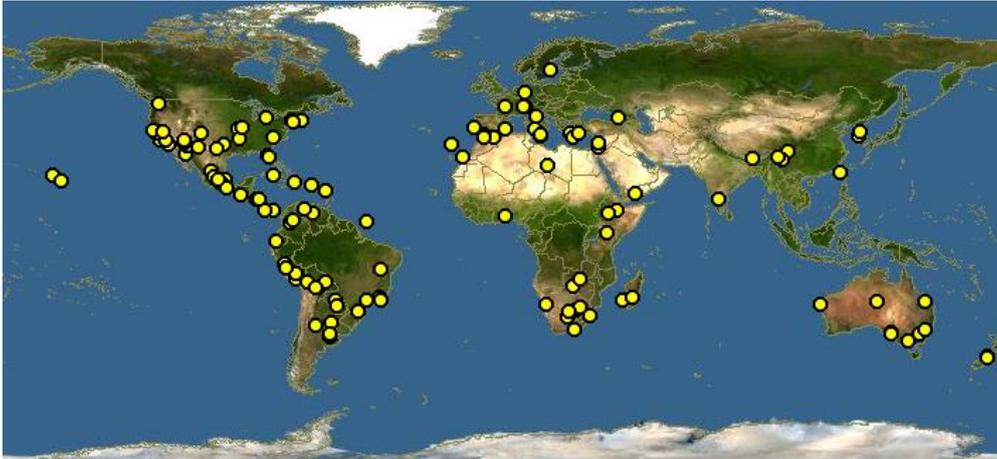


Figure I.1 : Répartition mondiale d'*Opuntia ficus indica* [8].

I.3. Description botanique

La famille des cactacées renferme environ 1500 espèces. L'espèce *Opuntia ficus indica* (OFI) est la cactée qui a la plus grande importance agronomique, tant pour les fruits que pour les raquettes.

L'OFI est une plante arborescente vivace et érigée de 3 à 5 m de haut, à tiges charnues, caliciformes, apparemment aphyllées. Elle possède un tronc épais et ligneux, une organisation en articles aplatis, de forme elliptique ou ovoïdale de couleur vert-mat, ayant une longueur de 30 à 50 cm, une largeur de 15 à 30 cm et une épaisseur de 1.5 à 3 cm appelés cladodes ou raquette. Ses cladodes assurent la fonction chlorophyllienne et sont recouvertes d'une cuticule cireuse (la cutine) qui limite la transpiration et les protège contre les prédateurs. Leurs méristèmes produisent des épines, des glucides, des racines adventives, de nouvelles cladodes ou des fleurs. Les épines sont blanchâtres, sclérifiées, solidement implantées et longues de 1 à 2 cm. Il y a en effet deux variétés d'*Opuntia*, la variété inerme et l'épineuse [8].

L'OFI donne des fleurs au sommet des raquettes, de couleur jaune ou orange large de 4 à 10 cm. Ces fleurs donnent naissance à un fruit appelé figue de barbarie présent sous forme d'une grosse baie ovoïde et charnue, ornée de petites épines. Le fruit est généralement verdâtre, mais prend une couleur variant du jaune clair au rouge violacé à maturité [7].

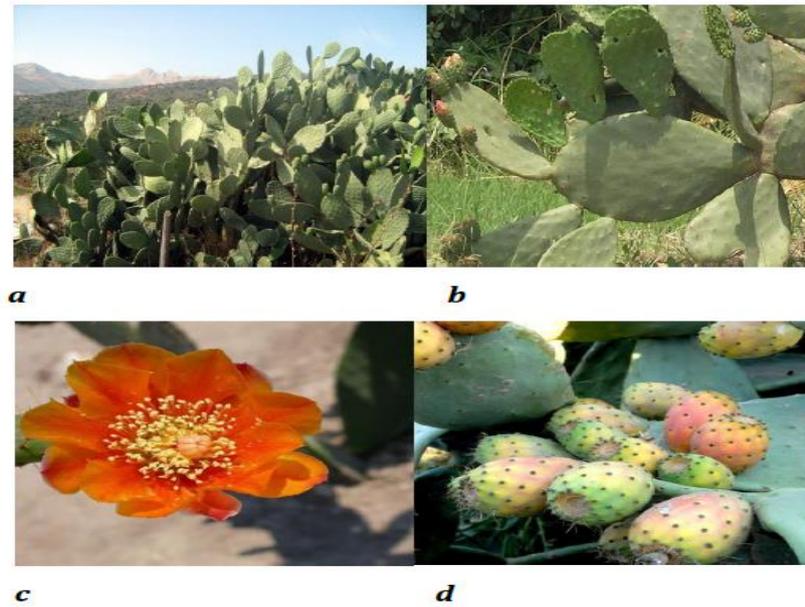


Figure I.2 : L'Opuntia ficus indica : a) la plante, b) les cladodes, c) les fleurs, d) les fruits.

I.4. Position systématique

La classification botanique d'Opuntia ficus indica est rappelée ci-dessous (Tableau I.1) :

Tableau I.1 : Classification botanique d'Opuntia ficus indica [9].

Règne	Plantae
Sous règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Caryophyllidae
Ordre	Caryophyllales
Famille	Cactaceae
Sous-famille	Opuntioideae
Tribu	Opuntieae
Genre	Opuntia
Espèce	Opuntia ficus indica

- Nom commun : Figuier de Barbarie.
- Nom latin : Opuntia ficus-indica.
- Autres noms : Figuier des Indes, figue du désert, nopal, semelle du pape, figuier d'Espagne.

I.5. Métabolisme et physiologie de la plante

L'adaptation du figuier de barbarie à la sécheresse est due à une photosynthèse de type Crassulacean Acid Metabolism (CAM) (Figure I.3). Le figuier de barbarie a la particularité de fixer le CO₂ et de libérer l'O₂ pendant la nuit et de fermer ses stomates pendant le jour. Ce dispositif permet une moindre perte d'eau par évapotranspiration pendant les heures les plus chaudes.

Pendant la nuit le CO₂ est fixé dans les tissus de chloroplaste par réaction avec le phosphoénolpyruvate, résultant du métabolisme des sucres via la glycolyse pour donner l'oxaloacétate.

Cet élément est à son tour transformé en malate pour être stocké dans la vacuole, d'où le nom de plante à métabolisme acide. Pendant le jour, le malate se décompose en pyruvate et libère le CO₂ et l'H₂O directement au niveau des tissus chlorophylliens qui s'en servent pour la suite de photosynthèse [10].

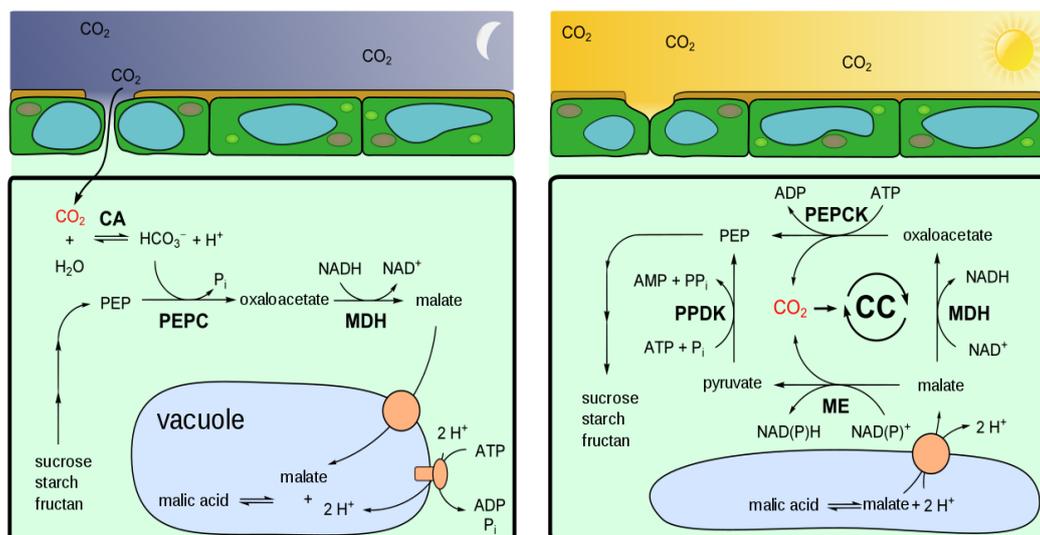


Figure I.3 : Cycle photosynthétique des plantes de type CAM [7].

I.6. Exigences écologiques

Le genre *Opuntia* est xérophyte. Il croit principalement dans les zones arides et semi-arides. Sa remarquable variabilité génétique lui procure une forte adaptabilité écologique, ce qui lui permet de vivre sous différentes conditions climatiques [11].

Il croit dans les plaines, les régions côtières et les plateaux. Il craint les fortes gelées et peut supporter des températures minimales jusqu'à -10°C pour quelques heures. Cette tolérance dépend de la turgidité du tissu chlorenchymateux des cladodes. Les températures maximales supportées excèdent les 50 à 58°C . Bien que cette espèce ait une large faculté d'adaptation pour différents sols (acides, calcaires ou pauvres en matière organique), elle a une préférence pour les sols très perméables, sableux ou caillouteux [8].

I.7. Cladodes

I.7.1. Morphologie

Le terme feuilles d'OFI est fréquemment utilisé dans la littérature pour désigner les segments de tiges aplaties de la plante qui remplacent les feuilles dans leurs fonctions. Ces tiges de cactus, les raquettes de cactus ou cladodes sont les termes corrects, synonyme de « nopales ». Les tiges sont composées d'un parenchyme blanc (tissu de base) et le contenant de la chlorophylle au sein du chlorenchyme (tissu de cortex) (figure I.4). Ce dernier est recouvert d'épines (feuilles modifiées) et poils ou trichomes multicellulaires, qui forment l'aréole et qui est une caractéristique des membres de la famille des cactacées [12].

Les glochides sont composées de 100% de cellulose cristalline. Les micro-fibrilles de cellulose sont de $0,4$ mm de longueur et de 6 à 10 μm en diamètre, et sont parallèlement ancrées dans une matrice d'arabinose. Celle-ci est en présente sous forme de gel solide, tissé et serré avec la cellulose. Les épines sont constituées de 96% de polysaccharides, qui eux-mêmes sont divisés en 49,7% de cellulose et 50,3% d'arabinose, le reste est constitué de cendres, matières grasses, cires et la lignine. Elles mesurent 1 à 3 cm de longueur et forment 8,4% du poids total de la cladode. Leurs fonctions comprennent la protection mécanique face aux herbivores, la réflexion de la lumière, l'ombre pour la tige, et donc permettent la réduction de la perte en eau ainsi que la condensation du brouillard [12].

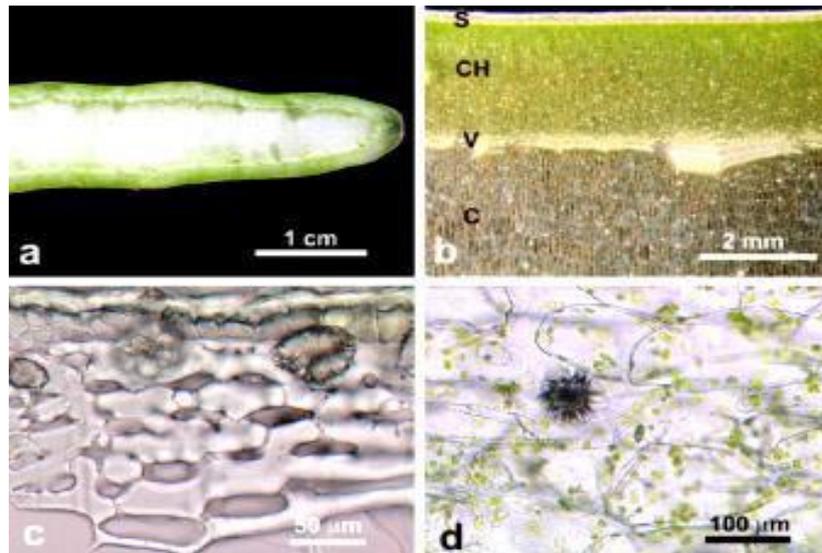


Figure I.4 : Morphologie des cladodes d'*Opuntia ficus indica* : a) Coupe transversale (CT) de l'ensemble de la cladode ; b) CT des couches extérieures de la cladode montrant la peau (S), chlorenchym (CH), vaisseaux conducteurs (V), parenchym (C) ; c) : CT de la peau montrant un hypoderme à parois épaisse ; (d) : CT du chlorenchym avec des plasmides et des cristaux oxalate [13].

I.7.2. Compositions chimiques

I.7.2.1. Les principaux constituants

La composition chimique des cladodes varie en fonction des facteurs édaphiques, l'endroit de la culture, la saison et l'âge de la plante. Par conséquent, les teneurs en éléments nutritifs respectifs varient à la fois entre les espèces et les variétés et ils ne devraient pas être pris comme des valeurs absolues (tableau I.2) [14].

Tableau I.2 : Principaux composants des cladodes du figuier de Barbarie [14].

Composants	Matière sèche (g/100g)	Poids frais (g/100g)
Eau	-	88-95
Glucides	64-71	3-7
Cendres	19-23	1-2
Fibres	18	1-2
Protéines	4-10	0.5-1
Lipides	1-4	0.2

I.7.2.2. Les minéraux

Dans les cladodes, les principaux minéraux sont le potassium et le calcium, avec des quantités allant de 0,24 à 5,5 g dans 100 g de matière sèche (MS). Dans la pulpe (partie molle et charnue des végétaux), le potassium est présent à 161 mg pour 100 g de MS de cladode, dépassant la concentration d'autres minéraux comme le calcium et le magnésium [15].

I.7.2.3. Les sucre

Les sucres sont présents sous forme polymérique (cellulose et amidon) ou monomérique. Certaines recherches ont montré que le mucilage d'OFI contient du D-glucose, du D-galactose, de l'arabinose, du D-xylose et du L-rhamnose. La teneur en sucre libre est de 0,32 % du poids sec. Dans une autre étude, la fraction de sucre réducteur a été rapportée à 0,64 - 0,88 % de poids sec [15].

I.7.2.4. Acides organiques

L'acide malonique et l'acide citrique représentent respectivement 36 et 178 mg /100g de poids frais (tableau I.3). En revanche, les cladodes âgées ne contiennent plus d'acide malonique. L'acide tartrique et succinique a été trouvé seulement en état de traces. L'augmentation de l'acide piscidique est due à l'augmentation avec l'âge, alors que l'acide phorbique a été réduit de moitié de la valeur initiale. Les deux acides phorbique et piscidique sont rarement rencontrés dans la nature et limités aux plantes présentant un métabolisme acides succulents (CAM) [12].

Tableau I.3 : Composition des cladodes en acides organiques à deux différents temps de récolte [14].

Acides organiques	Poids frais (mg/100g) 6h (matin)	Poids frais (mg/100g) 18h (après-midi)
Acides oxalique	35	35
Acides malique	985	95
Acides citrique	178	31
Acides malonique	36	traces
Acides succinique	traces	traces
Acides tartrique	traces	traces

I.7.2.5. Les acides aminés et les protéines

En général, les protéines varient entre 4 et 10 % de la composition chimique de cladode. L'acide aminé détecté majoritaire est la glutamine, suivie par la leucine, la lysine, la valine, l'arginine, la phénylalanine et l'isoleucine [15].

I.7.2.6. Glucides

Les glucides constituent un total de 36% à 37% de l'ensemble du poids sec des cladodes. La teneur en glucides est comprise entre 64 et 71 g /100 g par rapport au poids sec. Les jeunes cladodes sont plus riches en glucides [13].

I.7.2.7. Composants phénoliques

Parmi les acides phénoliques qui ont été détectés on peut citer l'acide ferulique, l'acide p-Coumarique, l'acide 4-Hydroxybenzoïque, l'acide caféique, l'acide salicylique, et l'acide gallique. Les flavonoïdes détectés sont la rutine, l'iso-quercitrine, la nicotiflorine et la narcissine [16].

Tableau I.4 : Composition en polyphénols des cladodes du l'Opuntia ficus-indica [17].

Polyphénols	Matière sèche (mg / 100 mg)
Acide gallique	0.64 – 2.37
Coumarique	14.08 – 16.18
3,4- dihydroxybenzoïque	0.06 – 5.02
4-hydroxybenzoïque	0.5 – 4.72
Acide ferulique	0.56 – 34.77
Acide salicylique	0.58 – 3.54
Isoquercetine	2.29 – 39.67
Isorhamnetin-3-O-glucoside	4.59 – 32.21
Nicotiflorine	2.89 – 146.5
Rutine	2.36 – 26.17
Narcissine	14.69 – 137.1

I.7.3. Domaines d'applications du mucilage

Le mucilage d'OFI est considéré comme une source potentielle d'hydro-colloïdes Industriels, des utilisations multiples ont été trouvées pour ce composant comme épaississant et émulsifiant alimentaire, comme adhésif pour la chaux, comme super-plastifiant naturel dans le mortier et comme produit alimentaire [18].

Le mucilage est utilisé comme agent mucoprotecteurs en raison de sa capacité à former un réseau moléculaire et à retenir une quantité importante d'eau [19].

Il a été aussi utilisé comme bio-coagulant dans le processus d'électrocoagulation-électroflottation afin d'améliorer le rendement d'élimination du trouble et du cuivre en eaux polluées [20].

I.8. Intérêts et utilisations

Le figuier de Barbarie est l'exemple typique d'espèce parfaitement convenable pour la mise en valeur des zones arides et semi-arides. Sa culture est peu exigeante en investissements et le revenu qu'elle peut générer est important. En plus, sur le plan environnemental le Nopal, depuis les racines jusqu'à ses épines, appartient aux plantes les plus utilisées dans différents domaines notamment en médecine traditionnelle. Ainsi, l'OFI est connu pour ses nombreuses utilisations et divers intérêts :

I.8.1. Usage alimentaire :

Les fruits sont appréciés et donnent lieu à plusieurs produits. La pulpe et le jus sont les utilisations les plus communes et domestiques du figuier de barbarie. Plusieurs études ont été faites sur le jus et ont montré que ce produit a un goût et un parfum agréables. Une autre possibilité est la production des jus concentrés qui manifestent une bonne stabilité microbiologique. La pulpe peut être utilisée pour préparer des gels comme les gels de pomme et cognassiers. La confiture est un autre produit qui peut être préparé à partir du fruit. Elle présente une bonne qualité sensorielle et une stabilité microbiologique. Les fruits déshydratés sont une autre forme comestible du produit.

En plus des fruits les jeunes pousses d'opuntia, appelées "Nopalitos" sont consommées aussi comme légume au Mexique et dans le sud des Etats Unis. Elles sont riches en vitamine C et en Calcium et leur valeur nutritive est proche de celle de la laitue et des épinards [21].

L'OFI reste verte et est utilisée comme une culture d'alimentation d'urgence pour l'élevage du bétail. En Algérie, l'incorporation de cladodes OFI dans la nourriture des brebis (ovins) à Tiaret, a satisfait leurs besoins énergétiques, leurs utilisations comme complément alimentaire étaient donc recommandées dans les zones sèches [22].

Tableau I.5 : Produits potentiels et sous-produits du Figuier de Barbarie [23].

Produits	Sous-produits
Fruits	Jus en poudre
Jus, nectar, pulpe	Pigments
Confiture, purée, gelée	Fibres et mucilages
Sirop, édulcorant	/
Bioéthanol, vin	/
Fruits en conserve	/

I.8.2. Intérêts cosmétologiques

Depuis des décennies, Les femmes berbères utilisaient l'huile d'OFI pour cicatriser et pour protéger leur peau du vent brûlant du désert pour ses vertus cosmétiques. Selon elles, l'huile de figes de barbarie constitue une arme redoutable pour lutter contre les agressions du temps et redonne à la peau du visage son tonus et sa fermeté. Aujourd'hui, les industriels s'intéressent de plus en plus à la production de l'huile des graines d'Opuntia ficus-indica.

Les Indiennes préparaient du savon, le shampooing et des onguents à base de mucilage des raquettes et de jus des figes de barbarie [21].

I.8.3. Usage médical

Opuntia ficus indica est l'une des plantes les plus utilisées dans la médecine traditionnelle en raison de son rôle dans le traitement d'un certain nombre de maladies tels que les diarrhées, les coliques et les maux de rein, en outre l'Opuntia possède des propriétés antimicrobiennes, anti-oxydantes et anti-inflammatoires [24].

En Australie et en Afrique du Sud, l'effet hypoglycémique des "Nopalitos" est utilisé dans le traitement des diabètes non dépendants de l'insuline. Le mucilage isolé des raquettes permet de réduire le cholestérol total dans le sang.

En Mexique, on utilisait les raquettes hachées sous forme de cataplasmes dans le pansement des foulures, des entorses et dans la réduction des fractures [21].

I.8.4. Usage agronomique

Dans le figuier de Barbarie rien n'est à jeter. Que ce soient les résidus des raquettes ou des fruits, chaque partie de la plante constitue un excellent fertilisant. Par sa présence, l'Opuntia aide à la régénération des sols épuisés par la culture. Il fixe les terrains ravinés par les pluies ou sujets aux éboulements, il stabilise les terres sablonneuses et les dunes des rivages maritimes [21].

I.8.5. Intérêt économique

La culture du figuier de barbarie ne nécessite pas de sources importantes en eau, ni de traitements antiparasitaires. De plus, le cactus présente de faibles coûts énergétiques pour la culture en implantation spécialisées [25].

I.9. Utilisation de l'Opuntia ficus indica dans le traitement des eaux

Diaz A. (1999) a étudié la capacité du cactus d'agir comme un coagulant naturel, en utilisant une eau synthétique d'une turbidité de 100 NTU. Le traitement a permis d'obtenir une eau potable pour la ville de Marakaibo, une eau dont la turbidité finale est proche de 5 NTU [26].

Jindong Zhang et coll. (2006) ont étudié l'effet coagulant du cactus dans le traitement des eaux prélevés d'une station de traitement d'eau usée située à Wuhan (Chine), les résultats montrent une efficacité d'élimination de la turbidité de 98 %, il a été testé aussi pour traiter une eau usée, les résultats montrent que le cactus a pu diminuer la turbidité de 70 à 10.5 NTU [27].

Abid et coll. (2009) ont étudié l'utilisation d'un nouveau flocculant naturel biodégradable à base de jus de cactus marocain dans un procédé physico-chimique (coagulation-floculation), pour traiter des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension, et aussi pour tester l'efficacité de ce jus vis-à-vis des autres produits couramment utilisés dans le traitement des eaux usées. L'association d'une coagulation avec la chaux suivie d'une floculation avec le jus de cactus marocain puis d'une décantation, a montré un effet très significatif sur l'élimination du zinc, du cuivre et de la matière en suspension. Le pourcentage d'abattement des métaux dépasse 95 % pour le cuivre et le zinc [28].

Hadj-Kouider S. (2011) a réalisé un conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration des eaux usées de Braki (wilaya d'Alger). Le cactus a été utilisé, afin d'augmenter la siccité des boues déshydratées. Les résultats obtenus par le jus de cactus sont encourageants, puisqu'il diminue la turbidité de 96 % pour une eau filtrée de la boue de Braki, et permet d'obtenir une siccité de 31 %, obtenue par centrifugation [29].

Kazi T. et coll. (2013) ont utilisé la poudre de l'OFI dans le traitement des eaux usées de tanneries. Les résultats obtenus ont montré une diminution de la turbidité de 75.54 % et la DCO de 80.65 % [30].

Belbahloul M. et coll. (2014) ont étudié le pouvoir épuratoire de l'extrait de cactus *Opuntia Ficus Indica* (OFI), dans le traitement des eaux usées préparées au sein de leur laboratoire. L'étude a été réalisée sur des échantillons chargés en Zinc et en Matières En Suspension (MES). Le traitement a été basé sur une coagulation avec la chaux, suivi d'une floculation avec l'extrait de cactus. Ce dernier a montré un effet très significatif sur l'élimination du Zinc et de la MES avec un rendement avoisinant respectivement 96% et 99% [31].

S. Vishaliune et R. Karthikeyan (2014) ont étudié la potentialité de OFI, comme coagulant pour le traitement des eaux usées industrielles de peinture à base d'eau simulées en termes de couleur, d'oxygène chimique la demande (DCO) et la turbidité. Il a été constaté que l'efficacité d'élimination augmentait que la charge de pollution gonflait. Les résultats obtenus ont été comparés au chlorure ferrique coagulant conventionnel. Les résultats ont reconnu que OFI, un coagulant naturel et respectueux de l'environnement, pourrait être une alternative coagulant conventionnel dans le traitement des eaux usées de peinture à base d'eau [32].

I.10. Conclusion

L'*Opuntia ficus indica* est une plante grasse, arborescente. Originnaire du Mexique, elle s'est acclimatée sur tout le pourtour de la Méditerranée. Sa tige constituée en raquettes (appelées cladodes) est très reconnaissable. L'OFI produit un fruit comestible, la figue de barbarie.

De plus, grâce à sa diverse composition de cladodes et de mucilage, elle est utilisée dans différents domaines : alimentaire, industriel, pharmaceutique et écologique.

Chapitre II

Généralité sur les eaux usées

II.1. Introduction

Les eaux usées sont des milieux extrêmement complexes, altérées par les activités anthropiques à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autre. Elles sont considérées comme polluées et doivent être donc traitées avant toute réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs.

C'est pourquoi, dans un souci de respect de ces différents milieux naturels récepteurs, des traitements d'abattement ou d'élimination de ces polluants sont effectués sur tous les effluents urbains ou industriels. Ces traitements peuvent être réalisés de manière collective dans une station d'épuration ou de manière individuelle également par des procédés intensifs ou extensifs [33].

II.2. Définition des eaux usées

Une eau usée est une eau chargée de substances minérales ou biologiques, issues de l'activité humaine provoquant, sous une concentration anormale, une dégradation de la qualité de l'eau. Les eaux usées constituent un milieu de culture pour de très nombreuses espèces de micro-organismes pathogènes et à ce titre elles pouvant être à l'origine de graves problèmes de santé publique surtout dans les pays où les conditions d'hygiène sont défavorables [34].



Figure II.1 : Rejet d'une eau usée dans l'environnement [35].

Les eaux usées regroupent les eaux usées domestiques (les eaux vannes et les eaux ménagères), les eaux de ruissellement et les effluents industriels (eaux usées des usines).

II.3. Catégories d'eaux usées

II.3.1. Les rejets domestiques

Les eaux usées d'origine domestique sont issues de l'utilisation de l'eau (potable dans la majorité des cas) par les particuliers pour satisfaire tous les usages ménagers. Lorsque les habitations sont en zone d'assainissement collectif, les eaux domestiques se retrouvent dans les égouts. On distingue généralement deux « types » d'eaux usées domestiques qui arrivent toutes deux dans le réseau d'assainissement : [36]

- les eaux vannes, qui correspondent aux eaux de toilettes.
- les eaux grises qui correspondent à tous les autres usages : lave-linge, lave-vaisselle, douche/bain, etc.



Figure II.2 : Les eaux usées domestiques [35].

La composition des eaux usées d'origine domestique peut être extrêmement variable, et dépend de trois facteurs :

- la composition originelle de l'eau potable, qui elle-même dépend de la composition de l'eau utilisée pour produire l'eau potable, de la qualité du traitement de cette eau, des normes sanitaires du pays concerné, de la nature des canalisations, etc.
- les diverses utilisations par les particuliers qui peuvent apporter un nombre quasi-infini de polluants : tous les produits d'entretien, lessives mais aussi, solvants, peintures, mercure de thermomètre, colle, etc [36].

Tableau II.1 : Concentration moyenne des eaux usées domestiques [37].

Paramètres	Variation	Unité	Fonction décantable	Unité
Température	4 – 26	°C	/	/
pH	7.0 – 8.5	/	/	/
Extrait sec	1000 – 1300	mg/l	10	%
MES totales	100 – 400	mg/l	50 – 60	%
DCO	300 – 1000	mgO ₂ /l	30	%
DBO ₅	150 – 500	mgO ₂ /l	25 – 30	%
COT	100 – 300	mg/l	30	%
Alcalinité	2 – 15	mgCaCO ₃ /l	/	/
NTK	30 – 100	mg/l	< 10	%
Azote ammoniacale	20 – 80	mgNH ₄ ⁺ /l	0	%
Nitrites et nitrates	< 1	mg (NO ₂ ²⁻ , NO ₃ ⁻)/l	0	%
Phosphates	10 – 25	mgPO ₄ ³⁻ /l	10	%

II.3.2. Les rejets industriels

Tous les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc. L'article L.35-8 du Code de la santé publique précise que le déversement de ces eaux dans les égouts publics n'est pas un droit et doit être préalablement autorisé par la collectivité.

Les rejets industriels peuvent donc suivre trois voies d'assainissement :

- Ils sont directement rejetés dans le réseau domestique ;
- Ils sont prétraités puis rejetés dans le réseau domestique ;
- Ils sont entièrement traités sur place et rejetés dans le milieu naturel. Ce dernier cas ne nous intéresse pas dans le cadre de la réutilisation des eaux usées épurées.

Dans le cas d'un rejet dans le réseau domestique, avec ou sans prétraitement, les effluents industriels peuvent fortement modifier la composition des eaux usées. Cette modification est très étroitement liée à l'activité industrielle concernée et peut prendre des formes innombrables [36].

II.3.3. Les eaux agricoles

L'agriculture est une source de pollution des eaux non négligeable car elle apporte les engrais et les pesticides. Elle est la cause essentielle des pollutions diffuses. Les eaux agricoles issues de terres cultivées chargés d'engrais nitrates et phosphates, sous une forme ionique ou en quantité telle, qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés par les plantes, conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues [33].

II.3.4. Les effluents d'origine naturelle

La teneur de l'eau en substances indésirables est le fait de l'activité de certains phénomènes naturels (irruptions volcaniques, contact de l'eau avec les gisements minéraux,...).

L'effluent entrant en station peut comporter une part d'eaux parasites dues à des défauts de structure du réseau (mauvaise conception, malfaçons, collecteurs endommagés). On distingue les eaux parasites de temps sec qui correspondent à l'intrusion d'eau de la nappe phréatique, et les eaux parasites pluviales, qui concernent uniquement les réseaux séparatifs eaux usées et qui sont dues à des erreurs de raccordement, voire à du drainage rapide [37].

II.4. Les eaux usées de l'industrie de peinture

Les filières industrielles utilisent dans leurs procédés de fabrication des volumes importants d'eau et de produits chimiques au travers de formulations commerciales diverses et variées. Or, utiliser l'eau, c'est aussi accepter de la contaminer [38].

Le monde industriel utilise les colorants dans pratiquement tous les domaines que cela soit en textile et tannerie pour colorer tissus et cuirs, ou bien en agroalimentaire pour colorer gâteaux, bonbons et boissons, ou encore en papeteries, traitement de surface, fabrication d'encres et de peintures... La particularité de ces polluants est que leur rôle de colorant industriel les contraint à ne pas pouvoir facilement perdre leur couleur par dénaturation de leur structure.

La peinture est une composition de mastic liquéfiable utilisée pour les fins industrielles. Les peintures peuvent être classées comme peintures à base d'eau et peintures à base d'huile. Les peintures à l'eau sont mélanges complexes de pigments organiques [39], et inorganiques ou en combinaison (pigments à effet utilisés dans l'industrie) insolubles dans le milieu de dispersion. Parmi les pigments utilisés dans l'industrie : (Oxyde de zinc (ZnO), oxyde de

chrome (Cr_2O_3), chromate de plomb (PbCrO_4) [40], désépaississant et non cellulosique, matières colorantes, allongeurs, etc. l'utilisation de peintures à base d'huile pour la construction et lasse sont rapidement transformés en peintures à base d'eau.

Actuellement, plus de 90% des peintures utilisées pour la construction les fins sont à base d'eau. En raison de nombreux produits chimiques utilisées, les eaux usées générées lors de la fabrication de peinture contiennent une concentration considérable de matières organiques, de solides en suspension, matières colorées et polluants nocifs tels que des résidus de métaux lourds, par exemple des pigments utilisés (titane, chrome, plomb, nickel, zinc en poudre, sulfate de baryum, noir de fumée...etc.), Très dangereux pour l'environnement [39].

Des études scientifiques récentes ont révélé que les eaux usées de l'industrie de peinture provoquent des irritations cutanées, des maladies respiratoires, et de l'eczéma chez les enfants et à des concentrations élevées, sont cancérigènes. En outre, l'industrie des revêtements a été identifiée comme l'une des principales sources d'émissions des composés organiques Volatiles (COV) provenant des carreaux. Parmi les différents composés, le glycol et les alcools sont souvent utilisés dans les peintures à l'eau.

Par conséquent, le traitement de ces eaux usées comprenant une combinaison complexe de substances organiques toxiques composés est très importante. Technologies de traitement courantes adoptées par les industries de la peinture inclure des traitements physico-chimiques tels que la sédimentation, coagulation et floculation [39].



Figure II.3 : Les déchets liquides produits par une usine de peinture [41].

II.5 Principales substances polluantes présentes dans les eaux usées

II.5.1. Les micro-organismes

Ils constituent le principal danger sanitaire pour la réutilisation des eaux usées épurées. Les micro-organismes comprennent, par ordre croissant de taille : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes [42].

II.5.2. Les matières en suspension (MES)

Ce sont des matières biodégradables pour la plupart. Les micro-organismes sont le plus souvent adsorbés à leur surface et sont ainsi transportés par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur [42].

II.5.3. Les micropolluants organiques et non organiques

Les micropolluants sont des éléments présents en quantité infinitésimale dans les eaux usées. La voie de contamination principale, dans le cas d'une réutilisation des eaux usées épurées, est l'ingestion. C'est la contamination par voie indirecte qui est généralement préoccupante. Ainsi, certains micropolluants, comme les métaux lourds ou les pesticides, peuvent s'accumuler dans les tissus des êtres vivants, et notamment dans les plantes cultivées. Il peut donc y avoir une contamination de la chaîne alimentaire [36].

II.5.3.1. Les métaux lourds

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse 5 g/cm^3 . Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : mercure, plomb, cadmium ... etc. [43].

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux ; les plus abondants sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces. Leur origine est multiple : ils proviennent « des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels » [36].

La toxicité d'un élément métallique dans l'environnement dépend de la forme chimique sous laquelle il existe. On peut citer comme exemple, le cas du Mn^{VII} et de l' As^{III} qui sont plus toxiques que le Mn^{II} et l' As^{V} . L'une des caractéristiques de la toxicité des métaux est leur pouvoir de former des ligands. La disponibilité et la toxicité dépendent de la concentration des ions libres de l'élément, ainsi que de la concentration totale du métal ou de celle du complexe du métal [44].

La toxicité des métaux lourds est due essentiellement à :

- Leur non-dégradabilité.
- leur toxicité à faible concentration.
- Leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des chaînes trophiques.

II.5.4. Les substances nutritives

Leur présence dans les eaux usées peut avoir un impact négatif sur la santé humaine et la qualité des eaux superficielles. Les phosphates sont présents dans les effluents secondaires à hauteur de 6 à 15 mg/l. Les nitrates, qui permettent de fournir de l'azote à la plante, sont les plus problématiques, Le potassium est présent dans les effluents secondaires à hauteur de 10 à 30 mg/l. En effet, apportés en excès, ils peuvent avoir plusieurs impacts négatifs.

Les nitrates peuvent être à l'origine de la formation de nitrites et de nitrosamines, responsables de deux phénomènes potentiellement pathologiques la méthémoglobinémie et un risque de cancer. Il est principalement responsable de l'eutrophisation en milieu aquatique [36].

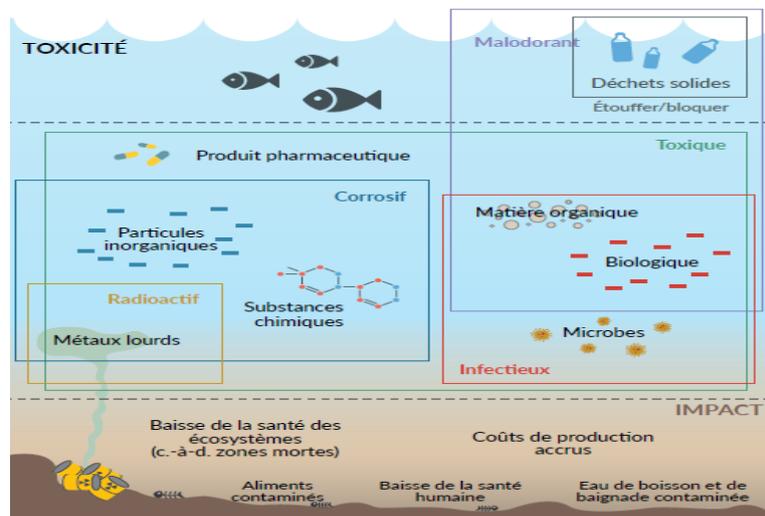


Figure II.4 : Composants des eaux usées et leurs effets [35].

II.6. Caractéristiques de la pollution des eaux usées

Les normes de rejet des eaux usées, fixent des indicateurs de qualité physico-chimique et biologique. Ce potentiel de pollution généralement exprimés en mg/l, est quantifié et apprécié par une série d'analyses. Certains de ces paramètres sont indicateurs de modifications que

cette eau sera susceptible d'apporter aux milieux naturels récepteurs. Pour les eaux usées domestiques, industrielles et les effluents naturels, on peut retenir les analyses suivantes [33] :

II.6.1. Paramètres organoleptiques

Les facteurs organoleptiques (couleur, saveur, turbidité et odeur) constituent souvent les facteurs d'alerte pour une pollution sans présenter à coup sûr un risque pour la santé.

II.6.1.1. Couleur

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité [45].

II.6.1.2. Odeur

Toute odeur est un signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition. L'odeur peut être définie comme [45] :

- L'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.
- La qualité de cette sensation particulière est provoquée par chacune de ces substances.

II.6.1.3. Goût et saveur

- Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique commune perçue lors de la boisson est dans la bouche.
- La saveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation par certaines substances solubles des bourgeons gustatifs [45].

II.6.2. Paramètres physiques

II.6.2.1. Température

La température est un paramètre physique principale sur différents matière tel que : la solubilité des gaz, et des sels.

L'augmentation de la température diminue la solubilité des gaz, ce phénomène est important dans le cas de l'oxygène, ceci implique une insuffisance de la réserve de la en oxygène mis la multiplication des micro-organismes ainsi que l'épuration biologique [42].

II.6.2.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Il indique la concentration en ions H^+ présente dans l'eau, le pH joue le rôle primordial à la fois :

- Dans les propriétés physico-chimiques (acidité, agressivité).
- Dans les processus biologiques dont certains exigent des limites très étroites de pH.
- Dans l'efficacité de certains procédés des traitements tels que la précipitation [42].

II.6.2.3. Turbidité

La turbidité de l'eau a pour origine la présence de matières en suspension (argile, limons, particules fibreuses ou organique...), étant souvent lié à des phénomènes pluviométriques dans les eaux superficielles et dans certaines eaux souterraines.

La turbidité se mesure sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre. Et sont exprimées en unités et correspondent à une mesure optique de passage de lumière. D'autres unités comparables sont employées, l'unité néphélobométrique de turbidité ou NTU. La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau [46].

II.6.2.4. Conductivité électrique (CE)

La conductivité est une mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau, la conductivité dépend également de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente.

Les résultats de mesures doivent donc être représentés en terme de conductivité équivalente à 25°C, et s'exprime en micro Siemens par centimètre ($\mu S/cm$) [47].

Tableau II.2 : Classification des eaux selon la conductivité [45].

Type d'eau	Conductivité ($\mu S/Cm$)
Eau pure	< 23
Eau douce peu minéralisée	100 à 200
Eau de minéralisation moyenne	250 à 500
Eau très minéralisée	1000 à 2500

II.6.2.5. Matière en suspension (MES)

Elles représentent, la fraction constituée par l'ensemble des particules, organiques (MVS) ou minérales (MMS), non dissoutes de la pollution. Elles constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel. Les MES s'expriment par la relation suivante :

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS} \quad (\text{II.1})$$

- Les matières volatiles en suspension (MVS) : Elles représentent la fraction organique de MES et sont obtenues par calcination de ces MES à 525°C pendant 2 heures. La différence de poids entre les MES à 105°C et les MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS en (mg/l) d'une eau.
- Les matières minérales (MM) : Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son « extrait sec » constitué à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates, etc. [48].

II.6.3. Paramètres chimiques

I.6.3.1. La D.B.O (Demande Biochimique en Oxygène)

La DBO5 comme étant la quantité d'oxygène consommée par les bactéries, à 20°C à l'obscurité et pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablementensemencé, temps qui assure l'oxydation biologique d'une fraction de matière organique carbonée.

Ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction des matières organiques grâce aux phénomènes d'oxydation par voie aérobie. Pour la mesurer, on prend comme référence la quantité d'oxygène consommée au bout de 5 jours ; c'est la DBO₅. Elle se résume à la réaction chimique suivante [33] :



II.6.3.2. La D.C.O (Demande Chimique en Oxygène)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes (organique ou minérale), de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation [45].

II.6.3.3. La C.O.T (Carbone Organique Totale)

Les matières organiques étant caractérisées par leur forte concentration des quantités de carbone, il est intéressant de définir la quantité de carbone présente dans l'échantillon [42].

II.6.3.4. Rapport de la biodégradabilité

La biodégradabilité traduit l'aptitude d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes qui interviennent dans le processus d'épuration biologique des eaux. La biodégradabilité est exprimée par un coefficient K, tel que, $K = DCO / DBO_5$ [33] :

- Si $k < 1,5$: cela signifie que les matières oxydables sont constituées en grande partie de matières fortement biodégradable.
- Si $1,5 < k < 2,5$: cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables.
- Si $2,5 < k < 3$: les matières oxydables sont peu biodégradables.
- Si $k > 3$: les matières oxydables sont non biodégradables.

Un coefficient K très élevé traduit la présence dans l'eau d'éléments inhibiteur de la croissance bactérienne, tels que, les sels métalliques, les détergents, les phénols, les hydrocarbures ... etc. [33].

II.6.3.5. L'Oxygène Dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est exprimée en mg O₂/l. [46]

II.6.3.6. L'azote (N)

L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral. L'azote organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral (ammoniaque, nitrate, nitrite), il constitue la majeure partie de l'azote total [45].

II.6.3.7. Le Phosphore

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. Les composés phosphorés qui, sans hydrolyse ou minéralisation, répondent au test spectrophotométrique sont considérés comme étant des orthophosphates. L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable et minéralisation, le phosphore organique. Chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être séparée analytiquement en

orthophosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique. Suivant les cas, la teneur en phosphates peut être exprimée en mg/L de PO₄ ou de P₂O₅ 1mg/L PO₄ = 0,747 mg/L P₂O₅ = 0,326 mg/L [45].

II.6.4. Paramètres biologiques

Les eaux usées contiennent tous les germes des matières fécales y compris des germes pathogènes, qui disparaissent plus au moins vite, les virus et les champignons encore assez mal connus [42].

II.7. Les normes de rejets des eaux usées

II.7.1. Normes internationales

La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser ou une limite inférieure à respecter. Un critère donné est rempli lorsque la norme est respectée pour un paramètre donné. Une norme est fixée par une loi, une directive, un décret de loi [49].

Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé pour les eaux usées.

Tableau II.3 : Normes de rejets internationales [49].

Paramètres	Normes utilisées (OMS)	Unité
PH	6.5 – 8.5	-
DBO ₅	<30	mg/l
DCO	<90	mg/l
MES	<20	mg/l
NH ₄ ⁺	<0,5	mg/l
NO ₂	1	mg/l
NO ₃	<1	mg/l
P ₂ O ₅	<2	mg/l
Température	<30	°C
Couleur	Incolore	-
Odeur	Inodore	-

II.7.2. Normes Algériennes

Les eaux usées se caractérisent par des paramètres physico-chimiques et bactériologiques, qui permettent de déterminer leur éventuelle origine et de connaître l'importance de leur charge polluante. Avant qu'elles ne soient rejetées dans le milieu naturel et ne le dégradent, elles doivent impérativement obéir à des normes établies pour protéger les milieux récepteurs contre la pollution. Pour cela, elles sont acheminées vers une station d'épuration où elles subissent plusieurs phases de traitement [49].

Selon les normes Algériennes les valeurs limites maximales de rejet d'effluents sont regroupées dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels [50].

Paramètres	Valeurs maximales	Unité	Paramètres	Valeurs maximales	Unité
Température	30	°C	Huiles et graisses	20	mg/l
PH	6.5 – 8.5		Cadmium	0.2	mg/l
MES	35	mg/l	Cuivre total	0.5	mg/l
Azote Kjeldahl	30	mg/l	Mercuré total	0.01	mg/l
Phosphore total	10	mg/l	Plomb total	0.5	mg/l
DCO	120	mg/l	Chrome Total	0.5	mg/l
DBO5	35	mg/l	Etain total	2	mg/l
Aluminium	3	mg/l	Manganèse	1	mg/l
Substances toxiques	0.005	mg/l	Nickel total	0.5	mg/l
Fluor et composés	15	mg/l	Zinc total	3	mg/l
Indice de phénols	0.3	mg/l	Fer	3	mg/l

Hydrocarbures totaux	10	mg/l	Composés organiques chlorés	5	mg/l
-------------------------	----	------	-----------------------------------	---	------

II.8. Conclusion

Le rejet des eaux usées chargées en substances polluantes dans l'environnement, est un motif de préoccupation croissant compte tenu des effets indésirables qu'elles peuvent engendrer sur la santé humaine, la flore et la faune.

Dans ce chapitre, nous avons présentons les différents compositions des eaux usées et leurs caractéristiques.

Chapitre III
*Procédés de
Coagulation -
Floculation*

III.1. Introduction

Le traitement des eaux (eaux usées et potabilisation) est indispensable pour la préservation des sources d'eau, la santé et le bien-être des populations et des écosystèmes. Il s'est amélioré avec l'évolution des sciences et des technologies, avec la population grandissante et le développement économique qui ont imposé des objectifs de traitement plus sévères [51].

La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont dues à la présence de particules de très faible diamètre : les colloïdes. Leur élimination ne peut se baser sur la simple décantation. En effet, leur vitesse de sédimentation est extrêmement faible [52].

Coagulation et floculation est largement appliquée dans le prétraitement de clarification des eaux (potable ou usées). Le dispositif global de la coagulation floculation consiste dans un premier temps, en l'ajout d'un sel appelé « coagulant » celui-ci déstabilise les colloïdes qui peuvent se regrouper sous forme de floc. Ensuite les floes formés décantent, permettant la séparation des agrégats. Les propriétés des particules en suspension, (colloïdes), ainsi que les conditions physicochimiques du procédé influencent son efficacité [15].

III.2. Les colloïdes

Les colloïdes sont des particules organiques ou minérales dont leurs diamètre est très faible comprise entre quelques nanomètres et un micromètre environ. Dans les effluents liquides, elles sont notamment responsables de la turbidité. Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former de gros agrégats facilement éliminés. Elles demeurent donc stables. Elles ont donc de grandes difficultés à se décanter naturellement, il est très difficile de les éliminer de l'eau. Alors il faut faire un traitement physico-chimique appelé la coagulation-floculation pour faciliter l'agrégation de ces particules.

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, le coagulant [53].

Dans le tableau III.1 sont répertoriés certains matériaux ou organismes avec leur dimension et l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour que, sous la seule influence de leur poids, ces particules parcourent un mètre d'eau à 20 °C [3].

Tableau III.1 : Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES [3].

Diamètre de particule		Type de particule	Temps de décantation pour 1 m d'eau	Surface spécifique $m^2.m^{-3}$	
mm	Mm				
10	10^4	Gravier	1 seconde	6.10^2	MES Décantations
1	10^3	Sable	10 secondes	6.10^3	
10^{-1}	10^2	Sable fin	2 minutes	6.10^4	
10^{-2}	10	Limon	2 heures	6.10^5	
10^{-2}	10	Kyste de protozoaire	20 heures	6.10^5	Colloïdes
10^{-3}	1	Argile	2 jours	6.10^6	
10^{-3}	1	Bactérie	8 jours	6.10^6	
10^{-4}	10^{-1}	Colloïde	2 ans	6.10^7	
10^{-5}	10^{-2}	Colloïde	20 ans	6.10^8	

III.3. La théorie de double couche électrique

En général les surfaces sont chargées et sont en contact avec des solutions contenant des ions (des électrolytes), avec pour conséquence une redistribution non uniforme des ions. Cette redistribution des ions au voisinage de l'interface, sera déterminée à la fois par les interactions électrostatiques et par la diffusion liée à l'agitation thermique.

Les principales causes de l'apparition de cette charge dans l'interface sont :

- Différences dans les affinités électroniques des électrons de chaque phase.
- Différences dans les affinités électroniques des ions de chaque phase.
- Ionisation de groupements fonctionnels de surface.
- Rétention ou piégeage physique d'ions [54].

III.3.1. Stabilité des particules

Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique qui est généralement négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former des agrégats plus gros et donc plus facile à éliminer [55]. Elles demeurent donc stables. Une particule typique est représentée dans la figure III.1. Diverses théories expliquent ce phénomène.

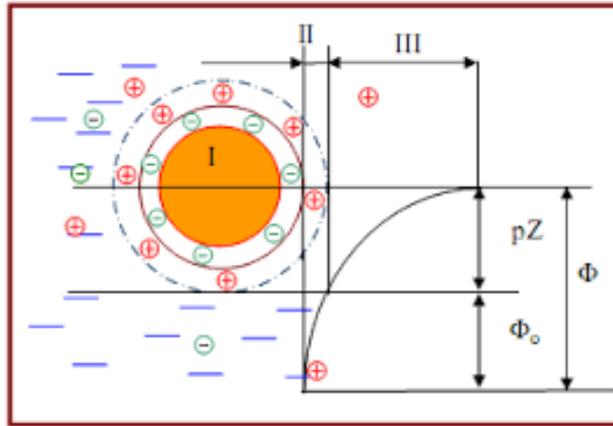


Figure III.1 : Potentiel électrique de particules colloïdales [56].

I : Particule colloïdale

II : Couche adhérente de Stern

III : Couche diffuse de Gouy-Chapman

Φ : Potentiel total à l'interface

Φ_0 : Potentiel différentiel dans la couche adsorbée

pZ : Potentiel zéta

- **théorie de Helmholtz** : est le premier à mettre en évidence la double couche électrique (DCE) en étudiant l'immersion d'électrodes chargées dans un électrolyte. Il observe que deux couches de polarités opposées se forment à l'interface solide-liquide. Il propose un modèle rudimentaire de la DCE, en l'associant à un condensateur plan où de chaque côté des charges de signe opposées se distribuent de façon homogène [57].
- **Théorie de Gouy et Chapman** : ont développé un modèle prenant en compte l'influence de la surface chargée du solide sur les ions en solution à son voisinage. Ils ont considéré que la double couche était caractérisée par une variation du potentiel électrique et des concentrations ioniques. Cette région est appelée couche diffuse [58].
- **Théorie de Stern** : Stern a en fait utilisé les notions des modèles de Helmholtz et de Gouy-Chapman pour élaborer une double couche constituée d'une couche compacte qui est proche de la surface et d'une couche diffuse qui s'étend jusqu'au sein de la solution. Cette combinaison a permis à Stern d'éliminer les principales lacunes des deux précédents modèles. Les ions de la couche diffuse ressentent l'influence électrostatique de la surface chargée tandis que la couche compacte est le siège de

l'adsorption spécifique. Ce phénomène correspond à une affinité entre une surface et une espèce ionique donnée [58].

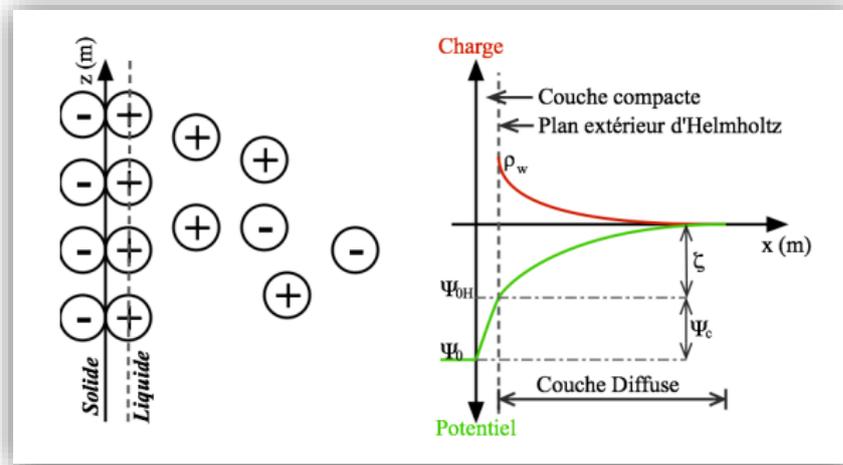


Figure III.2 : Modèle de Stern [57].

III.3.2. Potentiel Zéta

Le potentiel électrostatique diminue à mesure où l'on s'éloigne de la particule. Le potentiel Zéta (pZ) se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules ayant une pZ négative se déplacent en direction de l'électrode positive. La pZ est important car il définit le comportement électrocinétique des particules et par voie de conséquence leur stabilité dans la solution. L'annulation de la pZ est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations [55].

III.4. La coagulation-floculation

Le procédé de coagulation-floculation est un traitement primaire qui permet de débarrasser les eaux usées des impuretés qu'elles contiennent grâce à la réaction d'émulsion. La coagulation a donc pour but principal de déstabiliser les fines particules en suspension pour ainsi faciliter leur agglomération. Généralement caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques, ce procédé permet d'augmenter substantiellement l'efficacité des traitements secondaires [59].

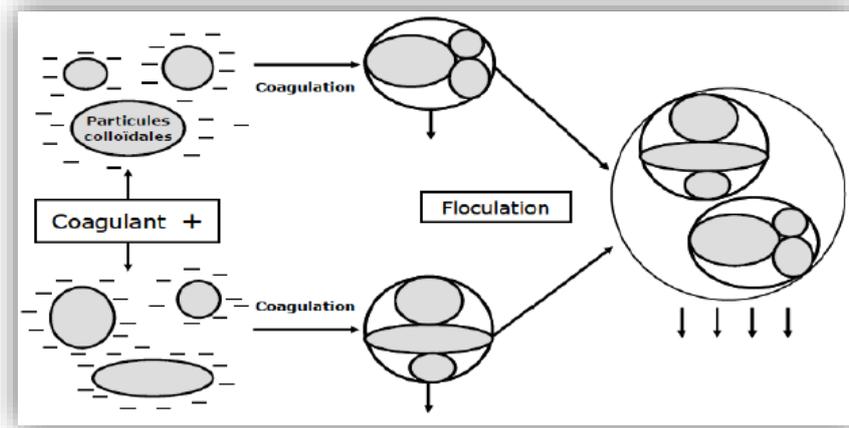


Figure III.3 : coagulation-floculation [60].

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, le « coagulant » qui apporte au milieu des éléments solubles ou colloïdaux pouvant neutraliser réduire la charge de surface de ces particules solides. Les colloïdes des eaux naturelles sont en moyenne chargés négativement. Et donc déstabilisé par ma présence de formes cationiques.

Plusieurs mécanismes peuvent être impliqués dans la coagulation selon que les ions soient indifférents (non adsorbés) ou adsorbés à la surface du colloïde [15].

La floculation est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques menant à l'agrégation de particules stabilisées pour former des flocons ou « flocs ». Ce phénomène est réversible, c'est à dire que l'on peut casser ces agrégats, par exemple en agitant fortement le liquide, pour retrouver la solution de colloïdes initiale [56].

Le tableau III.2 illustre les différents phénomènes qui se produisent lors du traitement de la coagulation-floculation.

Tableau III.2 : Phénomènes se produisant durant la coagulation – floculation [15].

Stade	Phénomènes	Terminologie	Cinétique
Ajout du coagulant/floculant	Réaction avec l'eau : Ionisation ou hydrolyse	Hydrolyse	Instantanée
Déstabilisation	Compression de la double couche. Adsorption spécifiques d'ions du coagulant à la surface du colloïde.	Coagulation	Très rapide
	Emprisonnement des particules. Adsorption et pontage par des polymères à longues chaînes.	Floculation	Rapide
Assez lente			
Transport	Agitation thermique	Floculation Péri-cinétique	Rapide
	Energie mécanique dissipée	Floculation Ortho-cinétique	Lente

III.4.1. Déstabilisation des particules colloïdales

Quatre mécanismes sont proposés pour expliquer la déstabilisation des particules et leurs agglomération :

A. La compression de la double couche :

Lorsqu'on rapproche deux particules colloïdales semblables, leurs couches diffuses interagissent et génèrent une force de répulsion. Pour vaincre cette force on ajoute un électrolyte qui va créer, au sein de l'eau une force ionique plus élevée qui va contribuer à faire diminuer l'épaisseur de la double couche [61].

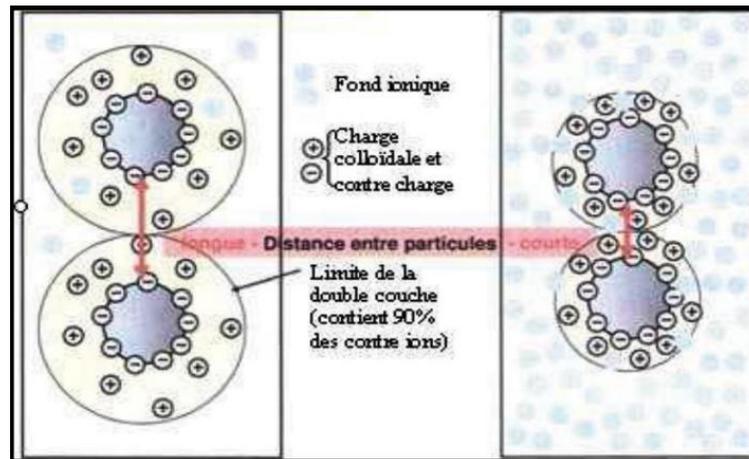


Figure III.4 : la compression du double couche [62].

B. Adsorption et neutralisation des charges :

Le coagulant ou les produits d'hydrolyse peuvent s'adsorber à des groupements fonctionnels ionisés au niveau de la couche de Stern. Dans ce cas la dose de coagulant active est très étroite et obéit à une relation stœchiométrique. En effet, un excès de coagulant conduit à une inversion des charges de surfaces des particules qui deviennent positives et se rentabilisent (Figure III.3) [63].

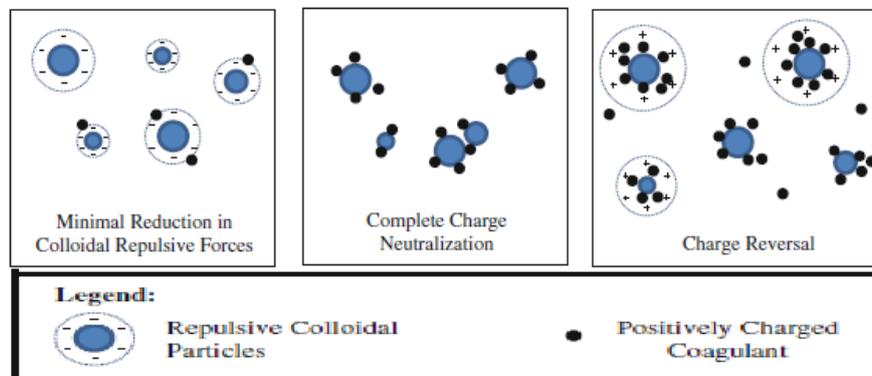


Figure III.5 : Coagulation floculation par neutralisation des charges [64].

C. Emprisonnement des particules dans un précipité

Lorsque des quantités suffisantes de coagulant comme le $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou le FeCl_3 , sont ajoutées, ils forment un précipité possédant généralement une charge positive. Le pH de l'eau doit se situer dans une plage où la solubilité des sels est minimale. Le précipité formé, appelé floc, entre en contact avec les particules de charge négative et les emprisonne. Les particules

sont ensuite entraînées lors de la décantation. [65]. La figure III.3 ci-dessous résume bien le mécanisme décrit :

D. Adsorption et pontage entre les particules

L'ajout de polymères de masse moléculaire élevée et possédant de multiples charges au niveau de la chaîne moléculaire, favorise la déstabilisation des matières colloïdales. Un même colloïde pouvant se faire adsorber plusieurs fois, on a ainsi formation des floccs par pontage des polymères comme décrit sur le schéma ci-dessous (Figure III.3).

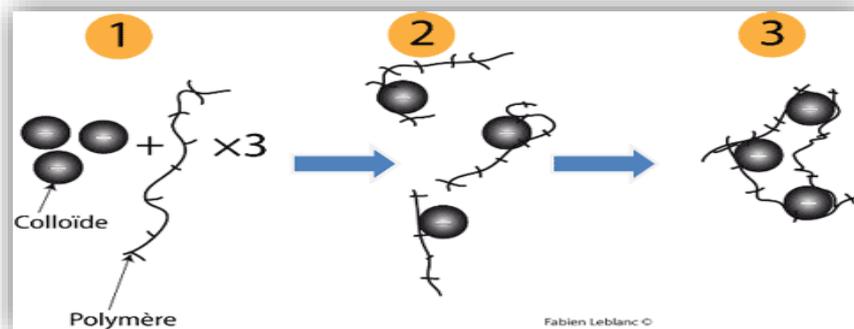


Figure III.6 : illustration du phénomène de pontage [66].

III.4.2. Les coagulants et floculants

Plusieurs agents chimiques peuvent être employés dans le procédé de coagulation floculation.

Les coagulants sont l'un des facteurs clés du processus de coagulation. L'alun est le coagulant traditionnel le plus utilisé dans le monde. Récemment, à base de sels de fer et d'aluminium conventionnels, plusieurs types de coagulants et de floculants inorganiques sous formes de polymères ont été développés et sont maintenant largement utilisés en Chine, au Japon, en Russie et en Europe de l'Ouest [67].

Tableau III.3 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer [55].

Sels d'aluminium	Formule chimique	Sels de fer	Formule chimique
Sulfate d'aluminium	$Al_2(SO_4)_3$	Chlorure ferrique	$FeCl_3$
Chlorure d'aluminium	$AlCl_3$	Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$
Aluminium de sodium	$NaAlO_2$	Sulfate ferreux	$FeSO_4$

Les produits les plus utilisés sont l'alun et le chlorure ferrique. Ces coagulants, une fois

introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation. Par exemple, lorsque l'alun est utilisé, plusieurs radicaux hydroxy-alumineux monomères ou polymères sont formés [55].

III.4.2.1 Les coagulants d'origine naturelle

Le procédé de coagulation-floculation, qui fait appel à plusieurs agents chimiques, notamment les coagulants et les floculants. Ces produits synthétiques ont des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement, cependant chercher des produits alternatifs devient une nécessité cruciale [31].

C'est pourquoi plusieurs études ont été consacrées à la recherche de procédés de fabrication de coagulants à partir de végétaux poussant sur le continent africain comme *Moringa oleifera* et *Opuntia ficus indica* [68].

Moringa oleifera est une plante tropicale appartenant à la famille des Moringaceae dont les graines contiennent des protéines floculants non-toxiques. Les boues produites par coagulation-floculation des eaux turbides sont biodégradables et occupent un volume quatre à cinq fois moins important que les boues chimiques issues de l'emploi des coagulants conventionnels [69].

Ces produits d'origine naturelle semblent être des alternatives envisageables pour remplacer l'alun, le chlorure ferrique ou les polymères à base d'aluminium en raison de leur biodégradabilité, leur coût peu élevé et de leur non toxicité pour l'homme et l'environnement [59].

III.4.3. Paramètres influençant la coagulation floculation

Pour optimiser Le procédé de coagulation-floculation, il faut tenir compte de plusieurs variables en relation, comme le pH, la dose de coagulant et la température.

II.4.3.1. Effet de pH

Le pH est un des paramètres qui affecte beaucoup plus la coagulation-floculation. Son contrôle est donc conseillé. Selon les caractéristiques d'une eau, il existe un pH optimal permettant la meilleure coagulation. Ce pH se situe souvent dans la plage où la solubilité du coagulant utilisé est minimale, ce qui donne une meilleure précipitation. Le contrôle du pH permet aussi d'améliorer la coagulation lorsque la température de l'eau est faible [3].

Tableau III.4 : Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium [70].

Forme prédominante	pH
Al (OH) ₃	5,8 à 7,2
Fe (OH) ₃	5,5 à 8,3

III.4.3.2. L'influence de la température

La température joue un rôle important. En effet, une température basse, entraînant une augmentation de la viscosité de l'eau, crée une série de difficultés dans le déroulement du processus : la coagulation et la décantation du floc sont ralenties et la plage du pH optimal diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons [70].

III.4.3.3. L'influence de la dose de coagulant

La dose de réactif est un paramètre à prendre en compte. Le coagulant qui est habituellement fortement acide a tendance à abaisser le pH de l'eau. Pour se placer au pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base.

Une dose de coagulant excessive entraîne une restalinisation des particules et augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante. Pratiquement, la dose optimale de coagulant peut être déterminée soit par l'emploi de la mesure du potentiel zêta, soit par un test au laboratoire, connu sous le nom de "Jar-Test" [60].

III.4.3.4. Influence du coagulant

Le choix du coagulant influence les caractéristiques de la coagulation, autrement dit, les finalités de traitement, même si l'alun est le coagulant le plus utilisé. Il peut être avantageux de le remplacer par un autre coagulant ou de mettre de l'adjuvant selon les caractéristiques de l'eau à traiter [71].

III.4.3.5. L'influence de la turbidité

La turbidité est, elle aussi, un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation. Dans une certaine plage de turbidité, l'augmentation de la concentration en particules doit être suivie d'une augmentation de la dose de coagulant.

Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles [60].

III.4.3.6. Vitesses et temps d'agitation

Lors de l'introduction du coagulant dans l'eau, on procède à une agitation rapide pour la dispersion et l'homogénéisation de la solution. Mais une agitation intense empêche l'agrégation des particules, tandis qu'une agitation prolongée, permet l'effraction des liaisons entre coagulant et la surface des particules, et le rabattement ultérieur des segments étendus sur la surface des particules [3].

III.5. Les avantages et les inconvénients de la coagulation –floculation

III.5.1. Avantages

- Certains de ces agents chimiques sont peu dispendieux, notamment le CaO.
- L'utilisation de ce procédé chimique est très répandue, il y a donc beaucoup d'équipement déjà existant et une multitude d'agents chimiques disponibles.
- La présence de composés toxiques dans l'effluent à traité n'est pas gênante et le système est stable lorsque soumis à des températures variables.
- Les systèmes de coagulation-floculation chimique sont généralement automatisés et demandent donc peu de surveillance et d'entretien.
- Une réduction significative est obtenue en termes de micropolluants, de métaux lourds, de bactéries et de virus.
- Les systèmes chimiques de coagulation-floculation peuvent être conçus afin d'obtenir un produit à valeur ajoutée [59].

III.5.2. Inconvénients

- Les coagulants utilisés sont souvent corrosifs, des normes de sécurité doivent être respectées afin que les travailleurs manipulent ces substances avec précaution.
- Puisqu'il y a plusieurs réactions en compétition dans ce type de système chimique et plusieurs degrés d'alcalinité en plus des autres facteurs influençant le procédé, il est particulièrement difficile d'établir les bons dosages. Beaucoup d'essais à l'échelle laboratoire sont donc nécessaires pour trouver un traitement optimal. Une surdose de coagulant chimique peut diminuer l'efficacité du système.
- De grandes quantités de substances chimiques doivent être acheminées à l'usine de traitement.

- L'utilisation de l'alun, à cause de son interaction avec les substances alcalines provoque une réduction importante du pH.
- Pour les pays en voie de développement, les coagulants chimiques peuvent être trop coûteux [59].

III.6. Conclusion

Les particules stables non décantables qui sont responsables de la couleur et la turbidité de l'eau, dites particules colloïdales. Pour arriver à la transparence des eaux pendant une courte durée, on a recours aux procédés de coagulation floculation.

Dans ce chapitre nous avons détaillé, plus particulièrement, ces procédés sur lesquels porte spécifiquement notre étude.

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1. Introduction

Diverses techniques physico-chimiques et biologiques ont été utilisées pour le traitement des eaux usées. Parmi celles-ci, elles sont classiquement traitées par coagulation-floculation.

Plusieurs travaux de recherches ont étudié le pouvoir floculant d'OFI en traitement des eaux par coagulation floculation, sur des effluents industriels et ont souligné l'importance de l'utilisation du cactus, comme floculant, coagulant et même coagulant / floculant d'aide à l'élimination, de la turbidité, de la DCO, des MES et des métaux lourds.

Dans ce chapitre, nous avons discuté les résultats obtenus en étudiant certaines recherches qui ont appliqué le processus de coagulation floculation en utilisant un bio-floculant (cactus). Nous les avons comparés pour certains éléments physiques, chimiques et des critères les plus courants utilisés dans le traitement des eaux usées à savoir : turbidité, pH, DCO, couleur, dose de coagulant.

IV.2 Matériels & méthodes

IV.2.1. Préparation de cactus

Plusieurs études se sont concentrées sur la préparation et l'amélioration de l'ajout d'un bio-polymère à base de cactus, ce qui peut considérablement affecter l'efficacité et le coût du procédé.

IV.2.1.1 Poudre de cactus

La méthode d'extraction de la poudre de cactus (PC) utilisée est la suivante : [30, 32, 72]

- Les cladodes de cactus ont été décollés de la partie extérieure et leurs épines enlevées.
- Le cactus de la partie interne a été tranché et séché au four à différentes températures pour différents temps de laboratoire.
- Le cactus séché a été broyé sous forme de poudre, tamisé sur des tamis de tailles différentes des mailles, et utilisé plus tard à des fins de coagulation.



Figure IV.1 : Poudre du cactus [72].

Le tableau suivant montre que les différents auteurs ont travaillé à des températures et des temps de séchage différents, pour les cladodes de cactus.

Tableau IV.1 : Les conditions utilisées pour préparer la poudre cactus

TSC (°C)	Temps (heures)	La taille de tamis (mm)	Référence
60	24	0.6	[30]
80	24	0.5 – 1	[72]
100	2	0.2	[32]

TSC : Température de séchage des cladodes de cactus.

IV.2.1.2 Jus du cactus ficus-indica

La préparation de jus de Cactus ficus-indica (bio-floculant) c'est effectué comme suit : [73 - 74].

- Les feuilles de cactus utilisées ont été broyées après lavage, nettoyage et enlèvement des épines.
- L'extrait aqueux de la plante est recueilli par tamisage sur un filtre.
- Ce dernier a été dilué dans l'eau distillée (à 10%)
- Une homogénéisation de la solution a été faite par agitation.

Ce produit est un liquide visqueux de coloration verte.

Le jus de cactus (JC) obtenu est relativement stable. Il peut conserver sa capacité de flocculant en le conservant à 4 °C pendant 15 jours [73 - 75].



Figure IV.2 : Jus de cactus [73].

IV.2.2. Procédure Jar-Test

Tous les chercheurs dont nous comparerons les études ont utilisé le test du « Jar-test » [30, 32, 73 - 75].

Un essai laboratoire appelé « Jar-test » permet, par un dosage et une vitesse d'agitation différente sur plusieurs béchers, de déterminer quels sont les couples quantités de réactifs / vitesse et temps d'agitation qui permettent d'obtenir l'eau la plus limpide, les "flocs" les plus gros et les mieux décantés [55].



Figure IV.3 : Flocculateurs type Jar-test [76].

IV.2.2.1 Paramètres de la coagulation floculation

La première étape de la coagulation floculation, ajout de coagulant et/ou flocculant sous une agitation rapide de (100 trs/min, 200 rpm, 150 trs/min) pendant 1 à 2 min, puis une agitation lent de (30 rpm, 80 rpm, 75 trs/min et 40 trs/min) pendant 10 ou 15 min préalablement déterminées [30, 32, 73, 74].

IV.2.2.2. Détermination de l'efficacité du procédé

L'abattement de la turbidité et des MES est calculé selon l'équation suivante : [15]

$$\text{L'abattement} = \frac{\text{Turbidité ou MES initiale} - \text{Turbidité ou MES finale}}{\text{Turbidité ou MES initiale}} * 100 \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.3 Méthodes d'analyse

IV.2.3.1 La spectroscopie infrarouge

L'analyse du jus de cactus est réalisée par la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (I.R.T.F) pour déterminé leur structure.

L'I.R.T.F est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par l'échantillon à analyser. Cet échantillon peut être à l'état gazeux, solide ou liquide. Elle permet via l'absorption des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques (fonctions alcool, acides,

méthyles, méthylène...), de déterminer la présence de certaines fonctions chimiques présentes dans la matière.

Le principe de l'I.R.T.F repose sur l'absorption du rayonnement infrarouge lorsque la longueur d'onde (l'énergie) du faisceau est égale à l'énergie de vibration de la molécule. Le domaine infrarouge entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} correspond au domaine d'énergie de vibration de la plupart des molécules (infrarouge moyen).

Il existe deux principaux types de vibrations : les élongations (stretching) le long de l'axe de la liaison, et les déformations (bending) occasionnant une modification de l'angle entre deux liaisons adjacentes, dans le plan ou hors du plan. Ces élongations et déformations peuvent être symétriques ou asymétriques [77].

IV.2.3.2 La spectrométrie absorption atomique

Pour mesurer les concentrations des métaux lourds on utilise la technique de la spectrométrie absorption atomique (SAA).

Le dosage d'élément par SAA repose sur le principe qu'un atome soumis à un rayonnement d'énergie E , peut passer d'un état fondamental à un état excité, caractérisé par des électrons à un niveau d'énergie plus élevé et instable : c'est le phénomène d'absorption. Le retour de l'atome à son état fondamental s'accompagne de l'émission d'un rayonnement photonique spécifique caractérisé par sa longueur d'onde λ . En pratique, l'absorbance A peut être appréhendée par la variation de l'intensité lumineuse à travers la chambre d'atomisation de l'élément à doser [78].

La loi de Beer-Lambert établit une relation directe entre l'absorbance A d'un échantillon et sa concentration de l'élément recherché.

$$A = k.l.C \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

K : coefficient d'absorption spécifique de l'élément à doser.

L : trajet optique (cm).

C : concentration (mole.L^{-1}).

IV.3. Résultats et discussions

IV.3.1. Analyse du bio-floculant

Les figures IV.4 et IV.5, ci-dessous représentent les spectres infrarouges du jus de cactus et le spectre de la poudre extraite, à partir des cladodes de cactus.

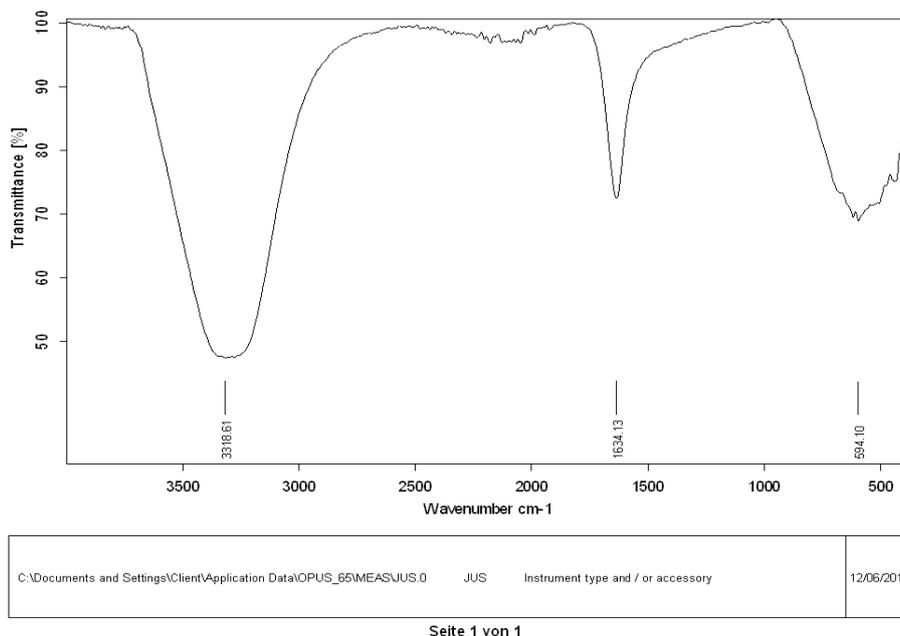


Figure IV.4. Spectre I.R du jus de cactus [73].

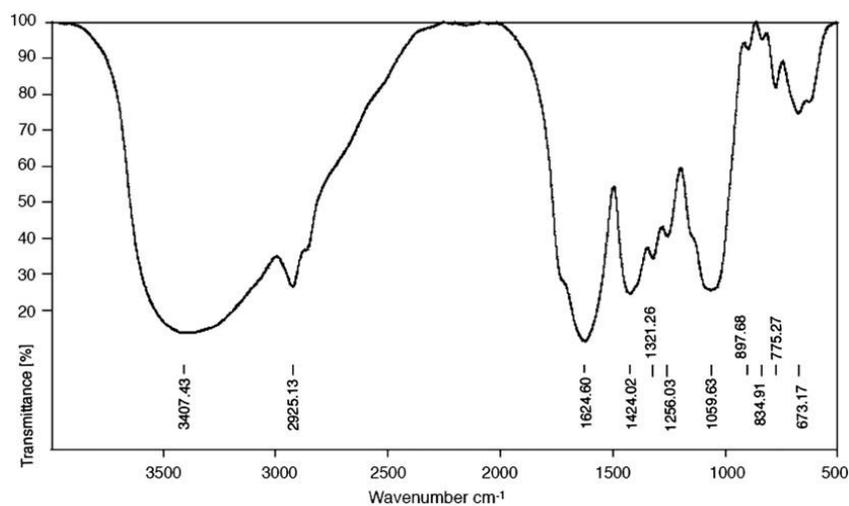


Figure IV.5 : Spectre IR de la poudre d'OFI [32].

➤ Interprétation des spectres IR

Les valeurs données sont indicatives. Elles peuvent en effet varier dans la littérature, car elles sont très liées au protocole de mesure du spectre.

D'après les résultats obtenus de ces études liées à l'analyse spectrale IR du cactus, nous notons ce qui suit :

- Le fort étirement à 3318.16 cm^{-1} (Figure IV.4) et $3405,43 \text{ cm}^{-1}$ (Figure IV.5), était dû à l'élongation d'hydroxyle (OH) qui indique la présence d'un alcool associé aux polysaccharides.
- 3318.16 cm^{-1} (figure IV.4) et 3405.43 cm^{-1} (figure IV.5), ces bandes sont caractérisées par l'élongation des amines secondaires (N-H).
- Les pics à 1424.02 cm^{-1} (figure IV.5) et à 1634.13 cm^{-1} (figure IV.4), ont attribuée à une élongation de la fonction ($-\text{C}=\text{O}$), ce confirme la présence de sel d'acide carboxylique ou déformation amides primaire ($-\text{NH}_2$).
- Plusieurs pics se sont formés de 897 à 673 cm^{-1} sont montrés sur la (figure IV.5) et la bande de $594,10 \text{ cm}^{-1}$ qui obtenue à (figure IV.4). Ce qui confirme en outre la présence d'un groupe aromatique ou aux vibrations de valence des liaisons d'halogénures (C-X).

Les polysaccharides comprenaient l'hydroxyle ($-\text{OH}$) et l'amino ou l'amine ($-\text{NH}_2$) groupes, ainsi que des liaisons hydrogène. Ces groupes fonctionnels sont considérés comme des groupes préférés pour le processus de floculation [74].

La présence de polysaccharide comme composé principal du cactus, peut jouer un rôle important dans la stabilité thermique du bio-floculant à base de cactus.

Nous notons que les composants du bio-floculant sont les mêmes, qu'il s'agisse de jus ou de poudre, car il s'agit du même composé végétal, donc leurs composants ne changent pas quel que soit leur état.

IV.3.2. Application de cactus pour le traitement d'effluents industriels.

Dans le cadre de l'utilisation de flocculants / coagulants synthétiques pour eaux usées, différentes études ont souligné l'importance de l'utilisation du cactus comme flocculant, coagulant ou coagulant / flocculant d'aide à l'élimination de la turbidité, de la DCO et des métaux lourds.

IV.3.2.1. Poudre de cactus

ARTICLE 1 :

« Treatment of Tannery Wastewater Using Natural Coagulants. »

Kazi T, et Virupaksh A, (2013) ont utilisé la poudre de l'OFI dans le traitement des eaux usées de tanneries, caractérisé par une DCO élevée.

L'eau usée des rejets de tanneries ont été soumis à un traitement de coagulation/floculation, par préparation de poudre de cactus (morceaux séchés à 60 °C, pendant 24 heures, broyés et tamisés afin obtenir des particules de 600 µm de diamètre).

Les résultats obtenus, montre qu'une dose optimale de (0,4 g / L) de poudre de cactus, à pH 5,5, permet des abattements de 78,54% et 80.65 % de la turbidité et des de la DCO, respectivement.

Le tableau ci-dessous résume les résultats de cette étude :

Tableau IV.2 : Résultats de traitement de l'article 1

TSC ₁ = 60 °C	
Conditions optimales	0.40 g/l de PC à pH 5,5
Turbidité initiale (NTU)	66 – 960
% d'élimination	78.54
DCO initiale (mg/l)	28000
% d'élimination	80.65

ARTICLE 2 :

« Comparative study between Moroccan cactus and chemicals coagulants for textile effluent treatment. »

L'effluent étudié par Bouaouine O, et al, (2016), provient de l'industrie textile d'une compagnie de lavage et délavage des jeans (Multiwash) à Fès au Maroc.

Cet effluent est caractérisé par une forte valeur de la demande chimique en oxygène DCO égale à 1,26 g. L⁻¹, une turbidité initiale plutôt faible de 214 NTU, et la présence de divers métaux, avec des concentrations élevées en fer et zinc (>0,3 mg. L⁻¹).

Cette étude présente une comparaison de l'efficacité du traitement d'un effluent de l'industrie textile par des réactifs chimiques les plus utilisés en coagulation floculation, tels que la chaux, le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique et une préparation simple d'*Opuntia ficus indica* (Le cactus a été séché à 80 ° C pendant 24 heures, broyé et tamisé pour obtenir une poudre d'un diamètre de 0,5 à 1,00 mm).

L'utilisation du cactus (les conditions optimale de 0.33 g/l à pH 10) a montré un effet très significatif sur l'élimination de la turbidité (96%) par rapport aux coagulants chimiques. L'analyse des métaux lourds a montré qu'en utilisant la poudre de cactus, le pourcentage de réduction des métaux dépassait 90%, notamment en ce qui concerne le cuivre, le chrome et le zinc

Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Résulta de traitement de l'article 2

TSC ₂ = 80 °C	
Conditions optimales	0,33 g/l de PC à pH 10
Turbidité initiale (NTU)	214
% d'élimination	96
Concentration des métaux lourds de l'effluent brut (mg/l)	[Fe] = 2.61 [Zn] = 0.36 [Cu] = 0.09 [Cr] = 0.094
% d'élimination	Fe : 87.73 Zn : 91.66 Cu : 90 Cr : 91.14

ARTICLE 3 :

« Cactus opuntia (ficus - indica) : an eco-friendly alternative coagulant in the treatment of paint effluent. »

Vishali S, et Karthikeyan R, (2014) ont étudié la potentialité de l'OFI, comme coagulant pour le traitement des eaux usées industrielles de peinture à base d'eau simulées, en termes de couleur, DCO et la turbidité.

L'OFI séché à 100 ° C pendant 2 h, est broyé en poudre et tamisé à travers un tamis de 0,2 mm. Le coagulant a été extrait en utilisant du NaCl à 3N, aux conditions optimale de 3 g / L à pH (7,2–7,8), Ceci a permis des rendements d'élimination de 82,11%, 79,05%, 78,43% pour la couleur, la DCO et la turbidité, respectivement.

Les résultats obtenus ont été comparé au chlorure ferrique coagulant conventionnel. Les résultats ont reconnu que OFI, un coagulant naturel et respectueux de l'environnement, pourrait être une alternative au coagulant conventionnel dans le traitement des eaux usées de peinture à base d'eau.

Tableau IV.4 : Résultats de traitement de l'article 3

TSC₃ = 100 °C	
Conditions optimales	3 g/l de PC à pH 7.2 – 7.8
Turbidité initiale (NTU)	7760
% d'élimination	82.6
DCO initiale (mg/l)	7693
% d'élimination	78.2

➤ **Interprétation des résultats**

L'efficacité de traitement de différents effluents par la poudre cactus sont présentées dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Bilan de traitement des différents effluents par la poudre d'OFI

Article étudiés	TSC en °C	La taille de PC en mm	pH optimal	Abattement de la turbidité en %	Abattement de la DCO %	Abattement des métaux lourds %
Article 1 (Les eaux usées de tanneries)	60	0.6	5.5	78.5	80.65	-
Article 2 (Les eaux usées de textile)	80	0.5 – 1	10	96	-	Fe : 87.73 % Zn : 91.66 % Cu : 90 % Cr : 91.14%
Article 3 (Les eaux usées industrielles de peinture)	100	0.2	7.2 – 7.8	82.6	78.2	-

A- Les conditions optimales

L'effluent de textile a la valeur du pH optimal égale 10. Celui des résidus de peinture simulé liquide est compris entre 7,2 et 7,8 et pour les effluents de tannerie il est égal à 5,5. Par contre, les doses optimales de poudre de cactus varient entre 0.33 g L^{-1} et 3 g L^{-1} .

Cette variation dépend essentiellement de la charge polluante ainsi que de la turbidité initiale de l'effluent à traiter, ainsi que des espèces de cactus utilisées pour la coagulation (origine du pays) et leur méthode de préparation.

B- L'influence de poudre de cactus sur la turbidité

D'après les résultats obtenus dans le tableau IV.5, ci-dessus, les taux d'abattement sont généralement très différents d'un effluent à l'autre.

- L'élimination de la turbidité dans les eaux usées, obtenue à différentes tailles de particules de bio-floculant et à différentes températures de séchage, était de 78.54 %

(TSC à 60 °C et la taille de PC est 0.6 mm), 82.6% (TSC à 100 °C et la taille de PC 0.2 mm) et 96% (TSC à 80 °C et la taille de PC 0.5 - 1 mm).

- On observe que la plus grande valeur de la réduction de la turbidité est de 96%. Elle est obtenue à la température de 80 °C, avec la taille des particules de PC comprise entre 0.5 et 1 mm
- On peut déduire que le taux d'élimination de la turbidité dépend de la température de séchage du cactus et de la taille de PC.
- La meilleure température de séchage du cactus obtenue, est de 80 °C, elle a permis d'obtenir les meilleurs résultats de réduction de la turbidité, qui est de l'ordre de 96%.
- Le temps de séchage du cactus joue également un rôle important. Le temps de séchage de cactus dans les articles 1 et 2, est 24 heures et pour l'article 3 est 2 heures. On remarque que lorsque on séché le cactus pendant une période plus longue (24 heures), pour se débarrasser de toute la trace humide, le rendement de réduction est supérieure.

D'après les travaux de la littérature, cette diminution est due à la dégradation des matières organiques contenue dans l'eau brute. [30, 32, 72]

C- L'influence de la poudre de cactus sur la DCO

L'effluent de l'industrie du tannage (Article 1) et de la peinture industrielle simulée effluent (Article 3), sont caractérisés par une DCO initiale élevée, par rapport à la norme internationale des rejets liquides. Ceci peut être expliqué par la quantité importante de matières oxydables présente dans ces effluents.

- Pour les eaux de peinture industrielle simulées, l'effluent dont le pH varie entre 7.2 et 7.8, le bio-flocculant réduit la DCO de 82.65 %.
- Cette valeur était supérieure à celles obtenues en utilisant la poudre de cactus (séché à 60° C, et la taille des particules est de 0.6 mm) à pH 5.5. L'abattement de la DCO était de 78.54%.
- Les résultats que nous notons, est que pour la température de séchage de cactus, les résultats sont relativement proches, de l'ordre des 80%. Par contre, nous notons que plus la taille des particules du PC est petite, la réduction de la DCO est supérieure.

La réduction de la demande chimique en oxygène peut être expliquée par la diminution de la matière organique complète par oxydation.

D- L'influence de poudre de cactus sur les métaux lourds

Plusieurs éléments métalliques étaient présents dans l'effluent de textile (Article 2). Le Fe étant le plus répandu, suivi du Zn, Cu et Cr.

Simultanément à l'élimination des polluants organiques par le processus de coagulation / floculation avec la poudre de cactus, l'élimination des métaux lourds a été évaluée (tableau IV.5).

- L'efficacité de la poudre de cactus (séché à 80 °C et tamisé à 0.5 -1 mm) dans la coagulation-floculation des ions de métaux lourds des eaux usées provenant de l'industrie de textile, est prouvée en utilisant une dose optimale de coagulant de 0.33 g / L et pH 10 a permis des pourcentages d'élimination de 91.66% (Zn), 91.14% (Cr), 90% (Cu) et 87,73% (Fe).
- L'augmentation du pourcentage d'élimination des métaux lourds, avec la diminution de la taille des particules OFI était due à la plus grande surface exposée aux ions des métaux lourds par le flocculant qui a abouti au piégeage efficace des ions métalliques, par le flocculant [79].

IV.3.2.2. Jus de cactus

ARTICLE 1 :

« Extraction de jus de cactus et étude de son effet sur les propriétés physico-chimique d'une eau industrielle ».

Karahacane H, Bahri K, (2019) ont exploré l'efficacité du jus extrait de l'*Opuntia ficus-indica* (jus de cactus broyé avec un moulin électrique domestique et filtré à l'aide d'une passoire) comme flocculant naturel complétant le sulfate d'aluminium (SA) dans la clarification de l'eau obtenue de l'industrie de peinture.

Les chercheurs ont utilisé la méthode de jar-test, en tenant compte de facteurs tels que la proportion et la concentration des flocculants, le pH pour évaluer la turbidité (NTU), DCO, les MES et les métaux lourds.

L'étude a établi qu'une dose optimale de 25 ml de flocculant de jus de cactus (JC) rajouté à 5 ml de coagulant(SA), réduisait les valeurs de turbidité à moins de 5 NTU, correspondant à un rendement d'élimination de plus de 98%.

De plus, la combinaison JC / sulfate d'aluminium a réduit la DCO de 94.5 % et la teneur en MES à des valeurs inférieures à 1150 mg / L. Quant aux différents métaux lourds présents à savoir le zinc, le plomb, le cuivre et le fer, leur pourcentage d'élimination est respectivement 95 %, 67 %, 71,4 et 75,5 %.

En vue de ces résultats, le jus de cactus s'avère être un agent flocculant efficace, écologique et peut être envisagé comme une solution alternative aux problèmes, liés à la performance environnementale des flocculants synthétiques chimiques. Le tableau ci-dessous résume les résultats de cette étude.

Tableau IV.6 : Traitement des eaux usées avec la combinaison de JC / SA.

coagulant/bio-flocculant : SA / JC	
pH	7.64
Turbidité initiale (NTU)	236
% d'élimination de la turbidité	98.2
DCO initiale (mg/l)	129
% d'élimination de DCO	94.5
MES initial en (mg/l)	4000
% d'élimination de MES	71.5
Concentration des métaux lourds de l'effluent brut (mg/l)	[Fe] = 2.052 [Zn] = 0.101 [Cu] = 0.021 [Pb] = 0.132
% d'élimination de métaux lourds	Fe : 75.5 % Zn : 95 % Cu : 71.4 % Pb : 67%

ARTICLE 2 :

« Cactus juice as bio-flocculant in the coagulation– flocculation process for industrial wastewater treatment : a comparative study with polyacrylamide ».

Sellami M, et coll. (2014) ont comparé l'utilisation du jus de cactus comme bio-flocculant au polyacrylamide conventionnel dans le traitement des eaux usées de l'industrie alimentaire.

Les chercheurs ont mené des expériences dans lesquelles ils ont remplacé le polyacrylamide par du jus de cactus (Jus de cactus brut moulu avec un moulin et filtré), notant la nécessité de réduire l'utilisation de produits chimiques dans la coagulation.

À partir des données recueillies, les chercheurs ont découvert que le remplacement du polyacrylamide par du jus de cactus dans le processus de coagulation-floculation était très efficace. Le bio-flocculant avait une efficacité d'élimination de 69,1% pour la DCO et de 88,7% pour les MES (Tableau IV.7).

Tableau IV.7 : L'utilisation le bio-flocculant (JC) seul.

bio-flocculant : JC				
pH	DCO initial en mg/l	% d'élimination de DCO	MES initial en mg/l	% d'élimination de MES
3.92	2376	69.1	230	88.7

De plus, ils ont remarqué que lors de l'ajout de chaux au procédé, l'efficacité d'élimination avec le jus de cactus pour les MES et la demande chimique en oxygène s'est améliorée à plus de 90% (Tableau IV.8).

Tableau IV.8 : Traitement des eaux usées avec la combinaison de chaux / JC

coagulant/bio-floculant : Chaux / JC				
pH	DCO initial en mg/l	% d'élimination de DCO	MES initial en mg/l	% d'élimination de MES
3.92	2376	96	230	92.2

Sur la base de ces résultats, ils ont conclu que l'utilisation du jus de cactus comme floculant répondait aux exigences de durabilité et est tout à fait appropriée pour les régions dans lesquelles les cactus poussent naturellement.

ARTICLE 3 :

« Utilisation d'un nouveau bio-floculant extrait de cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation floculation. »

Abid A, et al (2009), ont utilisé un nouveau floculant d'origine végétale extrait de cactus (jus de cactus broyé après nettoyage et extrait par filtration par tamisage) dans un procédé physico-chimique (coagulation floculation) afin de traiter des rejets liquides chargés en chrome (VI).

Ce bio-floculant nous a permis de réduire la turbidité d'un effluent industriel, en passant de 100 NTU à des valeurs au-dessous de 2 NTU. L'étude a été réalisée sur des échantillons industriels issus d'une unité de traitement de surface (chromage).

L'étude comparative entre le floculant organique et le floculant industriel (floculant à base d'acrylamide et acrylate de sodium), a montré que bio-floculant aboutit à des résultats satisfaisants au niveau du pouvoir de floculation.

Il a montré un effet très significatif sur l'abattement de la turbidité et un pourcentage de réduction de chrome (VI) de plus de 98 % (Tableau IV.9).

Les résultats obtenus sont très encourageants.

Tableau IV.9 : Traitement des eaux usées avec JC seul.

Bio-floculant : JC			
Turbidité initiale en NTU	% d'élimination de la turbidité	[Cr(VI)] en ppm avant Traitement	% d'élimination de Cr
100	98	22	98.63

➤ Interprétation des résultats

Les adjuvants coagulants peuvent améliorer le processus de coagulation-floculation, en tenant compte du fait que leur utilisation ne devrait pas augmenter considérablement les coûts de traitement de l'eau. La figure IV.6 ci-dessous montre les résultats obtenus à partir des trois articles ci-dessus :

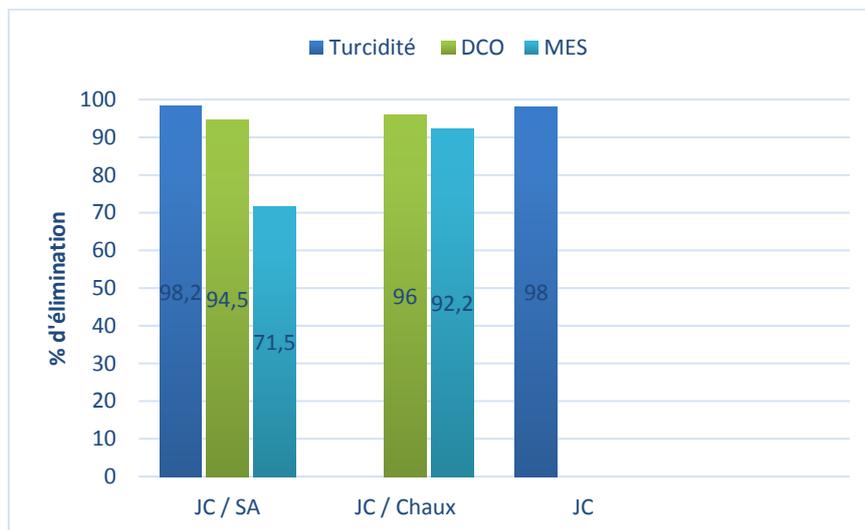


Figure IV.6 : Les taux d'élimination en fonction des combinaisons utilisés

A- L'effet du jus de cactus sur la turbidité

D'après les résultats obtenus dans les tableaux IV.6 et IV.8 et le figure. Ci-dessus, les pourcentages de réduction de la turbidité sont différents.

- Les résultats de la figure IV.6 ci-dessus montrent que dans le cas de les eaux usées de peinture et chromage, l'élimination de turbidité avoisine 98 % pour les deux combinaisons de traitement (SA/ JC et chaux / JC).
- Les résultats obtenus montrent que la meilleure réduction de la turbidité, à savoir 98,2%, est obtenue en utilisant du bio-floculant jus du cactus avec le sulfate d'aluminium aux dose de 25mL et 5 ml respectivement.
- Ce taux élevé est probablement dû à l'action du coagulant suivi de celle du floculant ; le coagulant (SA) a formé de petits floes en diminuant la charge négative des particules et la force répulsive entre elles. Cela a permis une meilleure floculation ; agglomération des micro-floculants en macro-floculants, suite à l'ajout du floculant (jus de cactus). Ceci peut être expliqué par les composés aromatiques, et les polysaccharides, contenus dans le jus de cactus.

En fait, on note que les deux combinaisons (SA/ JC et chaux / JC) ont le même effet sur l'élimination de la turbidité.

Par conséquent, nous pouvons dire que l'ajout des coagulants améliore le rendement d'élimination.

B- L'effet du jus de cactus sur les MES

Les matières en suspension (MES) sont en majeure partie, de nature biodégradable.

- Nous constatons que le taux d'élimination de les MES diffère selon le type de rejet et le coagulant utilisé. L'analyse de variance a révélé une différence très hautement significative entre les deux traitements.
- D'après les résultats figurants dans les tableaux IV.6 et IV.8, Le taux d'élimination de MES le plus faible est enregistré par l'association JC et le SA (71.5%) et il est moins important que par le traitement par le JC et la chaux (92,2%).
- En cas d'utilisation du SA comme coagulant, nous aurons un risque évident de contamination des boues par des composés contenant le sulfate et aluminium qui

pourraient causer des conséquences graves sur l'environnement. Par contre, dans le cas de l'utilisation de la chaux et le JC ; nous générons une boue constituée simplement de matière organique biodégradable. l'utilisation de la chaux avec le flocculant naturel ont montré un grand pouvoir d'élimination de ces MES [31].

Et donc, on peut dire que la combinaison JC/chaux est une très bonne alternative dans le traitement des eaux chargées en MES et le procédé de coagulation –floculation est efficace pour l'élimination de MES.

Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par A.Abid et al. (2009), ont montré que la combinaison formée de la chaux et de jus de cactus apparaît plus intéressante que le mélange formée du chlorure de fer et jus du cactus.

C- L'influence du jus de cactus sur la DCO

La DCO est la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation par voie chimique des matières organiques et minérales.

- Dans le cas du mélange le jus de cactus et la chaux, les abattements de la DCO ont atteint 96% (tableau IV.8). Cependant, pour le JC avec SA, l'efficacité d'élimination était légèrement inférieure, à 94%, pour la DCO (tableau IV.6).
- L'utilisation combinée de JC / Chaux augmente l'efficacité des procédés d'élimination des DCO similaires à ceux obtenus en présence de SA et de JC.

Ici aussi, La combinaison chaux/JC avérée très efficace et constitue une bonne alternative à l'élimination de la DCO.

D- L'influence du jus de cactus sur les métaux lourds

Le pourcentage d'élimination des métaux lourds des différents échantillons est représenté dans la figure IV.7 :

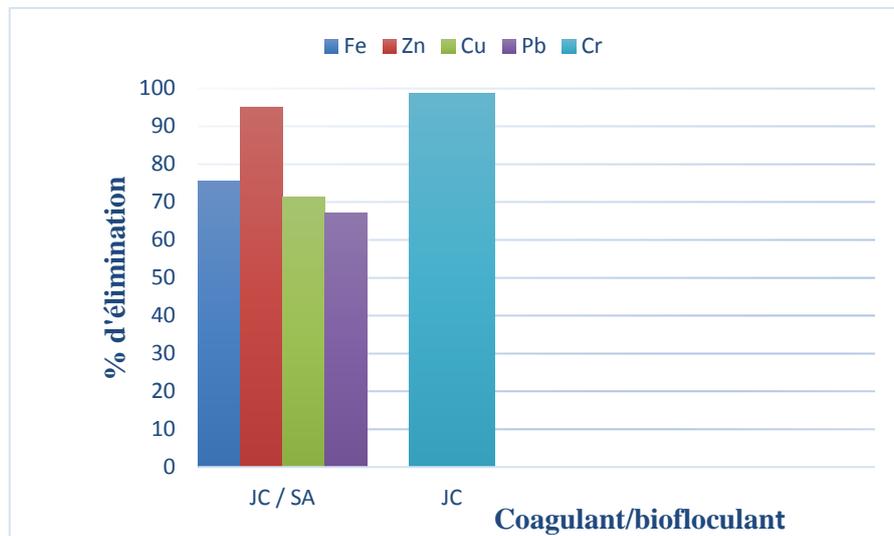


Figure IV.7 : Les taux d'élimination des métaux lourds

L'examen des résultats expérimentaux relatif à l'utilisation de combinaison coagulant/floculant et le bio-floculant seul, nous permet d'établir les remarques suivantes :

- Les résultats du figure IV.7, montrent que dans le cas de la solution de peinture industriel, l'élimination des métaux lourds le fer, zinc, cuivre et le plomb ont été à des taux de 75.5%, 95%, 71.4% et 67% respectivement, pour la combinaisons de traitement (SA / JC).
- Pour l'échantillon chargé en Chrome, le pouvoir du JC seul pour d'élimination de ce métal est bon avec de taux de 98.63 %.
- Ces résultats sont également cohérents avec ceux que N.Taa et al (2016), qui montrent dans leur recherches, que l'efficacité d'élimination du chrome rapportée dans ce travail varie de 99.3 à 99,9% lorsque ils utilisé le jus de cactus comme floculant biologique.
- Par ailleurs, des valeurs de réduction, légèrement basses (≈ 69 % pour le plomb et le cuivre). Ceci peut s'expliquer par la faible concentration de ces métaux environ de 0.0435 et 0.006 mg/l respectivement.
- De plus, on observe que le Cr est le métal le mieux éliminé dans procédé pour le jus seul, le pourcentage de réduction dépassait en fait 98%.

- Ceci peut être expliqué par le pouvoir épuratoire du JC et par sa composition riche en groupement de polysaccharides, acides carboxyliques, et en aminoacides qui jouent le rôle de cette réduction [80].

Et donc, les résultats montrent que le jus de cactus est une très bonne alternative aux coagulants et floculants synthétiques dans le traitement des eaux chargées en métaux lourds.

IV.4. Conclusion

Sur la base des résultats présentés liés à l'utilisation du cactus dans le processus de coagulation / floculation pour le traitement des eaux usées, la variabilité de l'efficacité des biomatériaux pourrait être principalement liée à trois facteurs.

Le premier est la préparation de polymère de cactus, le second est les caractéristiques originales des eaux usées et le dernier est la nature de coagulant utilisé dans ce traitement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le processus de coagulation / floculation offre divers avantages pour le traitement des eaux usées industrielles. Cependant, il a été démontré dans de nombreuses études, que les produits chimiques (tels que les sels d'aluminium) utilisés dans le processus de coagulation floculation restent dans l'eau traitée et peuvent entraîner des problèmes de santé.

Opuntia ficus indica est une espèce de plante de la famille des Cactaceae, originaire du Mexique, qui s'est naturalisée dans d'autres continents, notamment le bassin méditerranéen et en particulier en Algérie.

Pour de nombreux critères d'accessibilité, les bio-floculants à base de cactus sont très attractifs pour le traitement des eaux usées.

Les cactus sont renouvelables, abondants, respectueux de l'environnement, adaptables et biodégradables. En outre, le cactus ne présente pas de toxicité comme les floculants chimiques synthétiques.

De plus, ce bio-floculant est d'une part facile à produire et d'autre part facile à doser.

Pour ces raisons, nous nous sommes intéressées à différentes études effectuées sur la valorisation du cactus, dans le traitement des eaux usées, et plus spécialement à celles provenant de l'industrie textile et de peinture.

Selon différentes recherches, la limite d'utilisation du cactus dans le traitement des eaux usées est liée à la variabilité des rendements des préparations de cactus, qui dépend des caractéristiques des eaux usées.

Les résultats de différents travaux antérieurs, étudiés dans notre travail, illustrent l'efficacité et le potentiel technique et environnemental du processus de coagulation et de floculation, avec des floculants extraits de cladodes d'*Opuntia Ficus Indica*.

Le Cactus s'est avéré efficace pour éliminer la turbidité, la demande chimique en oxygène, la coloration, ainsi que certains métaux lourds et les solides en suspension, qu'il soit sous forme de poudre ou du jus.

Pour la poudre de cactus le taux d'élimination de la turbidité varie de 78.5 à 96 %, et la DCO avoisine les 96%.

Pour le jus de cactus elle a voisine 98 % pour la turbidité, 95 % pour la DCO, et les MES elle varie entre 71.5% à 92.2%.

Conclusion générale

Pour les métaux lourds, que ça soit en utilisant la poudre ou le jus de cactus, les taux d'élimination les plus importants, étaient ceux du chrome et du zinc. Pour la poudre ils sont de l'ordre 91% pour les 2 métaux lourds cités.

Pour le jus de cactus, les taux d'élimination du chrome et du zinc sont respectivement de l'ordre 95% et 98%.

Cette efficacité du flocculant naturel de l'OFI encourage le besoin d'explorer l'intensification de l'étude de l'échelle du laboratoire à des niveaux industriels.

En comparant certaines études réalisées par les différents chercheurs, ces dernières, montrent l'aspect prometteur, de la valorisation des potentialités de la plante, dans l'épuration des eaux usées.

Au final, le cactus a une forte possibilité de remplacer les coagulants et les flocculants industriels ayant des inconvénients sur l'environnement et en particulier sur la santé humaine.

De plus, les boues rejetées des stations d'épuration d'eaux usées ne sont pas aussi toxiques que celles qui contiennent des coagulants synthétiques.

Vu la grande disponibilité de l'OFI, en Algérie, une recherche plus approfondie sur ce type de cactus en tant que bio-flocculant, serait nécessaire, pour établir son efficacité, aux conditions optimales de sa rentabilité.

Références bibliographiques

- [1] : K.Hasan, A.Shahriar and K.U.Jim, "Water pollution in Bangladesh and its impact on public health", *Heliyon*, 5 (2019), 21- 45.
- [2] : M.Kleche, "utilisation des systèmes biologiques dans l'épuration des eaux usées cas de la région d'Annaba", Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, Algérie, 2013.
- [3] : B.Lakhdari, "Effet de la coagulation-floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP d'Ain El Houtz", Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Algérie, 2013.
- [4] : K.Bensadok, "procédé de traitement d'émulsion huile/eau et eau/huile cas particulière d'émulsion d'huile de coupe", Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie Haouari Boumediene, Alger, 2007.
- [5] : J.Wang, T.Chakraborty, C.Xu, M.B.Ray, "Treatment train for tailings pond water using *Opuntia ficus-indica* as coagulant", *Separation and purification technology*, 211 (2019), 448 - 455.
- [6] : B.Lallouche, " Hybridation de l'*Opuntia ficus indica* Mill .f. inermis par quatre espèces d'*Opuntia* (*O. robusta* var. *robusta* ; *O. engelmannii* var. *languiformis* ; *O. ficus indica* Mill .f. *amyclea* ; *O. streptacantha* Lem.) Dans les zones arides et semi-arides ", Mémoire de magister, Université Saad Dahleb, Blida, 2008.
- [7] : M.Tamine, " Production d'acide lactique par *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* sur jus de figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*)", Doctorat 3^{ème} cycle, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2019.
- [8] : S.Halmi, "Etude botanique et phytochimique approche biologique et pharmacologique d'*Opuntia ficus indica*", Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences, Université des Frères Menyouri, Constantine, 2015.
- [9] : K.Ghédira et P.Goetz, "Figuier de barbarie : *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae)", *Matière médicale*, 16 (2018), 374 – 378.
- [10] : C.C.Black et C.B.Osmond, "Crassulacean acide metabolism photosynthesis : working the night shift", *Kluwer Academic Publishers*, 76 (2003), 329 – 341.

Références bibliographiques

- [11] : M.R.Mobhammer et al, "Evaluation of different methods for the production of juice concentrates and fruit powders from cactus pear" , Innovative Food Science and Emerging Technologies, 7 (2006), 275 – 287.
- [12] : A.Boutakiout, " Etude physico-chimique, biochimique et stabilité d'un nouveau produit : jus de cladode du figuier de Barbarie marocain (Opuntia ficus-indica et Opuntia megacantha)." , Thèse de doctorat, Université d'Angers, France, 2015.
- [13] : G.Ginestra et al, "Anatomical, chemical and Biochemical characterization of cladodes from prickly pear (OF-I (L.) Mill.)", Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57 (2009), 10323–10330.
- [14] : F.C.Stintzing et R.Carle, "Cactus stems (opuntia Spp.) : A review ou their chemistry, technology and uses ", Molecular nutrition and food Research, 49 (2005), 175 – 194.
- [15] : O.Bouaouine, " Caractérisation et valorisation de bioressources végétales pour le prétraitement d'effluents par coagulation-floculation ", Thèse pour obtenir le grade de Docteur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc, 2018.
- [16] : T.Guevara-Figueroa et al, "Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (Opuntia spp.)", Journal of Food Composition and Analysis, 23 (2010), 525 – 532.
- [17] : K.EL-Mostafa et al, "Nopal cactus (opuntia ficus-indica) as a source of bioactive compounds for Nutrition, Health and Disease", Journal Molecules, 19 (2014), 14879-14901.
- [18] : L.Felkai-Haddache et al, " Microwave optimization of mucilage extraction from Opuntia ficus indica Cladodes", International Journal of Biological Macromolecules, 84 (2016), 24 – 30.
- [19] : F.Di Lorenzo et al, "The polysaccharide and low molecular weight components of Opuntia ficus indica cladodes : Structure and skin repairing properties", Carbohydrate Polymers, 157 (2017), 128 – 136.
- [20] : N.Adjeroud et al, " Effect of Opuntia ficus indica mucilage on copper removal from water by electrocoagulation-electroflotation technique", Journal of Electroanalytical Chemistry, 811 (2018), 26 – 36.
- [21] : F.K.Benattia, "Analyse et application des extraits de pépins de figues de barbarie", Thèse de doctorat, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [22] : B.K.Louacini, A.Dellal, M.Halbouche, K.Ghazi, "Effect of Incorporation of the Spineless Opuntia ficus Indica in Diets on Biochemical Parameters and its Impact on the Average Weight of Ewes During the Maintenance", Global Veterinaria, 8 (2012), 352-359.

Références bibliographiques

- [23] : M. Alvarez et al, "Usa de pulpa de tuna (opuntia boldinghii) en la elaboracion de bebidas citricas pigmentadas", *Interciencia*, 28 (2003), 282 – 286.
- [24] : G.Welegerima et al, "Phytochemical composition and antibacterial activity of Opuntia Ficus Indica cladodes extracts", *Journal of Medicinal Plants Studies*, 6 (2018), 243-246.
- [25] : P. Barrios et al, "actus pear (opuntia spp cactaceae) internationale network : an efforts for productivity and environnementale conservation for arid and semiarid lands ", *Cactus and succulent journal*, 65 (1994), 225 – 229.
- [26] : A.Diaz et al, "A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela.", *Process Biochemistry*, 35 (1999), 391 – 395.
- [27] : Z.Jingdong et al, "A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment ", *Process Biochemistry*, 41 (2006), 730 – 733.
- [28] : A.Abid et al, "Valorisation d'un nouveau bio flocculant (extrait de cactus) dans le traitement physico-chimique des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension" , *Revue des Energies Renouvelables*, 12 (2009), 321 – 330.
- [29] : S.Hadj-Kouider, "Caractérisation et traitement des boues d'épuration de la région d'Alger", Thèse de magistère, Université Saad Dahleb, Blida, 2011.
- [30] : T. Kazi et A.Virupakshi (2013). "Treatment of Tannery wastewater using natural coagulants", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2 (2013), 2319 – 8753.
- [31] : M.Belbahloul et al, "Cactus Opuntia Ficus Indica : une solution contre la pollution métallique et les Matières En Suspension", *J. Mater. Environ. Sci.*, 5 (2014), 2381-2384.
- [32] : S.Vishali et R.Karthikeyan, " Cactus opuntia (ficus-indica) : an eco-friendly alternative coagulant in the treatment of paint effluent", *Desalination and Water Treatment*, 2014, 1 – 9.
- [33] : M.S.Metahri, "Elimination simultanée de la pollution azotée phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes : cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou", Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [34] : N.Ghettas, "Epuration des eaux usées : cas de la ville de Touggourt", Diplôme d'ingénieur, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2009.
- [35] : A.Lipponen, N.Nikiforova, "Les eaux usées une ressource inexploitée", Rapport de recherche 07-SP, Paris : Place de Fontenoy, 2017.

Références bibliographiques

- [36] : S.Baumont, "Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France", Rapport de recherche, D'ÎLE-de-France, Institut d'aménagement et d'urbanisme, 2004.
- [37] : Z.Bakiri, "Traitement des eaux usées par procédés biologique classique : Expérimentation et modalisation ", Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2007.
- [38] : E.Euvrard, "Substances dangereuses dans les effluents de traitement de surface : identification et traitement par des procédés innovants", Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, 2016.
- [39] : D. Krithika, P.Ligy, "Treatment of wastewater from water based paint industries using submerged attached growth reactor", International Biodeterioration & Biodegradation, 107, 2016, 31-41.
- [40] : "Peinture en phase aqueuse composition, toxicologie", ED955 aide-mémoire technique, Institut national de recherche et de sécurité, 2005.
- [41] : Fréquence Asie, Publié le 09 septembre 2018, <https://www.rfi.fr/fr/emission/20180909-bangladesh-dhaka-pollue-photojournaliste-gael-turine-visa>.
- [42] : M.Y.Okacha, "Epuration des eaux usées par lagunage naturel : étude de la performance du dispositif de traitement des eaux usées par lagunage naturel de Ain Ouarka Wilaya de Naama", Mémoire de magister, Université d'Oran, Oran, 2008.
- [43] : S.Arris, "Etude Expérimentale de l'Élimination des Polluants Organiques et Inorganiques par Adsorption sur des Sous-Produits de Céréales", Thèse de doctorat, Université de Constantine, Constantine, 2008.
- [44] : Y.Debiche, "Etude des éléments traces métalliques présentes dans les boues des stations d'épuration a boues activées", Mémoire de magister, Ecole nationale supérieure d'hydraulique Arbaoui Abdellah, Blida, 2014.
- [45] : Rodier, J., "Analyse de l'eau : eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer ", 8^{ème} édition, Paris, 2005.
- [46] : Rejsek, F., "Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques ", 1^{er} édition, France, 2002.
- [47] : R.Kesbi, "Etude des performances épuratoires d'une STEP de l'ouest Algérien Cas de la nouvelle STEP d'Ain Temouchent", Mémoire de projet de fin, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2016.

Références bibliographiques

- [48] : Duguet, J.P., "Réglementation et traitement des eaux destinées à la consommation ", 1^{er} édition, France, 2006.
- [49] : H. Saadi, Etude des performances d'un lit bactérien classique à garnissage en pouzzolane de Beni Saf, Mémoire de projet de fin, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [50] : JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE, N° 26, 23 avril 2006
- [51] : N. Aouba, "Étude d'un coagulant organique naturel pour le traitement des eaux potable et usées", Mémoire de magister, Université Laval, Canada, 2017.
- [52] : C. Cardot, G. Arnaud, "Réglementation, analyse volumétrique et spectrophotométrique, statique- Cours et exercices corrigés", 1^{er} édition, France, 2013.
- [53] : H. Sayah, "Conditionnement électrochimique des boues d'épuration des eaux usées urbaines avec ajout d'un bio-floculant (poudre de cactus) : Cas de la station d'épuration des eaux usée de la ville de Beni- Messous (Wilaya d'Alger)", Mémoire de fin d'étude, Université de Blida 1, Blida, 2016.
- [54] : C. R.Vladimir, "Transport de colloïdes en milieu poreux : étude expérimentales ", Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2009.
- [55] : F. Berrefai, "Dégradation d'un rejet de laboratoire par traitement en systèmes combinés ", Mémoire de magister, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2011.
- [56] : N. Rafalihery, "Contribution à l'étude comparative de performance de quelques floculants en vue de production d'eau potable", Mémoire de master, Université d'Antananarivo, Madagascar, 2016.
- [57] : P. Leblanc, "Etude de phénomène d'électrisation par écoulement : impact d'un champ électrique externe sur la double couche électrique", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2006.
- [58] : L. Djebbara, "Contribution à l'étude des interactions électrostatiques dans les solutions de poly-électrolytes ", Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012.
- [59] : R.Vaillancourt et al, "Évaluation d'un procédé de coagulation-floculation au chitosane pour l'enlèvement du phosphore dans les effluents piscicoles", Document Confidentiel, Université du Québec, Canada, 2008.

Références bibliographiques

- [60] : A. Lounnas, "Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi-Kroma de Skikda ", Mémoire de magister, Université de 20 Aout 1955, Skikda, 2009.
- [61] : M. Selka, " Influence des particules argileuses sur la coagulation – Flocculation", Mémoire de master, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, 2013.
- [62] : S.Ezziane, "Traitement des eaux de rejets de l'unité Ceramit 'TENES'", Mémoire de magister, Université HASSIBA BEN BOUALI, Chlef, 2007.
- [63] : M.D. Dihang, "Mécanisme de coagulation et de flocculation de suspension d'argiles diluées rencontrées en traitement des eaux ", Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2007.
- [64] : S.Y. Choy et al, " A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification " , *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12 (2015), 367 – 390.
- [65] : C. Desjardins, " Simulation et étude en laboratoire de la flocculation lestée à l'aide d'une procédure modifiée de Jar Test" , Thèse de doctorat, Université de Montréal, Canada, 1999.
- [66] : <http://technique.eau.free.fr/>
- [67] : D. Wang et al, "Speciation stability of inorganic polymer flocculant–PACl", *Colloids and Surfaces A : Physicochemical. Eng*, 243 (2004), 1 – 10.
- [68] : G. Nacoulma, J. Piro et A. Bayane, "Etude de l'activité flocculant d'une complexe protéine-mucilage de végétal dans la clarification des eaux brutes ", *Journal de la société Quest-Africaine de chimie*, 9 (2000), 43 – 57.
- [69] : J.K. Fatombi, " Elimination du fer et du manganèse d'une eau de surface par les graines de *Moringa oleifera*" , *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7 (2013), 1379 – 1391.
- [70] : H.R. Hernandez, " Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable ", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2007.
- [71] : Boursalii, "Etude expérimentale de la coagulation-flocculation par le sulfate ferrique et le chlorure ferrique des matières en suspension", Mémoire d'ingénieur d'états en géologie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [72] : O. Bouaouine et al, "Comparative study between Moroccan cactus and chemicals coagulants for textile effluent treatment " , *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8 (2016), 2687 – 2693.

Références bibliographiques

- [73] : H. Karahacane et K. Bahri, "Extraction de jus de cactus et étude de son effet sur les propriétés physico-chimique d'une eau industrielle", Mémoire de master, Université Djilali Bounaama, Khemis Miliana, 2019.
- [74] : M. Sellami et al, "Cactus juice as bio-flocculant in the coagulation–flocculation process for industrial wastewater treatment : a comparative study with polyacrylamide", *Water Science and Technology*, 70 (2014), 1175 – 1181.
- [75] : A. Abid, A. Zouhri et A. Idir, "Utilisation d'un nouveau bio-flocculant extrait de cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation flocculation", *Afrique Science*, 5 (2009), 25 – 35.
- [76] : E.N. Ali, "Moringa oleifera seeds as natural coagulant for water treatment ", *Thirteenth International Water Technology*, 13 (2009), 163 – 168.
- [77] : M. Gueye, " Caractérisation par infrarouge à transformée d Fourier des réactions chimiques entre post-décharges et précurseurs organosiliciés : cas du 3 aminopropyltriéthoxysilane (APTES) ", Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 2016.
- [78] : M. Haddoud, " Contribution à l'étude des éléments chimiques en traces dans les eaux souterraines profondes de la wilaya de Biskra- Cas du cuivre et du zinc", Mémoire de magister, Université de Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [79] : T. Nharingo, M.T Zivurawa et U. Guyo, " Exploring the use of cactus *Opuntia ficus indica* in the bio coagulation–flocculation of Pb(II) ions from wastewater ", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12 (2015), 3791 – 3802.
- [80] : T. Nharingo, M. Moyo, " Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewater. A critical review", *Journal of Environmental management*, 166 (2016), 55 – 72.