

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université A. M. OULHADJ - Bouira  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie des Procédés



# Mémoire

Présenté par

**GUELLAL Naouel**  
**DIALLO Fatimata**

Pour l'obtention du diplôme de

# MASTER

Filière : Génie des Procédés  
Spécialité : Génie de L'environnement

Utilisation du cactus comme alternative chimique et  
application au traitement de rejet laitier

Soutenu le 24 /06/ 2025

Devant le jury :

Mr LOUNICI	Hakim	Prof	UAMOB	Président
Mr AOUDJIT	Farid	MCA	UAMOB	Examineur
M <sup>me</sup> EL HANAFI	Nawel	MCA	UAMOB	Encadrante
M <sup>me</sup> ARBIA	Leila	MCB	UAMOB	Co- encadrante

Année Universitaire : 2024/2025

## ملخص

يمثل معالجة المياه العادمة الناتجة عن صناعة الألبان تحدياً بيئياً مهماً، وذلك بسبب احتوائها على حمولة عضوية عالية وغناها بالمغذيات مثل الفوسفات والنترات، وتأثيرها المحتمل على النظم البيئية. وعلى الرغم من فعالية الحلول التقليدية، إلا أنها تعتمد غالباً على مواد كيميائية مكلفة وقد تكون سامة. وفي إطار البحث عن حلول مستدامة، يتجه الاهتمام نحو استخدام *Opuntia*، مخالبات حيوية طبيعية، منخفضة التكلفة، قابلة للتحلل الحيوي ومتوفرة بسهولة. يُعد نبات الصبار من نوع المنتشر في المناطق الجافة، غنياً بالمخاطيات والسكريات المتعددة التي تمتلك خصائص تخثيرية معروفة. يهدف هذا العمل إلى تقييم فعالية مستخلص الصبار في معالجة مياه الصرف الناتجة عن صناعة الألبان، من خلال قياس تأثيره على بعض والفوسفات، ودرجة الحموضة (DCO)، المؤشرات الرئيسية للتلوث مثل العكارة، والطلب الكيميائي على الأوكسجين (pH)، وذلك في إطار تثمين الموارد الطبيعية المحلية.

(DRX)، حيود الأشعة السينية، (FTIR) مطيافية الأشعة تحت الحمراء، (pH) الكلمات المفتاحية: الرقم الهيدروجيني، العكارة، الفوسفات، الحمأة.

## Résumé

Le traitement des eaux usées issues de l'industrie laitière représente un défi environnemental majeur, en raison de leur forte charge organique, de leur richesse en nutriments (phosphates, nitrates) et de leur impact potentiel sur les écosystèmes. Bien que les méthodes de traitement traditionnelles soient efficaces, elles reposent souvent sur des produits chimiques coûteux et parfois toxiques. Dans une logique de durabilité, la recherche s'oriente de plus en plus vers l'utilisation de bio-floculants naturels, à la fois peu coûteux, biodégradables et facilement disponibles. Le cactus du genre *Opuntia*, abondant dans les régions arides, est riche en mucilage et en polysaccharides, reconnus pour leurs propriétés floculantes. Cette étude vise à évaluer l'efficacité de l'extrait de cactus dans le traitement des effluents laitiers, en mesurant son impact sur des paramètres clés de pollution tels que la turbidité, la DCO, les phosphates et le pH, dans une perspective de valorisation des ressources naturelles locales.

Mots-clés : pH, FTIR, DRX, Turbidité, phosphate, boues.

## **Abstract**

The treatment of wastewater from the dairy industry represents a major environmental challenge due to its high organic load, its richness in nutrients (phosphates, nitrates), and its potential impact on ecosystems. Although traditional treatment methods are effective, they often rely on costly and sometimes toxic chemical products. In a sustainability-oriented approach, research is increasingly focusing on the use of natural bio-flocculants that are low-cost, biodegradable, and readily available. The cactus of the *Opuntia* genus, abundant in arid regions, is rich in mucilage and polysaccharides known for their flocculating properties. This study aims to evaluate the effectiveness of cactus extract in treating dairy effluent by measuring its impact on key pollution parameters such as turbidity, COD, phosphates, and pH, with a view to promoting the valorization of local natural resources.

**Keywords :** pH, FTIR, XRD, Turbidity, phosphate, sludge.

# Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Madame EL HANAFI Nawel**, notre encadrante, pour sa disponibilité, sa rigueur scientifique et ses précieux conseils tout au long de ce travail. Son encadrement attentif, sa bienveillance et ses encouragements constants ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également **Madame ARBIA Leila**, notre Co-encadrante, pour ses orientations pertinentes, son soutien technique et son suivi régulier tout au long de ce projet. Son implication a été essentielle à la bonne conduite de ce travail.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, **Monsieur LOUNICI Hakim**, Professeur et Président du jury, et Monsieur AOUDJIT Farid, Maître de Conférences, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques constructives et enrichissantes.

Nous remercions *chaleureusement l'ensemble du personnel du laboratoire de la Faculté* pour leur accueil, leur assistance technique, ainsi que pour les moyens matériels mis à notre disposition durant la phase expérimentale de cette étude.

Notre reconnaissance s'adresse également à *tous les enseignants du département* pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité, et leur accompagnement pédagogique tout au long de notre parcours universitaire.

Nous n'oublions pas *nos collègues et camarades de promotion*, pour l'entraide, les échanges enrichissants et l'esprit de collaboration qui ont marqué cette année.

Enfin, nous dédions une pensée toute particulière à *nos familles*, et notamment à nos parents, pour leur soutien moral indéfectible, leur patience, leur confiance et leur amour inconditionnel, sans lesquels rien n'aurait été possible. A toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail, nous exprimons notre sincère reconnaissance.

**MERCI.**

# Dédicace

À ma chère mère,

Pour son amour inconditionnel, sa tendresse, ses prières silencieuses et son soutien infini. Tu es ma lumière et ma source de force. Que Dieu te protège et t'accorde une longue vie pleine de santé et de bonheur.

À mon père,

Pour ses conseils sages, son soutien constant et ses sacrifices silencieux. Merci d'avoir toujours cru en moi.

À ma sœur,

Pour sa douceur, sa patience et son réconfort dans les moments difficiles. Ton affection m'est précieuse.

À mon frère,

Pour son soutien, sa complicité et ses encouragements tout au long de ce parcours.

À mes chers amis,

Pour leur amitié sincère, leur présence fidèle et leurs encouragements qui m'ont donné du courage jusqu'au bout.

À tous ceux et celles qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail...

Merci du fond du cœur.

NAOUEL

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Dédicace

الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ، وَالصَّلَاةُ وَالسَّلَامُ عَلَى نَبِيِّنَا مُحَمَّدٍ ﷺ، وَعَلَى آلِهِ وَصَحْبِهِ أَجْمَعِينَ

*Je dédie ce travail, fruit de patience, d'efforts et de persévérance, à mes chers parents :*

*À mon père Salif Diallo,*

*À ma mère Aminata N'Gaidé,*

*Pour votre amour infini, vos prières constantes, vos sacrifices silencieux et votre soutien inestimable. Ce travail est aussi le vôtre.*

*À mon frère Ahmadou Tijani Diallo,*

*Pour sa présence rassurante, ses encouragements sincères et son affection fraternelle.*

*À mes frères et sœurs,*

*Pour leur tendresse, leurs sourires, leur amour sincère et leur aide précieuse, toujours présents dans les moments clés de ma vie.*

*À mon cousin Ibrahim Harouna Dia,*

*Pour sa bienveillance, son écoute et son appui moral indéfectible.*

*À mes amis fidèles :*

*Aboubacary Oumar Tall, Abdoulaye Ba, et Moussa Adoum Seid,*

*Merci pour votre amitié vraie, vos encouragements constants et votre présence à chaque étape.*

*À toute ma famille à Bouira,*

*Je vous exprime ma profonde gratitude pour votre accueil, votre générosité et votre affection durant mon parcours.*

*À vous tous, je vous dédie humblement ce mémoire, avec tout mon amour, ma reconnaissance et mes prières.*

**D.fatimata**

# Liste des abréviations

**FTIR** : *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier)

**DRX** : Diffraction des Rayons X

**JCPDS** : *Joint Committee on Powder Diffraction Standards*

**LAB** : *Lactic Acid Bacteria* (Bactéries Lactiques)

**OD<sub>600</sub>** : *Optical Density at 600 nm* (Densité Optique à 600 nanomètres)

**pH** : Potentiel Hydrogène

**MRS** : *de Man, Rogosa and Sharpe medium* (Milieu de culture de Man, Rogosa et Sharpe)

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre 1

**Tableau I.1:** Comparaison des flux des effluents pour les trois types de production laitière.

**Tableau I.2 :** Composition du figuier de barbarie *Opuntia ficus-indica* (Anonyme, 1993)

## Chapitre 2

**Tableau II.1:** Caractéristiques des Additifs chimiques et leur provenance

## Chapitre 3

**Tableau III.1:** Présence qualitative des métabolites secondaires dans les extraits de cactus.

**Tableau III.2:** Dosage quantitatif des métabolites secondaires.

**Tableau III. 3 :** Bandes caractéristiques de la poudre à base de cactus.

**Tableau III.4:** Groupes fonctionnel des bandes FTIR des boues.

**Tableau III. 5 :** Comparaison des bandes FTIR entre la poudre de cactus et des boues générés après traitement.



# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

**Figure I.1:** Variation du potentiel de Nernst pour une particule colloïdale.

**Figure I.2:** Avantages des coagulants naturels par rapport aux coagulants chimiques.

**Figure I.3:** La plante d'*Opuntia ficus indica* willaya *de* bouira.

**Figure I.4:** Distribution géographique du figuier de barbarie.

**Figure I.5 :** Schéma illustrant les différentes parties du figuier de Barbarie.

## Chapitre II

**Figure II.1:** Préparation de la poudre du cactus.

**Figure II.2:** Extraction aqueuse.

*Figure II.3: Extraction éthanolique.*

**Figure II. 4 :** Dosage de flavonoïde.

**Figure II.5:** Dosage de tanin.

**Figure II.6 :** Dosage d'alcaloïde.

**Figure II. 7 :** Dosage des composés phénoliques.

**Figure II. 8 :** Dosage de saponines.

**Figure II.9 :** Dosage de stéroïdes et triterpénoïde.

**Figure II.10 :** Dosage de glycoside.

**Figure II.11:** Jar Test.

**Figure II.12 :** bactéries.

**Figure II.13 :** L'incubation a été menée.

## Chapitre III

**Figure III.1:** Spectre FTIR du bio-floculant à base de cactus.

**FigureIII.2:** Analyse DRX de la poudre d'*opuntia ficus indica*.

**Figure III.3 :** Effet de la température de séchage sur l'élimination de la turbidité.

**Figure III.4 :** Réduction de la turbidité en fonction de pH (CP=1g/L, [lait]=0,1g/L, V=1 L).

**Figure III.5 :** Influence de la dose de biofloculant sur la réduction de la turbidité.

**Figure III.6 :** Influence de la vitesse d'agitation sur l'élimination de la turbidité.

**Figure III.7:** Influence de la durée d'agitation lente sur l'élimination de la turbidité.

**Figure III.8:** Spectre FTIR des boues générées après décantation.

**Figure III.9:** Analyse de la boue régénérée après traitement.

**Figure III.10 :** Observation microscopique de bactéries lactiques du yaourt nature (Soummam) cultivées dans le milieu de culture MRS

**Figure III.11:** Évolution du pH au cours de la croissance des bactéries lactiques dans un milieu à base de poudre de cactus et de lait.

**Figure III.12:** Courbe de croissance des bactéries lactiques en fonction du temps (DO600) dans un milieu à base de cactus et de lait.

# Sommaire

Dédicace .....	i
Remerciement .....	ii
Résumé.....	iii
Liste des abréviations.....	vi
Liste des tableaux .....	v
Liste des figures .....	vii
Introduction générale : .....	Erreur ! Signet non défini.

## Chapitre 1 : Revue bibliographiques

### I.1 Introduction sur la pollution des eaux par les rejets laitiers Erreur ! Signet non défini.

#### I.1.1 Origine de la pollution des eaux de laiterie ..... Erreur ! Signet non défini.

- ☐ Réception du lait et remplissage des récipients. Erreur ! Signet non défini.
- ☐ Nettoyage des équipements..... Erreur ! Signet non défini.
- ☐ Production de beurre .....
- ☐ Eaux de refroidissement et condensats .....

#### I.1.2 La composition du lait ..... Erreur ! Signet non défini.

2. Une suspension colloïdale de caséines..... Erreur ! Signet non défini.
3. Émulsion lipidique : .....
4. Micro-organismes du lait : .....

#### I.1.3 Polluants des eaux de laiterie ..... Erreur ! Signet non défini.

#### I.1.4 Impact des rejets laitiers sur l'environnement..... Erreur ! Signet non défini.

#### I.1.5 Caractéristiques physico-chimiques des rejets laitiers ..... Erreur ! Signet non défini.

##### Demande Biologique en Oxygène (DBO) ..... Erreur ! Signet non défini.

- ☐ Demande Chimique en Oxygène (DCO) .....
- ☐ Matières en Suspension (MES) et Matières Volatiles en Suspension (MVS)  
.....

□ Azote .....	Erreur ! Signet non défini.
□ Phosphore .....	Erreur ! Signet non défini.
□ PH .....	Erreur ! Signet non défini.
I.1.6 Méthodes de traitement des rejets laitiers .....	Erreur ! Signet non défini.
I.1.7 Prétraitement .....	Erreur ! Signet non défini.
I.1.8 Traitement primaire.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2 Généralité sur la Coagulation-Floculation .....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.1 Stabilités des solutions colloïdales.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.2 Classification des colloïdes .....	Erreur ! Signet non défini.
1. Les colloïdes hydrophiles :.....	Erreur ! Signet non défini.
2. Les colloïdes hydrophobes.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3 Mécanismes de la coagulation/ floculation .....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.4 Les principaux coagulants .....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.5 Les flocculants .....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.6 Avantage de coagulants et de flocculants naturels.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3 Généralité sur la plante d'Opuntia ficus indica.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.1 Origine et Répartition Géographique du Genre Opuntia.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2 Description botanique .....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.3 Classification et composition.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.4 Domaine d'utilisation.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5 Importances Agroéconomiques du Figuier de Barbarie ...	Erreur ! Signet non défini.
I.3.6 Utilisation Médicinale .....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.7 Utilisation Industrielle.....	Erreur ! Signet non défini.

## Références bibliographiques

# *Introduction générale*

## Introduction générale

La pollution des eaux constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur. Elle peut provenir de multiples sources, notamment domestiques, industrielles et agricoles. Ces pollutions se caractérisent par la présence de matières organiques, de nutriments (azote, phosphore), de métaux lourds, de micro-organismes pathogènes et de divers composés chimiques, pouvant entraîner une dégradation des écosystèmes aquatiques, une eutrophisation des milieux et des risques pour la santé humaine.

Dans ce contexte, le développement des industries agroalimentaires, en particulier l'industrie laitière, engendre une production croissante d'eaux usées riches en matières organiques, en nutriments et en matières en suspension. Ces rejets, s'ils ne sont pas traités correctement, peuvent provoquer une dégradation significative de l'environnement, notamment par l'eutrophisation des milieux aquatiques, la pollution des sols et la menace sur la biodiversité. Les méthodes classiques de traitement des eaux usées font souvent appel à des flocculants chimiques, efficaces mais présentant des inconvénients non négligeables tels que la toxicité, le coût élevé et la production de boues polluantes.

Un défi majeur dans l'industrie laitière réside dans la charge de pollution importante de ses eaux usées. Caractérisés par des niveaux élevés de DBO et de DCO, des solides dissous et en suspension (riches en huiles et graisses), et des nutriments tels que les phosphates et les nitrates provenant des procédés de production et de nettoyage, cet effluent nécessite un traitement complet avant la libération dans l'environnement. Par conséquent, il est essentiel de procéder à une évaluation de la pollution pour identifier les sources, caractériser les rejets, et mettre en œuvre des stratégies de minimisation. En outre, les boues de traitement qui en résultent nécessitent également un examen et une gestion attentifs.

Dans ce contexte, l'utilisation de bio-flocculants naturels apparaît comme une alternative durable et prometteuse. Parmi eux, le cactus du genre *Opuntia*, plante abondante dans les régions arides et semi-arides, se distingue par sa richesse en mucilages et en polysaccharides, des composés ayant démontré une forte capacité à flocculer les particules présentes dans les eaux usées.

Ce travail s'inscrit donc dans une démarche de valorisation de ressources naturelles locales, en étudiant l'efficacité d'un bio-floculant extrait de cactus dans le traitement d'un rejet laitier. L'objectif est d'évaluer, à travers des essais en laboratoire, l'impact de ce bio-floculant sur des paramètres clés de la pollution comme la turbidité, la DCO, les phosphates et le pH, afin de proposer une solution écologique, économique et applicable à l'échelle locale.

Ce mémoire se compose de trois grands chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les rejets laitiers, leur composition, leur origine, leurs impacts environnementaux, et que les différentes méthodes de traitement, en particulier la coagulation/floculation, et une aperçu sur la plante à étudier.
- Le deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés lors des expérimentations en laboratoire, notamment la préparation du bio-floculant à base de cactus, les conditions d'essais et les paramètres analysés.
- Le troisième chapitre est dédié à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats obtenus, suivie d'une conclusion générale et des perspectives proposées pour de futurs travaux.

## **I.1 Introduction sur la pollution des eaux par les rejets laitiers**

Les rejets issus des industries laitières constituent une source de pollution importante des milieux aquatiques. Ces effluents sont générés tout au long du processus de transformation du lait en produits dérivés, tels que les yaourts, fromages, crèmes ou beurres. Ils sont riches en matières organiques, en graisses, et en protéines, en lactose, mais aussi en agents chimiques utilisés pour le nettoyage des équipements. Si ces eaux usées ne sont pas convenablement traitées, elles peuvent entraîner une pollution de l'environnement, provoquer une baisse de l'oxygène dissous dans les milieux récepteurs, et contribuer à des phénomènes d'eutrophisation.

### **I.1.1 Origine de la pollution des eaux de laiterie**

Les eaux résiduelles de l'industrie laitière proviennent principalement des opérations de rinçage et de nettoyage intensif nécessaires à la transformation du lait. Ces effluents, qui contribuent significativement à la charge polluante globale de la laiterie, sont générés à diverses étapes du processus de production [1].

- **Réception du lait et remplissage des récipients** : Les opérations de nettoyage des aires de réception et des équipements de remplissage génèrent des eaux contenant des résidus de lait.
- **Nettoyage des équipements** : Le nettoyage des camions-citernes, des stérilisateur, des évaporateurs et des autres installations de laiterie est une source importante d'eaux résiduelles. Ces eaux sont polluées par des traces de lait et, potentiellement, par des résidus de produits chimiques utilisés pour le nettoyage et la désinfection, tels que l'acide nitrique, la soude et divers désinfectants [2].
- Le nettoyage en place (NEP) est une source importante d'effluents.
- **Production de beurre** : Les eaux résiduelles issues de la fabrication du beurre sont particulièrement chargées en graisses et en sels nutritifs, ce qui augmente leur potentiel polluant [2].
- **Eaux de refroidissement et condensats** : Bien qu'elles soient généralement peu polluées car n'étant pas directement en contact avec les produits laitiers, les eaux de refroidissement et les condensats représentent un volume d'effluent non



négligeable [3]. Leur faible charge polluante permet souvent leur recyclage au sein de la laiterie, contribuant ainsi à réduire la consommation d'eau globale de l'installation.

### I.1.2 La composition du lait

Le lait est un système aqueux complexe, caractérisé par la coexistence de plusieurs phases en équilibre instable. On distingue :

1. La phase aqueuse, qui constitue la phase continue dispersante, contient des molécules dissoutes, telles que le lactose, et des ions, comme le calcium. Cette phase présente une stabilité intrinsèque [4].
2. **Une suspension colloïdale de caséines** : ces protéines sont associées à des minéraux, principalement le phosphate de calcium  $((\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3)$ , formant des structures macromoléculaires complexes appelées micelles phosphocalciques ou micelles de caséines. Ces agrégats, de forme et de masse variables, portent une charge nette négative dans le lait frais. Cette charge négative engendre une répulsion électrostatique entre les micelles, assurant ainsi leur dispersion et la stabilité du système colloïdal. Il est important de noter que les micelles de caséines peuvent être déstabilisées par des facteurs externes qui neutralisent ces charges négatives ou altèrent leur intégrité structurale. Cette déstabilisation conduit à l'agglutination des micelles et, par conséquent, à la séparation de la phase aqueuse dispersante. Ce phénomène est désigné sous le terme de coagulation du lait [4].
3. **Émulsion lipidique** : Les globules gras du lait sont constitués d'une phase lipidique centrale, ou goutte lipidique, entourée d'une membrane lipoprotéique. Cette membrane est essentielle au maintien de l'intégrité et de l'individualité de chaque globule gras. La stabilité de ces globules en émulsion est assurée par la présence de charges négatives à la surface de l'enveloppe membranaire, qui induisent une répulsion électrostatique entre les globules [4].
4. **Micro-organismes du lait** : Le lait contient une population microbienne variée, composée principalement de bactéries sous forme végétative ou sporulée, maintenues en suspension stable. L'instabilité du lait est fréquemment induite par

le développement de ces micro-organismes, en particulier les bactéries lactiques, dont le métabolisme entraîne une acidification du milieu [4].

**Tableau I.1:** Comparaison des flux des effluents pour les trois types de production laitière [5].

Paramètre	Fromage	Lait frais	Lait en poudre
pH	5,22	6,92	5,80
Concentration en DCO (mg d'O <sub>2</sub> /L)	5340	4656	1908
Eau utilisée (m <sup>3</sup> /J)	495	682	390
Lait traité (m <sup>3</sup> /J)	168	223	86
Rapport des volumes = $\frac{\text{eaux utilisés}}{\text{eaux traitées}}$	2,94	3,06	4,54

### I.1.3 Polluants des eaux de laiterie

Les effluents des laiteries contiennent principalement deux types de polluants : d'une part, les produits laitiers eux-mêmes, qu'il s'agisse de matières premières ou de produits finis ; d'autre part, les réactifs utilisés pour le nettoyage des installations. Ces derniers comprennent généralement des solutions acides (comme l'acide nitrique), des solutions basiques (à base de soude), et des agents stérilisants (tels que l'eau de Javel). Bien que ces réactifs soient majoritairement d'origine minérale et présents en faibles concentrations (ce qui explique leur absence des listes officielles de polluants spécifiques), ils peuvent néanmoins provoquer des variations extrêmes du pH, tant vers l'acidité que vers l'alcalinité. De plus, il existe un risque de pollution accidentelle lié à la présence de compresseurs utilisant de l'ammoniac, soulignant la nécessité de mesures préventives pour éviter des rejets massifs en cas de fuite [6].

### I.1.4 Impact des rejets laitiers sur l'environnement

Les eaux résiduelles, comme celles rejetées par les laiteries, peuvent contenir divers agents pathogènes (bactéries, virus, etc.) qui survivent longtemps dans l'environnement. Lorsqu'elles sont rejetées sans traitement dans les rivières, les lacs ou les sols, elles polluent ces milieux et peuvent provoquer un phénomène appelé eutrophisation. Cela signifie une forte croissance des algues qui entraîne la diminution

de l'oxygène dans l'eau, ce qui peut tuer les poissons et détruire les plantes aquatiques [7].

Cette pollution peut aussi empêcher certaines activités humaines comme la baignade, la pêche, la navigation, ou même l'irrigation agricole. De plus, elle menace la biodiversité, notamment les mollusques et les crustacés [7].

Si ces eaux usées ne sont pas correctement traitées, elles peuvent aussi favoriser la propagation de maladies graves comme le choléra ou la fièvre typhoïde, surtout si l'eau contaminée est utilisée ou consommée [8].

Les rejets non traités peuvent également altérer les caractéristiques naturelles de l'eau, comme sa couleur, son odeur, sa turbidité, et sa composition physico-chimique. [9]. Dans le cas des rejets de laiterie, la pollution est généralement d'origine organique, ce qui peut rendre l'eau trouble et provoquer des odeurs désagréables si aucune mesure n'est prise [10].

Les rejets de l'industrie laitière se caractérisent par une concentration extrêmement élevée de matières organiques. Cette charge organique importante, lorsqu'elle est présente dans l'eau ou le sol, provoque une pollution par asphyxie du milieu récepteur. Cela se traduit par la pollution des petits cours d'eau, l'obstruction des sols aux points de rejet, et la production d'odeurs indésirables résultant de la fermentation. En quantités excessives, ces effluents peuvent entraîner de graves perturbations des cycles biologiques et du milieu naturel, notamment l'eutrophisation [9].

### **I.1.5 Caractéristiques physico-chimiques des rejets laitiers**

Bien que le lait soit la source première de pollution, les rejets laitiers présentent une hétérogénéité marquée tant dans leur composition que dans leur variabilité temporelle (journalière et saisonnière) [11].

L'industrie laitière, grande consommatrice d'eau, génère des volumes importants d'effluents caractérisés par une charge organique élevée, dépassant de 10 à 15 % celle

des eaux usées domestiques, et une salinité notable, avec des concentrations minérales souvent supérieures aux limites réglementaires [12].

Première phrase (Constituants de la charge organique): La charge organique des effluents laitiers est principalement constituée de lait et de lactosérum, ce dernier étant un sous-produit issu de la production fromagère

Deuxième phrase (Émulsion H/E): Une émulsion huile dans eau (H/E) dans les aliments se caractérise généralement par trois composantes essentielles : la phase dispersée, constituée de matière grasse ou d'huile sous forme de gouttelettes ; la phase continue, représentant la phase aqueuse ; et l'interface, qui constitue la troisième composante et sépare les deux phases [13].

Une hétérogénéité marquée caractérise les rejets laitiers, dont la composition et le volume fluctuent en fonction de plusieurs paramètres. Ces paramètres incluent les propriétés du lait lui-même (qui varient selon le mode d'élevage et la saison), le type de transformation subi, la taille de l'installation et les méthodes de nettoyage employées (volumes d'eau et produits chimiques). En outre, au sein d'une même laiterie, on note des variations quantitatives saisonnières, liées aux fluctuations de la collecte du lait, et des variations qualitatives journalières, dues aux rejets périodiques des eaux de pré-rinçage et des solutions de nettoyage (acides et basiques) issues des divers ateliers de production [11].

En raison de la complexité de la composition des effluents laitiers, il est difficile de quantifier l'ensemble des éléments qui les constituent. Par conséquent, l'évaluation du niveau de pollution de ces effluents repose sur l'utilisation de grandeurs globales, parmi lesquelles on distingue: [10].

Demande Biologique en Oxygène (DBO): La DBO représente la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes, dans des conditions d'obscurité et à une température de 20°C, pendant une période donnée, pour oxyder la matière organique biodégradable. La période d'incubation standard est de 5 jours, d'où la notation DBO<sub>5</sub>. Elle est exprimée en grammes d'oxygène par litre d'effluent [10].

- ✧ **Demande Chimique en Oxygène (DCO):** La DCO mesure la quantité d'oxydant chimique nécessaire pour oxyder la matière organique, qu'elle soit biodégradable ou non. Son expression est identique à celle de la DBO, en grammes d'oxygène par litre d'effluent. [10].
- ✧ **Matières en Suspension (MES) et Matières Volatiles en Suspension (MVS):** Les MES correspondent à la concentration de matière particulaire, déterminée par la masse de matière sèche retenue par filtration, et exprimée en grammes par litre d'effluent. Les MVS représentent la fraction de MES qui se volatilisent lors de la calcination à 600°C pendant 2 heures. La différence entre la concentration de MES et celle des MVS permet d'estimer la quantité de matière organique en suspension [10].
- ✧ **Azote:** L'azote peut être présent dans les effluents sous diverses formes: organique, ammoniacale, ou oxydée (nitrites  $\text{NO}_2^-$  et nitrates  $\text{NO}_3^-$ ). Sa concentration est exprimée en milligrammes d'azote élémentaire par litre d'effluent [10].
- ✧ **Phosphore :** Le phosphore est présent sous forme de phosphates organiques ou minéraux. Sa concentration est exprimée en milligrammes de phosphore élémentaire par litre d'effluent.
- ✧ **pH :** Le pH représente la concentration en ions hydrogène ( $\text{H}^+$ ) et indique l'acidité du milieu. Ce paramètre est crucial, car l'activité des micro-organismes utilisés dans les traitements biologiques est optimale dans une plage de pH spécifique [10].

### **I.1.6 Méthodes de traitement des rejets laitiers**

Les eaux usées de l'industrie laitière sont essentiellement composées de matière organique carbonée, présente sous forme soluble (lactose, acides aminés, peptides) ; le traitement de ce type d'effluents est donc axé en priorité sur l'élimination du carbone, et la turbidité [14].

### **I.1.7 Prétraitement**

La première étape du traitement des eaux usées consiste à séparer les formes de pollution facilement récupérables, telles que les particules. L'objectif est de réduire la charge polluante nécessitant un traitement ultérieur. Dans cette optique, les effluents de l'industrie laitière peuvent être soumis à divers prétraitements, notamment le dégrillage ou tamisage, le dégraissage et le dessablage, afin d'éliminer la pollution particulaire.

### **I.1.8 Traitement primaire**

Le traitement primaire des eaux usées inclut des procédés physico-chimiques visant à éliminer les matières en suspension. La coagulation est une technique couramment employée, tant pour les eaux usées industrielles que domestiques. Ce processus repose sur la déstabilisation chimique des particules colloïdales par l'ajout d'un électrolyte, suivie de leur agrégation en particules de plus grande taille, appelées floccs (floculation), et de leur séparation par précipitation sous forme d'hydroxydes [15].

Les sections suivantes présentent une synthèse des connaissances fondamentales relatives à la coagulation-floculation chimique, technique de traitement des eaux usées pertinente pour cette étude. Cependant, une description du comportement des particules colloïdales en milieu aqueux, et plus précisément des mécanismes de stabilisation et de déstabilisation, est essentielle pour comprendre ces procédés.

## **I.2 Généralité sur la Coagulation-Floculation**

Les méthodologies de coagulation-floculation représentent des techniques avancées de purification de l'eau utilisées pour éliminer les constituants colloïdaux des solutions aqueuses. La coagulation implique l'introduction et l'agitation rapides de coagulants (tels que  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , des agents synthétiques ou des polymères naturels) dans l'eau destinée au traitement, facilitant la déstabilisation des particules colloïdales en neutralisant les forces stabilisantes qui maintiennent leur suspension. Inversement, la floculation implique une agitation progressive et douce qui favorise l'agrégation de ces particules déstabilisées, aboutissant finalement à la sédimentation des floccs rapidement formés [16], qui sont ensuite retirés physiquement de la matrice liquide [16].

### I.2.1 Stabilités des solutions colloïdales

Les colloïdes sont des particules organiques ou minérales dont la taille est comprise entre quelques nanomètres et un micromètre environ. Dans les effluents liquides, ils sont notamment responsables de la couleur et de la turbidité de l'eau. Les solutions colloïdales présentent des propriétés intermédiaires entre celles d'une solution moléculaire ou ionique et celles d'un système solide. Elles diffèrent par leur taille, les plus fines étant les plus difficiles à éliminer [17].

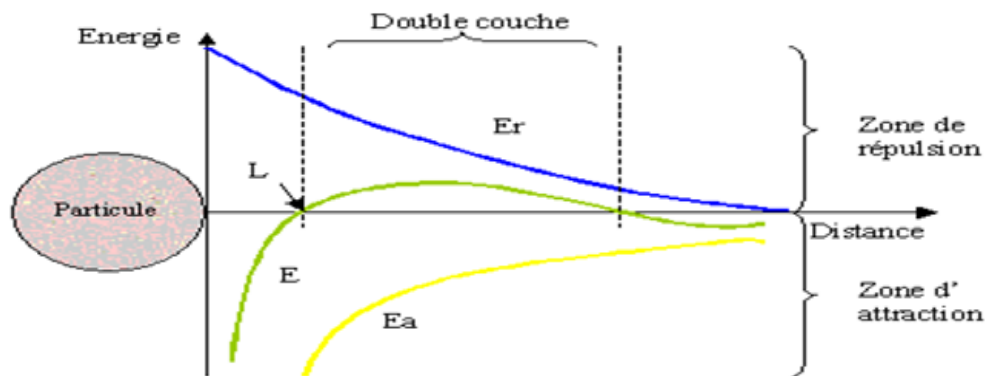
La dispersion colloïdale dépend de la distribution granulométrique et de la forme des particules, mais aussi des forces d'interactions entre ces particules, ce qui se traduit par des collisions générées par un mouvement brownien important du fait de leur infime dimension. L'efficacité de ces collisions entraîne une stabilité ainsi que d'autres propriétés de dispersions menant à l'agrégation. La dispersion est infiniment stable si toutes les collisions sont inefficaces.

### I.2.2 Classification des colloïdes

Béchac et al [17], classent les colloïdes en deux catégories en fonction de leur affinité pour l'eau : les colloïdes hydrophiles et les colloïdes hydrophobes.

1. **Les colloïdes hydrophiles:** ont une grande affinité pour l'eau et adsorbent une couche d'hydratation protectrice. Cette couche est liée à la matière solide par des liaisons physico-chimiques impliquant des groupements tels que OH-, -NH<sub>2</sub>- et -COOH-, qui peuvent être totalement ou partiellement ionisés. Les protéines, les carbohydrates et les produits organiques généralement présents dans les eaux appartiennent à cette catégorie [17].
2. **Les colloïdes hydrophobes,** en revanche, n'ont aucune affinité pour l'eau et ne possèdent pas de couche d'hydratation. Leur stabilité est principalement due à la présence de charges électriques à la surface des particules, qui engendrent une répulsion mutuelle empêchant leur agrégation. Ces colloïdes sont souvent constitués de substances peu ou pas solubles, comme les produits minéraux, et en particulier les métaux, leurs oxydes et leurs hydroxydes [15].

3. **La stabilité de ces systèmes dépend de l'équilibre entre deux forces opposées** : une force de répulsion électrostatique, due aux charges similaires des particules, et une force d'attraction (de type Van der Waals), qui tend à rassembler les particules pour atteindre une énergie potentielle minimale, fonction de la distance interparticulaire (figure I.1) [15].



*Figure I. 1: Variation du potentiel de Nernst pour une particule colloïdale [18].*

La déstabilisation des colloïdes, et par conséquent leur agglomération en floccs, peut être induite en augmentant la force ionique du milieu par l'introduction d'un électrolyte. Cette augmentation réduit l'épaisseur de la double couche électrochimique, abaissant ainsi la barrière de potentiel existant autour du colloïde et facilitant l'agrégation.

### I.2.3 Mécanismes de la coagulation/ floculation

On peut considérer qu'il existe quatre grands mécanismes qui agissant individuellement ou ensemble dans la coagulation floculation [19, 20] :

- I. Réduction de l'épaisseur de la couche ionique (compression de la double couche) : transportée par les particules, par augmentation de la force ionique de la solution.
- II. Adsorption et neutralisation des charges ioniques : par ajout d'un réactif chimique contenant des contre ions du colloïde.



**III. Adsorption et pontage entre les particules :** par utilisation des polymères de haut poids moléculaire.

**IV. Piégeage des particules (sweep flocculation) :** par formation de polymères d'hydroxydes minéraux volumineux [19, 20].

#### **I.2.4 Les principaux coagulants**

Les coagulants sont des produits qui neutralisent ou inversent les charges de la surface des matières. Il existe principalement trois types de coagulants : minéraux, organiques et naturels [18].

#### **I.2.5 Les flocculants**

Les flocculants dans le traitement des eaux usées peuvent être divisés en trois catégories différentes, à savoir : les flocculants chimiques, les bio flocculants naturels et les flocculants greffés. La biodégradabilité, la non-toxicité, l'efficacité, le comportement respectueux de l'environnement et la durabilité sont normalement les principaux objectifs du développement de flocculants naturels [18].

Afin de valoriser les substances naturelles et d'atténuer les effets délétères des agents chimiques (tels que le chlorure de fer, le sulfate d'aluminium et les polymères synthétiques) utilisés dans les méthodologies de coagulation et de flocculation, tout en respectant des normes réglementaires de plus en plus strictes et en réduisant la charge financière liée au traitement de l'eau dans le cadre du développement durable, les chercheurs ont de plus en plus recherché des produits alternatifs d'origine végétale (y compris l'alginate, le cactus, le xanthane et l'amidon...) ainsi que d'origine animale sources (telles que comme le chitosane...) [21].

Ces biomatériaux se distinguent par leur abondance, leur biodégradabilité et leur rentabilité, la considération primordiale étant leur sécurité et leur caractère non nocif pour l'environnement et la santé humaine (c'est-à-dire qu'ils sont respectueux de l'environnement) [21].

C'est dans ce contexte que les biocoagulant et les bio-flocculants, notamment ceux d'origine végétale comme le cactus (*Opuntia ficus-indica*), suscitent un intérêt

croissant pour le traitement des eaux usées industrielles, en particulier dans le secteur laitier [21].

### I.2.6 Avantage de coagulants et de floculanst naturels

Comme indiqué dans la figure (I.2), l'utilisation de coagulants et de floculants naturels représente une solution efficace pour la purification de l'eau. Ce dernier permet de réduire significativement le volume de boue, tout en augmentant sa valeur nutritive. Cette approche innovante contribue à une optimisation des processus de traitement des boues et à une réduction des coûts de manutention sur le long terme [22].

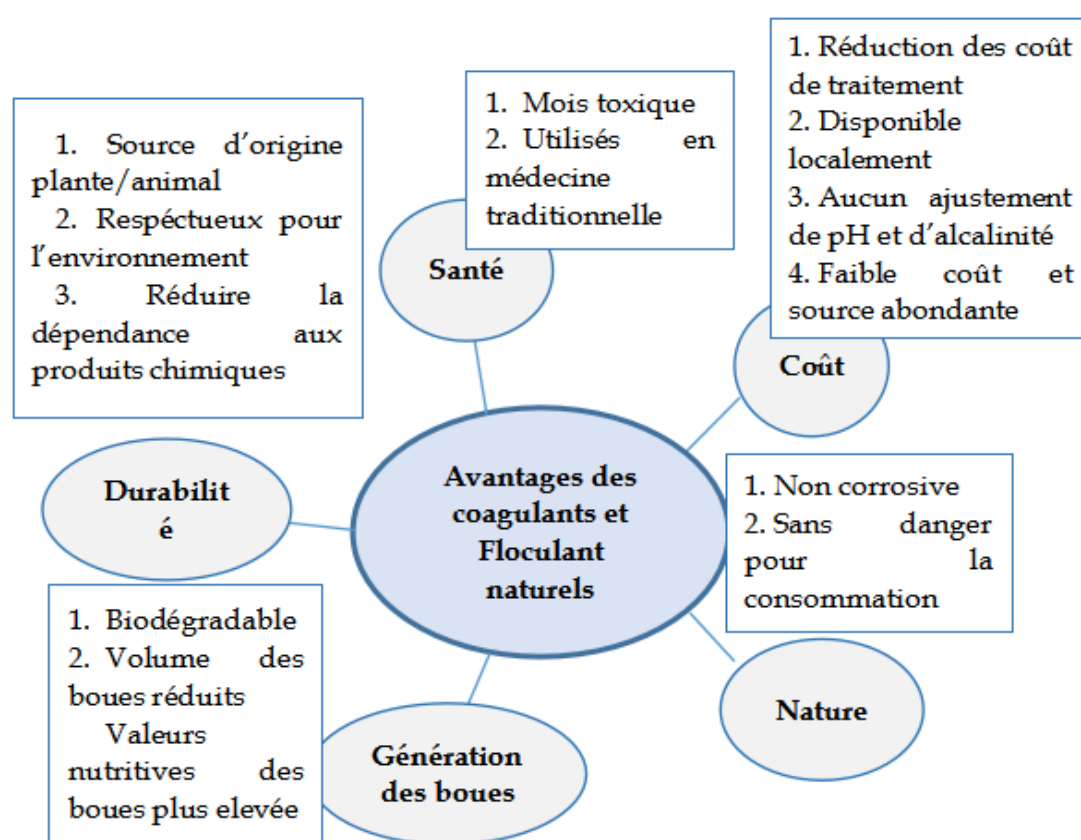


Figure I.2: Avantages des coagulants naturels par rapport aux coagulants chimiques [13].

### I.3 Généralité sur la plante d'Opuntia ficus indica

Un écrivain sicilien a un jour appelé le figuier de Barbarie « un trésor sous les épines » du fait de ses immenses bénéfices, dont certains étaient peu connus avant aujourd'hui. Parmi la famille des Cactacées, le genre Opuntia se distingue particulièrement. Originaire du Mexique, il a été introduit en Andalousie à la fin du XVe siècle, puis en

Afrique du Nord au XVI<sup>e</sup> siècle et dans les autres régions du bassin méditerranéen au XVII<sup>e</sup> siècle. Aujourd'hui, les espèces de ce genre sont présentes sur tous les continents.



**Figure I.1.** La plante d'*Opuntia ficus indica* willaya de bouira.

Le terme "cactus" est couramment utilisé pour désigner les plantes de la famille des Cactacées. Le figuier de Barbarie, scientifiquement nommé *Opuntia ficus-indica* (L.), appartient à cette famille, qui comprend environ 130 genres et près de 1500 espèces. *L'opuntia ficus-indica* est une plante tropicale et subtropicale [24].

Le nom *Opuntia* ou Oponce est dérivé du mot latin *Opuntius*, qui lui-même provient du nom de la ville grecque d'Oponthe [25].

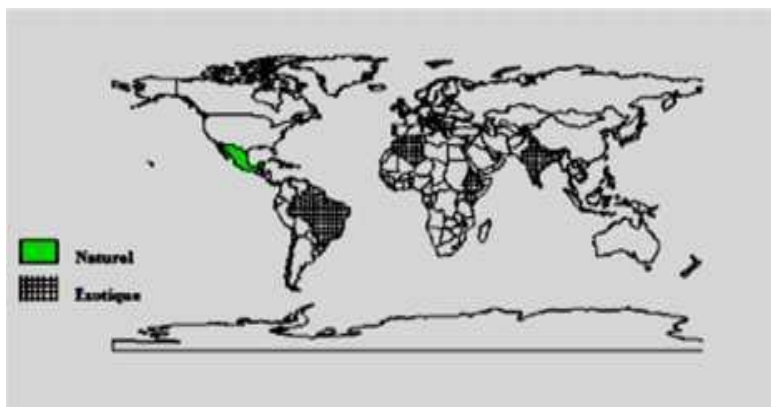
Selon les botanistes, toutes les Cactées seraient originaires d'Amérique. Ils affirment qu'avant Christophe Colomb, on n'en connaissait aucune dans l'ancien monde mais que ces singuliers végétaux aux formes bizarres furent parmi les toutes premières plantes que les exploiters rapportèrent du nouveau monde [26].

### **I.3.1 Origine et Répartition Géographique du Genre *Opuntia***

Le genre *Opuntia*, dont fait partie le figuier de Barbarie, est originaire du Mexique [27]. Il a été introduit en Espagne depuis le Mexique, puis s'est propagé en Afrique du Nord et du Sud au 16<sup>ème</sup> siècle [28].

Sa diffusion fut rapide dans le bassin méditerranéen, où il s'est si bien naturalisé qu'il est désormais un élément caractéristique du paysage [29]. On le trouve principalement

dans la partie Ouest de la Méditerranée, notamment dans le sud de l'Espagne, au Portugal, et en Afrique du Nord (Tunisie, Algérie et Maroc) [30].

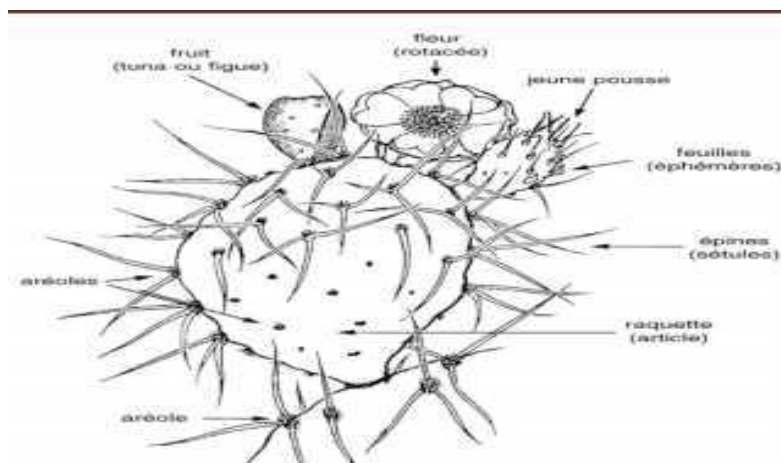


**Figure I.3:** Distribution géographique du figuier de barbarie [27].

La figure I.3 met en évidence l'aire d'origine du figuier de Barbarie, le Mexique (représentée en vert), ainsi que ses nouvelles zones de distribution (en noir). Ces dernières incluent le Brésil, le Chili, les États-Unis, l'Inde, l'Italie, l'Espagne, l'Érythrée, le Portugal, l'Algérie, la Tunisie, le Maroc, l'Afrique du Sud, l'Éthiopie, le Soudan, la Tanzanie et l'Ouganda [27].

### I.3.2 Description botanique

L'*Opuntia ficus-indica* est un cactus de type reproducteur. C'est une plante arbustive à arborescente, atteignant jusqu'à 1,7 m de hauteur, avec une tige primaire lignifiée cylindrique d'environ 45 cm de long et 20 cm de diamètre. Ses articles, appelés cladodes ou raquettes, sont généralement elliptiques, mais peuvent également être ovales, circulaires, oblongs ou rhombiques, et varient en couleur du vert pâle au vert foncé. Leur surface lisse et glabre, de couleur vert glauque à bleutée, est parsemée d'aréoles, des coussinets portant des épines acérées (aiguillons) entourées de petites épines fines et barbelées, appelées glochides, qui jouent un rôle dans la rétention d'humidité. Les fleurs du figuier de Barbarie, comme toutes les fleurs des cactées, sont éphémères.



**Figure I.3.** Schéma illustrant les différentes parties du figuier de Barbarie [31].

En Algérie, les plantations de figuier de Barbarie s'étendent des hauts plateaux (notamment à Batna, Biskra, Bordj-bou-Argeridj et Constantine, avec des altitudes variant de 550 mètres dans les hauts plateaux Algérois à environ 750 mètres à M'sila et Laghouat, atteignant même 1100 mètres à Ain-Sefra) jusqu'au centre et à l'ouest du pays, où l'*Opuntia* couvre une superficie de plus de 25 000 hectares, incluant les hauteurs de Chréa et Bouarfa (wilaya de Blida), ainsi que les wilayas de Boumerdès, Tipaza, Tissemsilt, Chlef, Relizane, Mostaganem, Ain-Temouchent et Oran [32].

### **I.3.3 Classification et composition**

La famille des Cactaceae comprend environ plusieurs espèces. La tribu des Opuntiaceae comprend le genre *Opuntia*, subdivisé à son tour en quatre sous-genres : *Platyopuntia*, *Cylindropuntia*, *Tephrocactus* et *Brasiliopuntia*. Le sous-genre *Platyopuntia* comprend 150 à 300 espèces, parmi lesquelles figure *Opuntia ficus-indica*. Cette espèce est la cactée qui a la plus grande importance agronomique, tant pour les fruits comestibles que pour les raquettes qui peuvent être utilisées comme fourrage ou comme légumes [33]. La position systématique du figuier de barbarie est la suivante [33].

- Règne : Plantae
- Sous règne : Tracheobionta
- Embranchement : Phanérogames
- Sous Embranchement : Magnoliophyta

- Classe : Magnoliopsida
- Sous classe : Caryophyllidae
- Ordre : Opuntiales
- Famille : Cactaceae
- Sous-famille : Opuntioideae
- Tribu : Opuntieae
- Genre : Opuntia
- Sous-genre : Platyopuntia

**Tableau 3.** Composition du figuier de barbarie *Opuntia ficus-indica* (Anonyme, 1993) [29].

Constituants	Fruit (%)	Pulpe et graine (%)	Pulpe sans graine (%)
Eau	80,0	84,5	83,6
Protéine	1,0	1,3	0,8
Lipides totaux	0,7	1,3	0,3
Glucides disponibles	14,8	8,0	10,8
Fibres brutes	2,3	4,4	3,6

### I.3.4 Domaine d'utilisation

L'*Opuntia ficus-indica*, grâce à sa grande capacité d'adaptation aux environnements arides et semi-arides, est largement cultivée dans ces régions pour diverses applications. [34].

Sur le plan alimentaire, ses fruits sont appréciés pour leur richesse en vitamines et en minéraux essentiels ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) et en fibres (lignine, cellulose, hémicelluloses, pectine), qui, avec les acides aminés, aident à détoxifier l'organisme (élimination de l'ammoniac et des radicaux libres). Ses cladodes constituent également une source précieuse de fibres alimentaires et sont consommées comme légumes ou utilisées comme fourrage [34].

Par ailleurs, l'*Opuntia ficus-indica* trouve des applications médicinales (traitement de la diarrhée, de l'hyperlipidémie, propriétés anti-inflammatoires) et entre dans la composition de produits cosmétiques [34].

L'*Opuntia ficus-indica* est largement exploitée dans le domaine du traitement des eaux en raison de ses capacités d'adsorption et de ses propriétés coagulantes et floculantes.

Il a notamment été démontré que la poudre de cladodes de l'OFI, utilisée sans aucun prétraitement, constitue un biofloculant économique et efficace pour l'élimination de divers colorants présents dans les solutions aqueuses, tels que le Bleu de Méthylène (BM), le Noir d'ériochrome T et l'alizarine [35].

L'application de poudre de cactus pour la biosorption des eaux usées de tanneries a démontré une réduction significative d'une large gamme de polluants. En plus d'une diminution considérable des concentrations de fer (Fe) et de chrome (Cr) proportionnelle à la dose de cactus, l'étude a également révélé des améliorations notables pour le pH, la turbidité, les sulfates, les chlorites, les nitrates, la demande biochimique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO). Ces résultats soulignent l'efficacité globale de la poudre de cactus dans le traitement des effluents de tanneries [36].

Des recherches ont démontré l'efficacité du mucilage de cactus en tant que floculant naturel pour le traitement de l'eau. Son utilisation a permis l'élimination de bactéries comme *Bacillus cereus*. Les analyses microbiologiques d'eau contaminée par *Bacillus cereus* ont révélé une bonne efficacité de ce mucilage. Son pouvoir floculant est comparable à celui d'un floculant industriel, offrant ainsi une alternative économique et moins toxique pour la dé-pollution des eaux usées [37].

### **I.3.5 Importances Agroéconomiques du Figuier de Barbarie**

L'adaptation remarquable du figuier de Barbarie aux environnements désertiques et semi-désertiques lui confère un rôle crucial, tant sur le plan écologique que socio-économique.

Sur le plan écologique, il agit comme un véritable bouclier contre la désertification et l'érosion des sols. Sa capacité à pousser dans des conditions difficiles en fait un allié précieux pour la régénération des terres.



En outre, le figuier de Barbarie présente un avantage économique considérable : il ne requiert aucune pratique culturale spécialisée ni d'apport de fertilisants. Cela en fait une culture peu exigeante et particulièrement adaptée aux régions arides [38].

Grâce à son impact significatif sur le revenu des agriculteurs, cette plante s'est imposée comme l'une des espèces les plus rentables économiquement [39].

### **I.3.6 Utilisation Médicinale**

En Australie et en Afrique du Sud, les "nopalitos" (jeunes cladodes de figuier de Barbarie) sont employés pour leur effet hypoglycémiant dans le traitement du diabète non insulino-dépendant. Par ailleurs, le mucilage extrait des raquettes (cladodes) contribue à réduire le cholestérol total sanguin.

Les cochenilles (*Dactylopius coccus* costa ou *Dactylopius opuntiae* cockerell), qui prolifèrent sur les raquettes de l'*Opuntia ficus-indica*, sont utilisées pour produire le colorant E-120. Ce colorant est très prisé dans les industries alimentaires, cosmétique et médicinale. Récemment, au Mexique et en Afrique du Sud, des producteurs ont mis en place des systèmes de production intensifs en micro-tunnels pour cultiver ces cochenilles [40].

### **I.3.7 Utilisation Industrielle**

Actuellement, la plante de cactus est utilisée à des fins industrielles aux États-Unis et au Mexique. Elle sert de matière collante et anti-rouille dans les puits pétroliers. De plus, elle est employée comme enduit pour éliminer le sel des installations pétrolières offshore, le sel étant un facteur favorisant la rouille.

Une étude a démontré que le jus de la plante de cactus agit comme un agent préventif contre l'usure, l'oxydation et la rouille du fer.

Au Chili, les raquettes de cactus, une fois fermentées naturellement, sont utilisées comme matière première essentielle pour la production de biogaz, une source d'énergie vitale. Ces raquettes sont très productives et offrent un rendement élevé. Leurs applications sont diverses : la substance gélatineuse qu'elles contiennent est un composant clé dans la fabrication du chewing-gum et de la cire. De plus, elles sont employées pour renforcer le tissage des vêtements en coton [41]



## Références bibliographiques

### Chapitre 1

1. Spreer, E. (2018). Milk and Dairy Product Technology (1re éd.). New York : Routledge. Chapitre 12 : Water Supply and Wastewater Treatment in a Dairy.
2. Meinof et al., 1977). <https://www.clicours.com/traitement-des-eaux-residuelles-de-laiterie/> Boeglin, 2007)
3. SNAPPE Jean-Jacques, LEPOUDERE Anne, SREDZINSKI Natacha « Protéines Laitières » (F4820, 2010)
4. Tableau réf. Isrm jpv-lnerv/fevr 1999 universite de nouakchott (r.1.m) institut...le lait et les produits laitiers developpement de systemes de production intensive en afrique de l'ouest par m. Konte
5. Burgaud, 1969). Jean Burgaud Thèmes potentiels : Industrie laitière, traitement des eaux usées laitières, risques industriels, sécurité dans l'industrie laitière.
6. MOLETTE René, TORRIJOS Michel « Impact environnemental de la filière laitière » (F1500, 1999).
7. S. Castillo de Campins, Etude d'un procédé compact de traitement biologique anaérobie d'effluents laitiers, thèse de doctorat à Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Laboratoire de Biotechnologie-Bioprocédés UMR-CNRS, 2005
8. H. Nadji, Traitement biologique de l'effluent laitier, Mémoire de Master 2, Université Libanaise, Ecole Doctorale des Sciences et de Technologie, 2011
9. D.G. Dalgleish, Food emulsions, their structures and structure-forming properties, Food Hydrocolloids 20, p.p. 415–422, 2006.
10. ELHANAFI 2010; Etude paramétrique et optimisation du traitement d'émulsions de lait par le procédé d'électrocoagulation, Mémoire de magister

11. MEMOIRE DE MAGISTER Radhia MEDJDOUB LES EFFLUENTS DE L'INDUSTRIE LAITIERE : TRAITEMENT ET VALORISATION DES SOUS-PRODUITS 2015).
12. Fu, F., Wang, Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J. Environ. Manage.*, 92, 407-418  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
13. Béchac et al. J.C Béchac, P. Boutin, P. Nuer, *Traitement des eaux usées*, Édition Eyrolles, Paris, 1984
14. AYAT Asma, *BIOMATERIAUX ET LEURS APPLICATIONS COMME COAGULANTS/FLOCULANTS DANS LE TRAITEMENT DES EAUX USEES*, these de doctorat, 2021/2022
15. Miller, S.M., Fugate, E.J., Craver, V.O., Smith, J.A., Zimmerman, J.B., 2008. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environ. Sci. Technol.* 42, 4274-4279.
16. Renault, F., Sancey, B., Badot, P., Crini, G., 2009. Chitosan for coagulation/floculation. processes-an ecofriendly approach. *Eur. Polym. J.* 45, 1337-1348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027>.
17. ASNAM Amira, utilisation d'un biofloculant (gel de cactus) dans la clarification des eaux, memoire de master, 2015/2016
18. S. Maurya, A. Daverey, Evaluation of plant-based natural coagulants for municipal wastewater treatment, *3 Biotech.* 8 (2018) 77.  
<https://doi.org/10.1007/s13205-018-11038>.
19. M. Swati, V.S. Govindan, Coagulation studies on natural seed extracts., *J. Indian Water Work. Assoc.* (2005) 145-151.
20. Allorge et Matile, 2011 ; Allorge L. & Matile L. (2011) *Plantes tropicales : botanique, écologie, utilisations*. Paris : IRD Éditions, 288 p.
21. Larousse (2007). *Le Petit Larousse illustré*. Paris : Éditions Larousse, p. 1811.  
[Entrée : *Oponce / Opuntia* - Étymologie et description du genre de cactus.] *Le petit Larousse illustré*. Larousse. 2007. p.1811

22. Shweizer. M «Docteur NOPAL le médecin du Bon Dieu», APB, ed.3em trimestre, France, 1997, p.81
23. Orwa et al., 2009).*Orwa, et al. (2009). Étude sur l'utilisation du figuier de Barbarie (Opuntia ficus-indica) pour la réhabilitation des sols agricoles dans la région de Milpa-Alta, Mexique*
24. Barbera et al., 1992 ; Nerd & Mizrahi, 1994 ; Felker et al., 2005 ; Kabas et al., 2006 ; Saleem et al., 2006 ; Snyman, 2006).
25. **Le Houérou, H. N. (1996).**  
*The role of cacti (Opuntia spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. Journal of Arid Environments, 33(2), 135-159*
26. Araba M., El Aich A., Sarti B., Belbahri LL., Boubkraoui A., Ait Hammou A., Zemmouri A. Et Sbaa H., 2000. Valorisation du figuier de barbarie en élevage. Bull. Mens. Inf. Et de liaison du PNTTA.
27. **Bensalem, Z., Maamri, K., & Bouzid, S. (2002).**  
*L'Opuntia ficus-indica en Algérie : Situation actuelle et perspectives de développement. Actes du Séminaire International sur la Filière Figuier de Barbarie, FAO-ICARDA, Meknès, Maroc, 22-23 mai 2002, pp. 79-84.*
28. Revue nature et santé, 2011).
29. Piédallu A. Le figuier de barbarie sans épines (Opuntia ficus-indica Miller var. Inermes (-j Weber) en Algérie, 1990, 128-145 pp.
30. : **Halmi, S. (2015). Contribution à l'étude de la valorisation de la figue de Barbarie (Opuntia ficus-indica L.) en tant que source de biomolécules à intérêts thérapeutiques. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 186 p.**
31. Miller, S.M., Fugate, E.J., Craver, V.O., Smith, J.A., Zimmerman, J.B. Toward understanding the efficacy and mechanism of Opuntia spp. as a

- natural coagulant for potential application in water treatment. Environ. Sci. Technol. 42, (2008)4274-4279.
32. N.Barka.Ouzaouit,M.Abdennouri,M.E.Makhfouk. Dried prickly pear cactus(*Optunia ficus indica*) cladodes as a low-cost and eco-friendly biosorbant for dyes removal from aqueous solutions.Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers 44 (2013),52-60.
  33. M.Swathi.S.A.Sathya,S.Aravind,S.P.K.Ashi,R.Gobinath,D.D.Saranya.Experimental studies on tannery wastewater using Cactus powder as an adsorbant.Int J Appl Sci Eng Res 3(2014 );436-46
  34. **.Reguieg Yssaad A., Bessam A., & Hassiba (2012). *Valorisation par voie biotechnologique de l'espèce Opuntia ficus-indica* (Mémoire de Magister, Biologie). Université Djillali Liabès – Sidi Bel Abbès, Algérie.**
  35. Saenz C. Processing technologies: An alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes, J. of Arid Envir., 2000, 46: 209-225.
  36. Habibi Y. Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de Barbarie, les polysaccharides pariétaux : caractérisation et modifications chimiques. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier. Grenoble I, et Université Cadi Ayyad. Marrakech, 2004, 264 pp.
  37. Pimienta, 1993). Pimienta-Barrios E., (1993). Ciencia, 1993, 44(3), 339-350.
  38. Stintzing, 2001). Stintzing F.C., Schieber A., Carle R., (2001). Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. Eur. Food Res. Technol. 212, 396-407.