



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



**Université Constantine 1 Frères Mentouri**  
**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**

**جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتورى**  
**كلية علوم الطبيعة والحياة**

**Département :** Biologie Végétale

**قسم :** بiology النبات

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master**

**Domaine :** Sciences de la Nature et de la Vie

**Filière :** Biotechnologies

**Spécialité :** Biotechnologie et Génomique Végétale

**N° d'ordre :**

**N° de série :**

**Intitulé :**

---

**Optimisation de la concentration de la poudre de *Moringa oleifera* Lam. pour une meilleure efficacité de coagulation dans le traitement des eaux**

---

**Présenté par :** GOUMRI Hadil

**Le :** 24/06/2024

HIMEUR Khadidja

**Jury d'évaluation :**

**Président :** BAZIZ Karim. (MCA - U Mostepha Ben Boulaid, Batna 2).

**Encadrant :** KACEM Nadia Sandra (MCA - U Constantine 1 Frères Mentouri).

**Examinateur(s) :** HAMMOUDA Dounia (Pr - U Constantine 1 Frères Mentouri).

**Année universitaire  
2024 - 2025**

## ***Remerciement***

*Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir guidée toutes ces années d'études et de m'avoir donnée la santé, la volonté, la patience afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.*

*C'est avec sincérité que j'exprime ma gratitude et mon profond respect à notre encadrante Dr. KACEM Nadia Sandra pour avoir proposé ce thème et pour m'avoir formée tout au long de ce travail. Je lui dis merci encore pour sa disponibilité totale, ses conseils, sa confiance, sa gentillesse et sa modestie à mon égard.*

*Je remercie les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail Mr.BAZIZ Karim et Mm.HAMMOUDA Donia c'est un grand honneur pour moi que vous ayez accepté de juger notre travail.*

*Merci à tous les professeurs qui m'ont enseigné durant mon cursus universitaire, en particulier Mme. HAMMOUDA D, Mme. BOUSBAÄ R, Mr.BENBELKACEM A, Mme. BOUCHMEL K, Mr. Kello k.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement à Mme. ZEMMOUCHE Meriem pour son accompagnement lors de la partie pratique de ce travail, ainsi que l'ingénierie du laboratoire Mm.Chahra, pour son aide technique.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à tout le personnel de la station d'Iben Ziad et du laboratoire de faculté des geneti procédés à université 3 pour leur immense contribution dans la réalisation de ce travail.*

## **Dédicaces**

*Honneur et grand plaisir de dédie ce Modest travail:*

*Ames très chers parents « mebarek et fairouz» pour m'avoir donné les moyens de réussir, je ne cesserai de les remercier pour leur soutien infaillible face à tous les surmontés depuis le début de mes études. Que dieu tout puissant vous garde pour mois et vous procure santé, bonheur et longue de vie.*

*A mon seul et unique frère « soheyb », qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'encourager, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, santé et réussite.*

*A mes « adorables sœurs », je vous souhaite un avenir plein de joie, de réussite et de sérénité .je vous exprimer à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

*A ma copine, « Khadidja» un remerciement particulier et sincère pour vos efforts fournis, c'était un grand plaisir de partager ce travail avec toi, je te souhaite une vie plein de succès et de bonheur.*

*A toute ma famille et mes amis.*

*A tous ceux dont l'oubli de la plume n'est pas celui du cœur.*

**Hadil**

## Dédicaces

À mon père bien-aimé *Boukhemis* et à ma mère chère et dévouée *Lamouri Fatima*, je vous exprime toute ma gratitude pour votre amour infini, vos prières constantes et vos sacrifices sans fin. Vous êtes la source de ma force et de ma persévérance. Ce travail n'est qu'un modeste témoignage de tout ce que vous avez fait pour moi, et je vous le dédie avec tout mon cœur.

À ma sœur bien-aimée et amie fidèle *Lamouri Amira*, Merci pour ton soutien inébranlable, pour ta présence constante dans ma vie, et pour l'amour et la sagesse que tu m'apportes chaque jour. Ton rôle dans mon parcours est inestimable, et je suis fière d'avoir une sœur comme toi. À mes frères et sœurs bien-aimés *Mohammed, Meriam, Oumima et Idriss*, Vous êtes ma force, mon inspiration, et ma fierté. Vous avez toujours été là pour me soutenir, m'encourager et me rappeler l'importance de la famille et de l'amour fraternel. Votre présence dans ma vie est un véritable trésor, et ce succès vous appartient autant qu'à moi.

À ma collègue et partenaire précieuse *Goumri Hadil*, tu as été bien plus qu'une simple collègue, tu as été une véritable complice dans cette aventure. Merci pour ta collaboration exceptionnelle, ton esprit d'équipe, et ton soutien constant. Ton amitié et ta solidarité ont été un véritable moteur pour moi, et ensemble, nous avons surmonté toutes les difficultés. Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude et tout mon amour. Chaque page écrite, chaque étape franchie, je l'ai fait en pensant à vous, à vos encouragements et à votre amour.

*Khadidja*

## **Optimisation de la concentration de la poudre de *Moringa oleifera* pour une meilleure efficacité de coagulation dans le traitement des eaux.**

### **Résumé :**

Le *Moringa oleifera*, couramment surnommé arbre miracle ou arbre aux mille vertus, est une plante reconnue pour ses multiples propriétés, en particulier pour son potentiel dans le traitement de l'eau.

Une étude a été menée sur des eaux usées provenant de la station d'épuration STEP Iben Ziad de Constantine, en comparant les caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes à l'entrée de la station et des eaux traitées à la sortie. Les analyses ont révélé que les eaux brutes sont fortement polluées, et bien que le traitement conventionnel permette une réduction partielle de la turbidité, les valeurs restent supérieures aux normes algériennes ce qui rend ces eaux improches à l'irrigation. L'ajout de la poudre de *Moringa oleifera* a permis une amélioration significative de la qualité de l'eau. La dose optimale de coagulant a été déterminée à 1 g/L dans l'eau brute avec un taux d'abattement 95%, tandis que pour l'eau de sortie, la dose optimale 0.5g/l avec un taux d'abattement 75%. La turbidité diminue fortement en 30 min, puis plus lentement jusqu'à 180 min. Par ailleurs, aucun changement notable n'a été observé concernant le pH. En revanche, une différence hautement significative a été observée dans la conductivité de l'eau de sortie après l'ajout de *Moringa oleifera*, ce qui suggère une modification de la composition ionique résiduelle. Les résultats obtenus avec le traitement au *Moringa oleifera* sont très prometteurs. Une turbidité finale de 5,00 NTU, correspondant au seuil réglementaire, témoigne de l'efficacité du procédé et confirme le fort potentiel de cette plante dans l'amélioration de la qualité de l'eau.

**Mots clés :** *Moringa oleifera*, eaux usées, station d'épuration, eau brute, eau traitée, paramètre physico – chimique, coagulation flocculation.

## **Optimization of *Moringa oleifera* seed powder concentration for Enhanced coagulation efficiency in water treatment.**

### **Summary:**

*Moringa oleifera*, commonly known as the miracle tree or tree of a thousand virtues, is a plant widely recognized for its multiple properties, particularly its potential in water treatment.

A study was conducted on wastewater from the Iben Ziad wastewater treatment plant (STEP Iben Ziad) in Constantine, comparing the physico-chemical characteristics of raw water at the plant's inlet and treated water at the outlet. The analyses revealed that the raw water was heavily polluted, and although conventional treatment achieved a partial reduction in turbidity, the levels remained above Algerian standards, making this water unsuitable for irrigation.

The addition of *Moringa oleifera* powder led to a significant improvement in water quality. The optimal coagulant dose was determined to be 1 g/L for raw water, with a turbidity removal rate of 95%, and 0.5 g/L for treated water, achieving a 75% reduction. Turbidity decreases sharply within 30 minutes, then more slowly up to 180 minutes.

Moreover, no notable change was observed in pH. However, a highly significant difference in conductivity was observed in the treated water after the addition of *Moringa oleifera*, suggesting a change in the residual ionic composition.

The results obtained with *Moringa oleifera* treatment are very promising. A final turbidity of 5.00 NTU, which meets the regulatory threshold, demonstrates the effectiveness of the process and confirms the strong potential of this plant in improving water quality.

**Keywords:** *Moringa oleifera*, wastewater, wastewater treatment plant, raw water, treated water, physicochemical parameters, coagulation-flocculation.

## تحسين تركيز مسحوق المورينجا أوليفيرا من أجل كفاءة أفضل في عملية التخثير في معالجة المياه.

### ملخص:

لمورينغا أوليفيرا، المعروفة باسم الشجرة المعجزة أو شجرة الألف فائدة، هي نبتة مشهورة بخصائصها المتعددة، لا سيما قدرتها المحتملة في معالجة المياه.

تم إجراء دراسة على مياه الصرف الصحي القادمة من محطة التصفية "ابن زياد" بولاية قسنطينة، حيث تمت مقارنة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الخام عند مدخل المحطة والمياه المعالجة عند مخرجها.

وقد كشفت التحاليل أن المياه الخام ملوثة بدرجة كبيرة، وعلى الرغم من أن المعالجة التقليدية تسمح بتقليل جزئي للعكار، إلا أن القيم المسجلة ظلت أعلى من المعايير الجزائرية، مما يجعل هذه المياه غير صالحة للري.

أدى إضافة مسحوق المورينغا أوليفيرا إلى تحسن ملحوظ في جودة المياه، حيث تم تحديد الجرعة المثلثى من المختبر بـ 1 غ/ل في المياه الخام بنسبة إزالة بلغت 95%， بينما بلغت الجرعة المثلثى للمياه المعالجة 0.5 غ/ل مع نسبة إزالة وصلت إلى 75%. وقد انخفضت العكارية بشكل كبير خلال 30 دقيقة، ثم تنخفض بشكل أبطأ حتى 180 دقيقة.

من جهة أخرى، لم يلاحظ أي تغير مهم في درجة الحموضة . بالمقابل، تم تسجيل فرق معنوي كبير في التوصيلية الكهربائية للمياه المعالجة بعد إضافة المورينغا، ما يشير إلى تغيير في التركيب الأيوني المتبقى.

تُعد النتائج المحققة بواسطة معالجة المورينغا أوليفيرا واعدة جداً. حيث تم الوصول إلى عكارية نهاية قدرها 5.00 NTU، وهي القيمة المطابقة للحد التنظيمي، مما يبرز فعالية هذه الطريقة ويفيد الإمكانات الكبيرة لهذه النبتة في تحسين جودة المياه.

**الكلمات المفتاحية:** المورينجا أوليفيرا، المياه المستعملة، محطة التطهير ، المياه الخام، المياه المعالجة، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، التخثير والتلبد.

## Liste des abréviations

<b>A.N.P.E.</b>	Agence Nationale de la Protection de l'Environnement
<b>ANOVA</b>	Analyse de variance
<b>BEA</b>	Milieu de Confirmation BEA (Bio-essais d'Identification et d'Analyse
<b>CDV</b>	Conductivité
<b>CE</b>	Conductivité Électrique
<b>CM</b>	Concentration de <i>Moringa oleifera</i>
<b>DPPH</b>	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
<b>EB</b>	Eau Brute
<b>EBM</b>	Eau Brute traitée avec le <i>Moringa oleifera</i>
<b>Ec</b>	Ecart type
<b>EE</b>	Eau de Sortie
<b>EEM</b>	Eau de Sortie traitée avec le <i>Moringa oleifera</i>
<b>ESM</b>	Eau de sortie traitée avec le <i>Moringa oleifera</i>
<b>ETM</b>	Éléments Traces Métalliques
<b>MO</b>	<i>Moringa oleifera</i>
<b>M.oleifera</b>	<i>Moringa oleifera</i>
<b>Moy</b>	Moyenne
<b>NTU</b>	Nephelometric Turbidity Units
<b>pH</b>	Potentiel Hydrogène
<b>STEP</b>	Station d'épuration
<b>TD</b>	Temps de décantation
<b>TE</b>	Type d'Eau

## Liste des figures

<b>Figure 01</b> : Répartition géographique de <i>Moringa oleifera</i>	4
<b>Figure 02</b> : Arbre de <i>Moringa oleifera</i>	6
<b>Figure 03</b> : Graines de <i>Moringa oleifera</i>	6
<b>Figure 04</b> : Fleurs de <i>Moringa oleifera</i>	7
<b>Figure 05</b> : Racine de <i>Moringa oleifera</i>	8
<b>Figure 06</b> : Gousses de <i>Moringa oleifera</i>	8
<b>Figure 07</b> : Feuilles de <i>Moringa oleifera</i>	9
<b>Figure 08</b> : Branche de <i>Moringa oleifera</i>	9
<b>Figure 09</b> : Écorce de <i>Moringa oleifera</i>	10
<b>Figure 10</b> : Récolte des feuilles	12
<b>Figure 11</b> : Graines de <i>Moringa oleifera</i>	30
<b>Figure 12</b> : Matériels utilisés au laboratoire	32
<b>Figure 13</b> : Schéma représentatif des principales étapes de préparation de la poudre de <i>Moringa oleifera</i> .	33
<b>Figure 14</b> : Eau brute provenant de la station d'épuration Ibn Ziad avant ajout de la poudre de <i>Moringa oleifera</i>	38
<b>Figure 15</b> : Eau de sortie provenant de la station d'épuration Ibn Ziad avant ajout de la poudre de <i>Moringa oleifera</i>	39
<b>Figure 16</b> : Aspect de l'eau de sortie après coagulation et floculation après ajout de la poudre de <i>Moringa oleifera</i>	40
<b>Figure 17</b> : Aspect de l'eau de sortie après coagulation et floculation après ajout de la poudre de <i>Moringa oleifera</i> .	40
<b>Figure 18</b> : Effet de la poudre des graines de <i>Moringa oleifera</i> sur la turbidité en fonction de temps de décantation pour l'eau brute.	49
<b>Figure 19</b> : Effet de la poudre des graines de <i>Moringa oleifera</i> sur la turbidité en fonction de temps de décantation pour l'eau de sortie.	50

## Liste des tableaux

<b>Tableau 01</b> : Classification taxonomique de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	4
<b>Tableau 02</b> : Les différentes espèces de <i>Moringa</i> et l'origine de chaque espèce.	5
<b>Tableau 03</b> : Limites écologiques de <i>Moringa oleifera</i> .	11
<b>Tableau 04</b> : Valeur nutritionnelle de <i>Moringa oleifera</i> . Les gousses et les feuilles fraîches.	13
<b>Tableau 05</b> : Composition en acides aminés dans les graines de <i>Moringa oleifera</i> .	14
<b>Tableau 06</b> : Valeur nutritionnelle moyenne de 100 grammes de feuilles de <i>Moringa oleifera</i> fraîches .	17
<b>Tableau 07</b> : Quelques utilisations médicinales courantes de différentes parties du <i>Moringa oleifera</i> .	18
<b>Tableau 08</b> : Résultats des paramètres physico-chimiques de l'eau brute et de l'eau de sortie avant l'ajout de la poudre de <i>Moringa oleifera</i> .	37
<b>Tableau 09</b> : Influence des concentrations de <i>Moringa oleifera</i> sur le pH de l'eau brute en fonction des durées de décantation .	41
<b>Tableau 10</b> : Influence des concentrations de <i>Moringa oleifera</i> sur le pH de l'eau de sortie en fonction des durées de décantation .	42
<b>Tableau 11</b> : Conductivité électrique de l'eau brute en fonction du temps de décantation et de la concentration de poudre de <i>Moringa oleifera</i> .	43
<b>Tableau 12</b> : Conductivité électrique de l'eau de sortie en fonction du temps de décantation et de la concentration de poudre de <i>Moringa oleifera</i> .	44
<b>Tableau 13</b> : Effet de différentes concentrations de <i>Moringa oleifera</i> sur la turbidité de l'eau brute en fonction des durées de décantation.	45
<b>Tableau 14</b> : Effet de différentes concentrations de <i>Moringa oleifera</i> sur la turbidité de l'eau de sortie en fonction des durées de décantation.	46
<b>Tableau 15</b> : Résultats de l'analyse de variance au seuil 5%, par le test Tukey, de la turbidité en fonction du temps de décantation après ajout de la poudre de <i>Moringa oleifera</i> .	48
<b>Tableau 16</b> : Corrélations de Pearson entre conductivité, turbidité , pH, concentration de <i>Moringa</i> , temps de décantation et type d'eau.	51

## *Table des matières*

# Table des matières

---

## Résumé

## Liste des abréviations

## Liste des figures

## Liste de tableaux

## Introduction

1

## Chapitre I Revue bibliographique

I. Généralités sur le <i>Moringa oleifera</i>	3
I.1 Historique et répartition géographique	3
I.2 Classification taxonomique et origine de <i>Moringa oleifera</i>	4
I.3 Morphologie	5
I.3.1 L'Arbre	5
I.3.2 La graine	6
I.3.3 Les fleurs	7
I.3.4 Les racines	7
I.3.5 Le Fruit	8
I.3.6 Les feuilles	8
I.3.7 Les branches	9
I.3.8 Écorce et bois	9
I.4 Écologie et conditions climatique de <i>Moringa oleifera</i>	10
I.5 Culture et récolte	11
I.5.1 Culture de <i>Moringa oleifera</i>	11
I.5.2 Récolte de <i>Moringa oleifera</i>	11
II. Potentiel biochimique et applicatif de <i>Moringa oleifera</i>	12
II.1 Composition chimique et valeur nutritionnelle	12
II.1.1 Composition chimique des graines de <i>Moringa oleifera</i>	13
II.1.2 Composition chimique des feuilles	15
II.2 Usages de <i>Moringa oleifera</i>	17
II.2.1 Usages médicinaux	17
II.2.2 Consommation humaine	20
II.2.3 Alimentation animale	21
II.2.4 Usages industriels	21
II.2.5 Accélération de croissance végétale	22
II.2.6 Traitement de l'eau	22
III. les eaux usées	22
III.1 Pollution de l'eau	22
III.2 Sources des eaux usées	23
III.2.1 Les eaux usées domestiques	23
III.2.2 Les eaux usées industrielle	23
III.2.3 Les eaux usées agricole	24

# **Table des matières**

---

III.3 Risque environnementaux et incidence sur la santé humaine	24
III.3.1 Les risques environnementaux	24
III.3.2 Incidence sur la santé humaine	24
III.4 Principales techniques de traitement des eaux usées	25
III.4.1 Procédé d'épuration physique	25
III.4.2 Procédé d'épuration chimique	26
III.4.3 Procédé d'épuration physico-chimique	26
III.4.4 Procédé d'épuration biologique	26
III.4.4.1 Traitement biologique intensif	26
III.4.4.2 Traitement biologique extensif	27
III.5 Traitement des eaux usées par les graines de <i>Moringa oleifera</i>	27
III.5.1 <i>Moringa oleifera</i> comme agent coagulant-floculant	27
III.5.2 <i>Moringa oleifera</i> comme agent adsorbant	28
III.5.3 <i>Moringa oleifera</i> comme agent désinfectant	28

## **Chapitre II Matériels et méthodes**

1. Matériels	30
1.1. Matériel végétal	30
1.2. Les eaux usées	30
1.3. Présentation de la station d'épuration d'Ibn Ziad	30
2. Méthodes	31
2.1. Étude de la biocoagulation	31
2.1.1. Protocol experimental	31
2.1.2. Préparation du coagulant	33
2.2. Le Jar Test	34
2.2.1. Principe du Jar Test	34
2.2.2. Description de l'appareil Jar Test	34
2.2.3. Les étapes principales du Jar Test	34
2.3. Analyses physico-chimiques	35
2.4. Analyse statistique	36

## **Chapitre III Résultats et discussion**

1. Paramètres physico chimiques	37
1.1. Caractérisations initiales des eaux	37
1.1.1. Potentiel hydrogène (pH)	37
1.1.2. Conductivité électrique	37
1.1.3. Turbidité	38
2. Évaluation de l'efficacité du traitement par <i>Moringa oleifera</i> sur les paramètres physicochimiques	39
2.1. Potentiel hydrogène (pH)	41
2.2. Conductivité électrique	43
2.3. La turbidité	45
3. Corrélations entre tous les paramètres mesurés	51
<b>Conclusion</b>	<b>52</b>

## *Table des matières*

---

Références bibliographiques	54
Annexes	67

# *Introduction*

### **Introduction**

À l'échelle mondiale, et notamment dans les pays du bassin méditerranéen, les ressources en eau subissent une pression croissante. Cette situation résulte d'une demande accrue, de la variabilité climatique et de la pollution liée aux activités domestiques, industrielles et agricoles (**Mancini et al., 2005 ; Roccaro et al., 2005**). En Algérie, les eaux usées rejetées sans traitement adéquat représentent une menace environnementale majeure, notamment par leur charge élevée en polluants organiques, inorganiques et microbiens (**Dégrémont, 2005 ; Metcalf and Eddy et al., 2007**).

La réutilisation des eaux usées traitées est envisagée comme une stratégie clé pour atténuer la pression sur les ressources hydriques. Or, les données indiquent que moins de 5 % de ces eaux sont actuellement réutilisées à l'échelle mondiale, malgré une croissance notable aux États-Unis et en Europe, estimée à environ 25 % par an (**Global Water Intelligence, 2005 ; Moussaoui et Benhabib, 2015**). L'agriculture étant le secteur le plus consommateur d'eau, de nombreux agriculteurs se tournent vers l'irrigation avec des eaux usées, notamment face à la diminution des précipitations (**Hannachi et al., 2016**).

Face à cette réalité, il est impératif d'adopter des technologies de traitement de l'eau efficaces, conformes aux normes sanitaires, environnementales et économiques. Parmi celles-ci, les procédés de coagulation et de floculation se présentent comme des options fondamentales en raison de leur efficacité, de leur simplicité et de leur faible coût (**Sun et al., 2019**). Toutefois, le recours massif aux coagulants chimiques soulève des préoccupations sanitaires et environnementales, notamment à cause de la production de grandes quantités de boues et de la présence potentielle de résidus chimiques dans l'eau traitée (**Baptista et al., 2015 ; Rosman et al., 2018**).

En effet, plusieurs techniques de traitement telles que l'adsorption, l'oxydation, l'échange ionique ou l'osmose inverse (**Driscoll et al., 2008**), celles-ci restent limitées par leur coût ou leur impact environnemental. Ainsi, l'intérêt se renforce pour les coagulants naturels biologiques, en particulier pour atténuer les effets toxiques des polluants tels que les matières en suspension, les contaminants organiques et inorganiques, ainsi que les colorants industriels (**Nguyen et al., 2018 ; Pavithra et al., 2019**).

## **Introduction**

---

Les alternatives naturelles d'origine végétale attirent de plus en plus l'attention pour leurs propriétés écologiques et leur efficacité acceptable dans la purification de l'eau.

Les graines de *Moringa oleifera* figurent parmi les solutions les plus prometteuses, plusieurs études ayant démontré leur capacité à éliminer la turbidité et à réduire la charge microbienne de l'eau (**Faby et Eleli, 1993 ; Jahn, 1988**). Cette efficacité est attribuée à la présence de protéines cationiques favorisant l'agglomération des particules en suspension et leur sédimentation (**Ueda Yamaguchi et al., 2021**).

Malgré l'intérêt croissant pour les alternatives naturelles dans le traitement des eaux usées, leur efficacité reste conditionnée par plusieurs paramètres, notamment la concentration du produit utilisé, le temps de décantation ainsi que les caractéristiques initiales de l'eau.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'efficacité de la poudre de graines de *Moringa oleifera* dans l'amélioration des paramètres physico-chimiques des eaux usées, de déterminer la concentration optimale permettant une clarification maximale, d'étudier l'effet du temps de décantation sur le rendement du traitement et de proposer une alternative naturelle, sûre et économique adaptée aux contextes à faibles ressources.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

**Le premier chapitre** abordera les caractéristiques générales de la plante, ses propriétés et ses divers domaines d'application principalement dans le traitement des eaux usées

**Le deuxième chapitre** est consacré à la représentation du milieu physique d'étude, ainsi qu'à la méthodologie suivie.

**Le troisième chapitre** concerne la présentation des résultats obtenus et la discussion en terminant par une conclusion faisant le point sur l'ensemble du travail.

*Revue bibliographique*

## **I. Généralités sur le *Moringa oleifera***

### **I.1 Historique et répartition géographique**

*Moringa oleifera* Lam. (Synonyme : *Moringa pterygosperma* Gaertner) appartient à une famille monogénérique d'arbres et d'arbustes, les Moringacées (**Foidl et al., 2001**).

Originaire des régions subhimalayennes du nord-ouest de l'Inde et du Pakistan, *Moringa oleifera* est également indigène dans de nombreux autres pays d'Asie du Sud-Est, d'Afrique, de la péninsule Arabique, des îles des Caraïbes et d'Amérique du Sud. Aujourd'hui, il est largement cultivé en Afrique, en Amérique centrale et du Sud, au Sri Lanka, en Inde, au Mexique, en Malaisie, en Indonésie et aux Philippines (**Ashfaq et al., 2012**). Il a été introduit en Afrique de l'Est au début du 20ème siècle (**Foidl et al., 2001**) (**Figure 01**).

Le *Moringa* est mentionné dans le « **Shushruta Sanhita** », rédigé au début du premier siècle avant J.-C., sous le nom de « **Shigon** ». Il semble que la culture de cet arbre en Inde soit établie depuis plusieurs millénaires (**Louni, 2009**).

Le *Moringa* a été utilisé par diverses civilisations – romaine, grecque, égyptienne et indienne – pendant des milliers d'années, avec des écrits datant de 150 après J.-C. Les preuves historiques révèlent que les anciens rois et reines utilisaient les feuilles et les fruits du *Moringa* dans leur alimentation pour maintenir leur vigilance mentale et la santé de leur peau (**Khawaja et al., 2010**). Il est aujourd'hui largement cultivé et naturalisé dans de nombreuses régions tropicales (**Fahey, 2005**).

Il a également été utilisé dans la médecine traditionnelle, transmise depuis des siècles dans de nombreuses cultures à travers le monde, pour traiter les infections cutanées, l'anémie, l'anxiété, l'asthme, les points noirs, les impuretés sanguines, la bronchite, les rhumes, la congestion thoracique et le choléra (**Khawaja et al., 2010**).



**Figure 01 :** Répartition géographique de *Moringa oleifera* (Perumalsamy et al., 2024).

## I.2 Classification taxonomique et origine de *Moringa oleifera*

La classification systématique de *Moringa oleifera* permet de situer cette espèce au sein du règne végétal en précisant sa position taxonomique depuis le règne jusqu'à l'espèce selon Laleye et al. (2016) est montrée dans le (**Tableau 01**).

**Tableau 01 :** Classification taxonomique de *Moringa oleifera Lam* (Laleye et al., 2016).

Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Capparales
Famille	Moringaceae
Division	Magnoliotype
Genre	<i>Moringa</i>
Espèce	<i>Moringa oleifera</i> Lam

Le *Moringa* appartient à la famille des **Moringacées**, un seul genre avec 13 espèces connues (**Tableau 02**). *Moringa oleifera* Lam. Est l'espèce la plus connue et la plus utilisée (Ashfaq et al., 2012).

**Tableau 02** : Les différentes espèces de *Moringa* et l'origine de chaque espèce (**Outani et al., 2023**)

Espèce	Région d'origine
<i>Moringa arborea</i> Verdc.	Kenya
<i>Moringa Rivae</i> Chiov.	Kenya et Éthiopie
<i>Moringa stenopetala</i> Cufod.	Kenya et Éthiopie
<i>Moringa borziana</i> Mettei.	Kenya et Somalie
<i>Moringa longituba</i> Engl	Kenya et Somalie
<i>Moringa pigmeae</i> Verdc	Somalie
<i>Moringa ruspoliana</i> Engl.	Kenya, Éthiopie et Somalie
<i>Moringa ovalifolia</i> Dinter and A. Berger	Namibie et Angola
<i>Moringa drouhardii</i> Jum.,	Madagascar
<i>Moringa hildebrandtii</i> Engl.	Madagascar
<i>Moringa perigrina</i> Forssk.	Arabie Saoudite, Mer Rouge et Mer Morte
<i>Moringa concanesis</i> Dalzel et A. Gibson	Régions subhimalayennes du sous-continent indien
<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Régions subhimalayennes du sous-Continent indien

### I.3 Morphologie

#### I.3.1 L'Arbre

*Moringa* est un arbre pérenne, à croissance rapide, qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur et dont le tronc généralement droit (20 à 40 cm de diamètre) atteint 1,5 à 2 mètres de haut avant de se ramifier, bien qu'il puisse parfois atteindre les 3 mètres (**Laleye et al., 2016**).



**Figure 02 :** Arbre de *Moringa oleifera* (Louni, 2009).

### I.3.2 La graine

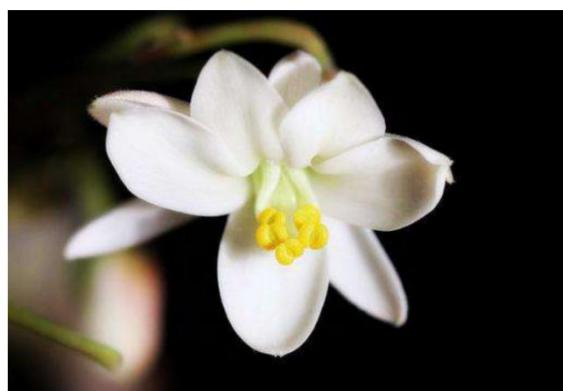
Les graines sont rondes, avec une coque marron semi-perméable. La coque présente trois ailes blanches qui s'étendent de la base au sommet à 120 degrés d'intervalle (Louni, 2009), Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par année (Foidl et al., 2001), Une graine pèse en moyenne 0,3 g et la coque représente 25% du poids de la graine (Laleye et al., 2016).



**Figure 03 :** Graines de *Moringa oleifera* (Louni, 2009).

### I.3.3 Les fleurs

Après de 8 à 12 mois, l'arbre commence à fleurir sur une base continue tout au long de l'année (**Price, 2007**), Les fleurs mesurent 2,5 cm de large et se présentent sous forme de paniculés axillaires et tombantes de 10 à 25 cm. Elles sont généralement abondantes et dégagent une odeur agréable. Elles sont blanches ou de couleur crème, avec des points jaunes à la base. Les sépales, au nombre de cinq, sont symétriques et lancéolés. Les cinq pétales sont minces et spatules, symétriques à l'exception du pétales inférieur, et entourent cinq étamines (**Laleye et al., 2016**)



**Figure 04:** Fleurs de *Moringa oleifera* (**Kaki et Mimouni, 2018**).

### I.3.4 Les racines

Le système racinaire est de structure tubulaire, il est formé d'un pivot central qui peut s'enfoncer dans le sol jusqu'à 1,30 m de profondeur ; ce qui lui vaut sa grande résistance à la sécheresse. Des racines secondaires se ramifient ensuite latéralement à partir de cette dernière jusqu'à constituer une chevelure dense (**Zongo et al., 2013**).



**Figure 05 :** Racine de *Moringa oleifera* (**Kaki et Mimouni, 2018**)

### I.3.5 Le fruit

Les fruits forment des gousses à trois lobes, mesurant 20 à 60 cm de long, qui pendent des branches. Lorsqu'ils sont secs, ils s'ouvrent en trois parties. Chaque gousse contient entre 12 et 35 graines (**Foidl et al., 2001**). Du point de vue botanique, on les appelle des « siliques », formes les plus primitives des angiospermes, les siliques dérivent des ovaires composés uniloculaires (**Zongo et al., 2013**).



**Figure 06 :** Gousses de *Moringa oleifera* (**Zongo et al., 2013**).

### I.3.6 Les feuilles

Les feuilles, alternes et bi ou tripennées, se développent principalement dans la partie terminale des branches. Elles mesurent 20 à 70 cm de long, sont recouvertes d'un duvet gris (**Louni, 2009**), elles ont un long pétiole avec 8 à 10 paires de pennes composées

chacune de deux paires de folioles opposés, plus un à l'apex, ovales ou en forme d'ellipse, et mesurant 1 à 2 cm de long (**Laleye et al., 2016**).



**Figure 07 :** Feuilles de *Moringa oleifera* (**Price., 2007**).

### I.3.7 Les branches

Les branches poussent de manière désorganisée et la canopée est en forme de parasol. (**Foild, 2001**).



**Figure 08 :** Branche de *Moringa oleifera* (**Dulal, 2013**).

### I.3.8 Écorce et bois

L'écorce est gris blanchâtre, épaisse, molle, fissurée et verruqueuse ou liégeuse, devenant rugueuse. Lorsqu'elle est blessée, l'écorce dégage une gomme qui est initialement

de couleur blanche mais devient brun rougeâtre ou noir brunâtre à l'exposition. Le bois est doux et léger, avec une densité de 0,5 à 0,7 g / cm<sup>3</sup> (**Stimm et al., 2014**).



**Figure 09 :** Écorce de *Moringa oleifera* (**Stimm et al., 2014**).

#### I.4 Écologie et conditions climatiques de *Moringa oleifera*

Le *Moringa oleifera* pousse dans n'importe quel type de sol, mais préfère les sols limoneux, sableux ou limoneux sableux, avec un pH de neutre à acide. Le *Moringa* est une plante d'un climat tropical ou subtropical dans lequel l'exposition au soleil sera meilleure (**Derdor, 2019**) dans l'aire de répartition indigène du moringa en Asie du Sud, les fluctuations annuelles de température ont tendance à être importantes, avec une pluviométrie annuelle d'au moins 500 mm (**Stimm et al., 2014**).

*Moringa oleifera* est un arbre tolérant à la sécheresse, cultivé dans des régions semi-arides et arides telles que l'Inde, le Pakistan, l'Afghanistan, l'Arabie saoudite et l'Afrique de l'Est. Il reçoit une faible pluviométrie annuelle (300 mm) par rapport à son emplacement d'origine (**Stimm et al., 2014**).

Dans le tableau suivant, une explication sur les limites écologiques du *Moringa oleifera* (**Louni, 2009**).

**Tableau 03 : Limites écologiques de *Moringa oleifera* (Louni, 2009).**

Paramètres	Conditions acceptables	Conditions optimales
Altitude	0-1500 m	100 - 700 m
Température moyenne annuelle	8° C - 45° C	22° C - 25 ° C
Précipitations	100 - 1500 mm	700 - 900 mm
Type de sol	Tous sauf les vertisol	Les sols sablonneux ou limoneux bien drainés
pH de sol	4.5 et 8	Neutres à légèrement acide

## I.5 Culture et récolte

### I.5.1 Culture de *Moringa oleifera*

Le *Moringa* peut être cultivée par semis et/ou bouturage, en plein champ ou par boutures. Elle peut être cultivée à grande échelle pour la production de graines. Les graines de moringa sont plantées immédiatement après maturité, car elles ne subissent pas de dormance tout en conservant leur viabilité jusqu'à un an. En ce qui concerne la production de feuillage, les boutures sont plantées à une distance rapprochée pour obtenir un million d'arbres par hectare (**Saini et al., 2016 ; Louni, 2009**).

L'arbre commence à produire des fruits à un âge compris entre six et huit mois, avec une faible nouaison pendant la première à la deuxième année ; cependant, le rendement augmente au cours des années suivantes (**Saini et al., 2016**).

### I.5.2 Récolte de *Moringa oleifera*

- **Récolte des branches feuillées**

*Moringa* est une plante à feuilles composées, où chaque feuille est constituée de plusieurs folioles reliées entre elles par un rachis central fixé à la branche (**De Saint-Sauveur et Boin., 2006**).

La récolte des feuilles peut commencer 45 jours après la levée des semis (**Fakeye, 2008**), en fonction de la croissance de l'arbre, du type de taille, de la Fertilisation et de l'irrigation.



**Figure 10** : Récolte des feuilles (Bibata et al., s. d.).

- **Récolte des grains**

Dans les exploitations produisant des graines, les fruits doivent être récoltés dès qu'ils arrivent à maturité, ce qui se traduit par leur changement d'aspect : ils deviennent bruns et secs. Les fruits doivent s'ouvrir facilement. Les graines sont extraites, mises en sacs et stockées dans un endroit sec. Les branches de *Moringa* étant fragiles, il est déconseillé de grimper dans l'arbre pour récolter des fruits (De Saint Sauveur et Broin, 2006).

## **II. Potentiel biochimique et applicatif de *Moringa oleifera***

### **II.1 Composition chimique et valeur nutritionnelle**

Le *Moringa oleifera* riche en huile végétale et en valeurs nutritionnelles, est utilisé en Asie comme légume et plante médicinale. Cela est attribué à la présence de protéines, de vitamines et de divers composés phénoliques dans l'huile. Néanmoins, toutes les parties de l'arbre *Moringa* sont comestibles et sont consommées depuis de nombreuses années par l'homme (Anwar et al., 2007 ; Kadhim et Al Shamma., 2014).

**Tableau 04 :** Valeur nutritionnelle de *Moringa oleifera*. Les gousses et les feuilles fraîches contiennent les quantités indiquées ci-dessous par portion de 100 grammes comestibles (**Price, 1985**).

Elément analysé	Gousse	Feuilles
Humidité (%)	<b>86,9</b>	<b>75,0</b>
Calories	<b>26</b>	<b>92</b>
Protéines (g)	<b>2,5</b>	<b>6,7</b>
Gras(g)	<b>0,1</b>	<b>1,7</b>
Glucides (g)	<b>3,7</b>	<b>13,4</b>
Fibres (g)	<b>4,8</b>	<b>0,9</b>
Minéraux (g)	<b>2,0</b>	<b>2,3</b>

### II.1.1 Composition chimique des graines de *Moringa oleifera*

Les graines de *Moringa oleifera* présentent une teneur élevée en protéines, atteignant en moyenne 31,4 %, tandis que les niveaux de glucides, de fibres et de cendres sont respectivement de 18,4 %, 7,3 % et 6,2 %. Par ailleurs, elles suscitent un intérêt scientifique en raison de leur forte teneur en huile (jusqu'à 40 %), caractérisée par une composition en acides gras de haute qualité, notamment une concentration en acide oléique supérieure à 70 % (**Leone et al., 2016**).

Elle contient également des composés mineurs tels que les phytostérols et les tocophérols. De nombreuses études ont analysé son rôle dans la nutrition humaine, en explorant ses caractéristiques physico-chimiques ainsi que sa valeur biologique (**Saa, 2019**).

#### ➤ Les lipides

L'huile extraite, pouvant atteindre 40 % de la composition des graines, se distingue par une forte teneur en acide oléique (> 70 %) et une qualité élevée des acides gras. Après raffinage, elle est commercialisée sous le nom d'« huile Ben » ou « huile Behen » (**Leone et al., 2016**).

L'huile extraite des graines de *Moringa oleifera* contient principalement de l'acide oléique ( $\approx 66$  g/100 g), comparable à l'huile de colza et légèrement inférieur à l'huile

d'olive, ce qui en fait une bonne option pour la nutrition et la cuisine. L'acide bêhenique est le deuxième acide gras le plus abondant (2,4–7,3 g/100 g), surpassant d'autres huiles comestibles sauf l'huile d'arachide. L'huile de *Moringa oleifera* est également riche en acide vaccénique (6–6,3 g/100 g), palmitique, stéarique et arachidique (**Owon et al., 2021**).

### ➤ Les protéines

Les graines de *Moringa oleifera* constituent une source riche en protéines de haute qualité, contenant des acides aminés essentiels. Leur teneur en protéines est d'environ 52 % (**Yang et al., 2006**).

Les acides aminés essentiels présents dans *M. oleifera* incluent l'arginine (Arg), la phénylalanine (Phe), l'histidine (His), l'isoleucine (Ile), la leucine (Leu), la lysine (Lys), la méthionine (Met), la thréonine (Thr), le tryptophane (Trp) et la valine (Val). Par ailleurs, on y retrouve également des acides aminés endogènes, tels que l'acide aspartique (Asp), l'acide glutamique (Glu), l'alanine (Ala), la tyrosine (Tyr), la proline (Pro), la cystéine (Cys), la glycine (Gly), la sérine (Ser) et l'hydroxyproline (Hyp) (**Klimek-Szczykutowicz et al., 2024**).

**Tableau 05 :** Composition en acides aminés dans les graines de *Moringa oleifera* (**James et Zikankuba, 2017**).

Acide aminés	Concentration en mg/100
Lysine	<b>312</b>
Histidine	<b>1930</b>
Valine	<b>1080</b>
Leucine	<b>3830</b>
Isoleucine	<b>4230</b>
Thréonine	<b>3020</b>
Alanine	<b>5160</b>
Acide aspartique	<b>1570</b>
Sérine	<b>3060</b>
Proline	<b>2180</b>

Acide glutamique	<b>17870</b>
Glycine	<b>2370</b>
Arginine	<b>8280</b>
Cystéine	<b>1680</b>
Tyrosine	<b>1970</b>
Méthionine	<b>310</b>
Phénylalanine	<b>3270</b>

### ➤ Métabolites secondaires

La richesse des graines de *Moringa oleifera* en macronutriments, qui les rend particulièrement intéressantes pour la production d'huile et comme source économique de protéines, les graines de *Moringa oleifera* ont fait l'objet de nombreuses études pour leur teneur en métabolites secondaires. Cette composition leur confère un intérêt potentiel dans le domaine médical (**Leone et al., 2016**).

Plusieurs recherches ont mis en évidence leur fort pouvoir antioxydant et ont permis d'isoler divers composés photochimiques aux propriétés biologiques, pouvant être utilisés comme molécules nutraceutiques (**Leone et al., 2016**).

La teneur totale en phénols des graines de *M. oleifera* est estimée entre 4581 et 4953 mg/100 g, un niveau comparable à celui des feuilles. Parmi les flavonoïdes présents, on retrouve la catéchine, l'épicatéchine, la quercétine et le kaempférol, majoritairement sous forme liée (**Leone et al., 2016**).

En outre, plusieurs acides phénoliques ont été identifiés, notamment l'acide gallique, qui est le plus abondant, suivi des acides ellagique et caféique. D'autres acides phénoliques, tels que les acides p-coumarique, vanillique, protocatéchique, férulique et cinnamique, sont également présents, bien qu'en quantités plus faibles (**Leone et al., 2016**)

Il est également notable que les graines de *Moringa oleifera* contiennent des composés bioactifs majeurs, dont des alcaloïdes, glucosinolates, isothiocyanates et thiocarbamates, qui leur confèrent des propriétés biologiques intéressantes (**Leone et al., 2016**).

#### II.1.2 Composition chimique des feuilles

Les feuilles de *Moringa oleifera* sont une bonne source de protéines, de β-carotène, de vitamines A, B, C et E, de riboflavine, d'acide nicotinique, d'acide folique, de pyridoxine,

d'acides aminés, de minéraux et riche par les principales composés phytochimique : les glucosinolates, les flavonoïdes et les acides phénolique (**Mbikay, 2012 ; Adaora et Florett, 2014**).

À titre de comparaison, gramme pour gramme les feuilles fraîches renferment

- 7 fois plus de vitamine C que les oranges,
- 4 fois plus de calcium que le lait de vache,
- 4 fois plus de vitamine A que la carotte,
- 3 fois plus de potassium que la banane,
- 3 fois plus de fer que les épinards
- Une teneur en protéines équivalente à celle des œufs (**Harimalala et al., 2015**).

Ces feuilles peuvent être consommées sous diverses formes : cuites, bouillies, sautées ou crues en salade. Elles peuvent également être séchées et broyées, permettant leur conservation et leur utilisation comme complément nutritionnel dans différents plats. (**Harimalala et al., 2015**).

De plus, les feuilles de *Moringa oleifera* possèdent un taux de matière sèche relativement élevé, estimé entre 20 et 25 %, soit le double de celui de la plupart des autres aliments végétaux, qui avoisinent généralement 10 %. Cette caractéristique les rend particulièrement intéressantes sur le plan nutritionnel, car 100 g de feuilles fraîches fournissent deux fois plus de nutriments que 100 g de la plupart des autres légumes (**De Saint Saveur et Broin, 2010**).

**Tableau 06 :** Valeur nutritionnelle moyenne de 100 grammes de feuilles de *Moringa oleifera* fraîches (De Saint Sauveur et Broin, 2010).

<b>Matière séchée</b>	20-50 %
<b>Protéines</b>	5-7 grammes
<b>Minéraux totaux</b>	2-3 grammes
<b>Minéraux</b>	
<b>Calcium</b>	350-550 mg
<b>Potassium</b>	200-500 mg
<b>Magnésium</b>	80-120 mg
<b>Phosphore</b>	50-120 mg
<b>Fer</b>	5-8 mg
<b>Manganèse</b>	1,2-2,5 mg
<b>Zinc</b>	0,4-0,6 mg
<b>Cuivre</b>	0,2-0,3 mg
<b>Vitamines</b>	
<b>Vitamine C</b>	120-200mg
<b>Vitamine A</b>	1500-4000 µg équivalents rétinol
<b>Vitamine B</b>	150-200mg

## II.2 Usages de *Moringa oleifera*

### II.2.1 Usages médicinaux

Les feuilles de *Moringa oleifera Lam.* Renferment une grande diversité de composés bioactifs, notamment des alcaloïdes, flavonoïdes, glycosides, composés phénoliques, saponines, stéroïdes et tanins. Ces molécules présentent des propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires remarquables, utiles dans la prévention et le traitement de nombreuses pathologies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires, l'hypertension, les affections inflammatoires et certains cancers. Elles contiennent également du ptérygosperme, un composé aux propriétés antibiotiques efficaces notamment contre le choléra (Linan et Francisco, 2010 ; Koolheat et al., 2014).

En médecine traditionnelle, les feuilles séchées sont utilisées pour soulager divers troubles : ulcères gastriques, diarrhée, asthme, fièvre, maladies broncho-pulmonaires,

hypertension et hypotension. La fleur, souvent administrée en décoction, est également utilisée pour faire baisser la fièvre (**Benettayeb et al., 2022**). La poudre de feuilles, quant à elle, est recommandée comme complément nutritionnel pour les enfants, les femmes enceintes et allaitantes, les personnes âgées ou immunodéprimées, ainsi que celles vivant avec le VIH/SIDA (**Agoyi et al., 2016**).

Plusieurs études ont confirmé scientifiquement ces effets. Un thé fonctionnel formulé à partir de feuilles de *Moringa* a montré une teneur élevée en composés phénoliques, avec une capacité antioxydante atteignant 81 % selon le test DPPH (**Kashyap et al., 2022**). Ces effets sont principalement attribués à la présence de flavonoïdes et de polyphénols, notamment la rutine et la myricétine, identifiés comme les principaux agents actifs responsables de l'activité antioxydante et anti-inflammatoire. Par ailleurs, les isothiocyanates présents en abondance dans les graines de *Moringa oleifera* contribuent également à ces effets, démontrés à la fois in vitro et in vivo (**Xinyue et al., 2023**).

En outre, *Moringa oleifera* a montré un potentiel antidiabétique intéressant. Une étude menée sur 100 patients diabétiques de type II ayant reçu pendant 90 jours un comprimé contenant 98,34 % de poudre de feuilles déshydratées a révélé une réduction significative de la glycémie postprandiale (jusqu'à 28,57 %) et de l'hémoglobine glyquée (jusqu'à 7,4 %) par rapport aux valeurs initiales. Ces effets sont attribués à l'action synergique des composés phénoliques et antioxydants présents dans les feuilles (**Kashyap et al., 2020**).

**Tableau 07 :** Quelques utilisations médicinales courantes de différentes parties du *Moringa oleifera* (**Anwar et al., 2006**).

Partie végétale	Utilisation médicinal
<b>Les racines</b>	Antilithique, rubéfiant, vésicant, carminatif, antifertilité, anti-inflammatoire, stimulant dans les affections paralytiques ; agit comme tonique cardiaque/circulatoire, utilisé comme laxatif, abortif, traitant les rhumatismes, les inflammations, les douleurs articulaires, les douleurs lombaires

	ou rénales et la constipation,
<b>Les feuilles</b>	Purgatif, appliqué en cataplasme sur les plaies, frotté sur les tempes pour les maux de tête, utilisé pour les hémorroïdes, la fièvre, les maux de gorge, la bronchite, les infections des yeux et des oreilles, le scorbut et le catarrhe ; le jus de feuille est censé contrôler les niveaux de glucose, appliqué pour réduire le gonflement des glandes
<b>Ecorce de tige</b>	Rubéfiant, vésicant et utilisé pour soigner les maladies oculaires et pour le traitement des patients délirants, pour prévenir l'élargissement de la rate et la formation de glandes tuberculeuses du cou, pour détruire les tumeurs et pour guérir les ulcères. Le jus de l'écorce de la racine est mis dans les oreilles pour soulager les maux d'oreilles et également placé dans une cavité dentaire comme analgésique, et a une activité antituberculeuse
<b>Gomme</b>	Utilisé pour les caries dentaires, il est astringent et rubéfiant ; la gomme mélangée à de l'huile de sésame est utilisée pour soulager les maux de tête, la fièvre, les troubles intestinaux, la dysenterie, l'asthme et parfois utilisée comme abortif, et pour traiter la syphilis et les rhumatismes
<b>Les fleurs</b>	Valeur médicinale élevée comme stimulant, aphrodisiaque, abortif, cholagogue ; utilisé pour soigner les inflammations, les

	maladies musculaires, l'hystérie, les tumeurs et l'hypertrophie de la rate ; abaisse le taux de cholestérol sérique, de phospholipides, de triglycérides, de VLDL, de cholestérol LDL par rapport aux phospholipides
<b>Graine</b>	L'extrait de graines exerce son effet protecteur en diminuant les peroxydes lipidiques hépatiques, des composés antihypertenseurs tels que le Thio carbamate et les glycosides isothiocyanates ont été isolés de la phase acétate de l'extrait éthanolique des gousses de <i>Moringa</i>

### **II.2.2 Consommation humaine**

Des protéines, des fibres, des glucides, des acides aminés, des vitamines, des carotènes, des tocophérols et des minéraux ont été identifiés dans la plante, et, comme on peut le voir, l'élément le plus abondant est le potassium. L'huile obtenue à partir des graines est précieuse sur le plan nutritionnel et convient à la friture en raison de sa stabilité et de sa teneur élevée en acide oléique. Dans la feuille, l'acide linoléique est l'acide le plus abondant, tandis que dans le reste de la plante, ce sont l'acide palmitique et les acides omégas 3 et 6. Le *Moringa* a été recommandé par les Nations Unies (ONU) pour compléter l'alimentation humaine. Certaines études montrent que l'apport est sans danger jusqu'à 1 g·kg<sup>-1</sup> de poids corporel (**Velázquez-Zavala et al., 2016**).

Les fruits ou gousses verts non mûrs se consomment cuits, tandis que les gousses tendres sont comestibles et souvent intégrées aux soupes (**Linan et Francisco, 2010**).

Les feuilles sont préparées pour une utilisation nutritionnelle selon deux méthodes : les feuilles sont consommées fraîches comme légume ou séchées et réduites en poudre (**Agoyi et al., 2016**).

### **II.2.3 Alimentation animale**

Les feuilles et les tiges possèdent un fort potentiel fourrager, particulièrement apprécié en saison sèche en raison de leur croissance rapide et de leur faible besoin en eau. Elles contiennent respectivement 23 % et 9 % de protéines, avec une digestibilité de 79 % pour les feuilles et 57 % pour les tiges. Lorsqu'elles sont intégrées à l'alimentation des ruminants, elles favorisent une augmentation de la production laitière et du poids. Chez les volailles, elles contribuent à une meilleure croissance, une digestion optimisée, une santé intestinale renforcée, une peau en meilleure condition et une augmentation de la production d'œufs. De plus, l'ajout de feuilles de *Moringa* dans l'alimentation des lapins a entraîné une prise de poids significative (**Velázquez-Zavala et al., 2016**).

### **II.2.4 Usages industriels**

#### **➤ Biolubrifiant**

La teneur en huile des graines décortiquées, est d'environ 42%. L'huile est d'un jaune brillant. Elle est utilisée comme lubrifiant dans la machinerie fine, comme l'horlogerie, pour sa faible tendance à se détériorer et devenir rance et collante (**Foidl et al., 2001**).

#### **➤ Source de biogaz**

Le *Moringa* présente une forte teneur en composés méthanogènes, notamment des graisses, ce qui en fait un excellent substrat pour la production de biogaz par digestion anaérobie. Comparé au maïs et à la canne géante, il offre un potentiel énergétique intéressant (**Tambone et al., 2019**).

#### **➤ Fabrication de biodiesel**

Le biodiesel issu de l'huile de *Moringa* est un carburant renouvelable, non toxique et respectueux de l'environnement, pouvant être utilisé seul ou en mélange avec du diesel. Il est produit par transestérification alcaline, avec une amélioration de la qualité grâce à la neutralisation des matières premières huileuses (**Aliyu et al., 2013**).

#### **➤ Coagulation du lait et industrie fromagère**

Les enzymes des feuilles et des fleurs ont montré une valeur négligeable de l'activité de coagulation du lait, tandis que l'enzyme des graines a démontré une activité de coagulation du lait élevée sur les laits entiers, écrémés et de soja (**Sanchez-Munoz et al., 2017**).

## **II.2.5 Accélération de croissance végétale**

L'extrait des feuilles de *Moringa oleifera* obtenu avec de l'éthanol à 80 % renferme des hormones de croissance de type cytokinine. Utilisé en pulvérisation foliaire, il favorise le développement des jeunes plants, renforçant leur vigueur et leur résistance aux maladies. Ce traitement stimule également la fructification, donnant des fruits plus gros et plus nombreux, ce qui améliore le rendement des arbres lors de la récolte (**Foidl et al., 2001**).

## **II.2.6 Traitement de l'eau**

Certaines recherches antérieures ont montré que les extraits de noyaux de *Moringa oleifera* ont le potentiel d'éliminer la turbidité. Des expériences ont été menées avec de la poudre de graines de *Moringa oleifera* pour éliminer la turbidité avec une grande efficacité. Il a été rapporté que les graines de *Moringa oleifera* contiennent un composé de biocoagulation actif et sont capables de réduire la turbidité élevée. La capacité de *Moringa oleifera* à réduire la turbidité de l'échantillon d'eau peut être expliquée par l'absorption et la neutralisation des particules chargées négativement du colloïde (**Nhut et al., 2020**).

# **III. Les eaux usées**

## **III.1 Pollution de l'eau**

La pollution de l'eau, ou pollution aquatique, est causée par la contamination des milieux aquatiques due aux activités humaines, nuisant à leurs fonctions écologiques et usages légitimes (**Bhateria et Jain., 2016**). Elle affecte divers environnements comme les rivières, lacs, océans et eaux souterraines, réduisant leur capacité à fournir des services éco systémiques (**Grizzetti et al., 2016**). L'introduction de polluants, notamment via les rejets d'eaux usées industrielles non traitées, détériore ces écosystèmes et nuit à la faune et la flore aquatiques. Cela peut provoquer des déséquilibres biologiques et impacter les espèces. De plus, la pollution de l'eau représente un risque sanitaire pour les populations humaines en affectant l'eau potable, l'hygiène et l'irrigation (**Boelee et al., 2019**).

### **III.2 Sources des eaux usées**

#### **III.2.1 Les eaux usées domestiques**

Les eaux usées domestiques Issues des habitations, sont généralement transportées par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration. Elles contiennent divers polluants, notamment :

- Des germes fécaux,
- Une forte concentration de matières organiques,
- Des sels minéraux comme l'azote et le phosphore,
- Des résidus de détergents.

Après traitement en station d'épuration, ces substances sont partiellement éliminées (de 50 à 90 %), mais les résidus restants se retrouvent concentrés au point de rejet (**Gaujous, 1995**).

#### **III.2.2 Les eaux usées industrielle**

En particulier celle issue des industries minières, est l'une des plus importantes sources de contamination environnementale. Lors du traitement des minerais métalliques, diverses substances métalliques sont libérées, favorisant la dispersion des éléments traces métalliques (ETM) dans les sols, les sédiments, les nappes phréatiques et la végétation (**Taouati, 2021**).

L'eau, en tant que solvant efficace, absorbe de nombreux polluants provenant des activités humaines, notamment :

- Matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissage) ;
- Hydrocarbures (raffineries) ;
- Métaux lourds (métallurgie, traitement de surface) ;
- Produits chimiques divers (acides, bases, industries chimiques, tanneries) ;
- Eau chaude (refroidissement des centrales thermiques) ;
- Substances radioactives (centrales nucléaires, gestion des déchets radioactifs) (**Gaujous, 1995**).

Ainsi, les activités humaines contribuent largement à la pollution de l'eau et à la dissémination de contaminants dans l'environnement.

### **III.2.3 Les eaux usées agricole**

Les eaux usées agricole résultent de l'usage excessif d'engrais, pesticides, herbicides et fongicides, ainsi que de techniques de labourage favorisant l'infiltration des polluants ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{PO}_4$ , Cl) dans la nappe phréatique (**Taouati, 2021**). Elle se caractérise par une forte concentration en sels minéraux (azote, phosphore, potassium) issus des engrais et des déchets d'élevage, ainsi que par la présence de produits chimiques de traitement (**Gaujous, 1995**).

## **III.3 Risque environnementaux et incidence sur la santé humaine**

### **III.3.1 Les risques environnementaux**

Les écosystèmes aquatiques reposent sur des interactions complexes entre divers organismes. La pollution de l'eau perturbe ces équilibres et entraîne des conséquences graves. L'eutrophisation, causée par une prolifération d'algues liée à un excès de nutriments, réduit l'oxygène disponible, créant des zones mortes et produisant parfois des neurotoxines affectant la faune marine (**Mareddy, 2017**).

Les métaux lourds et les produits chimiques des eaux usées contaminent les cours d'eau, affectant la reproduction et la durée de vie des organismes. Ces toxines s'accumulent dans la chaîne alimentaire, impactant notamment les grands poissons comme le thon (**Gope et Saha, 2021**).

Les débris marins, en particulier les plastiques et les équipements de pêche abandonnés, provoquent la mort de nombreuses espèces marines par suffocation, étranglement ou famine (**Bolón-Canedo et Alonso-Betanzos, 2018**).

Enfin, l'acidification des océans, due à l'absorption du  $\text{CO}_2$  issu des combustibles fossiles, compromet la formation des coquilles chez les mollusques et perturbe le système nerveux de certaines espèces marines (**Bolón-Canedo et Alonso-Betanzos, 2018**).

### **III.3.2 Incidence sur la santé humaine**

La pollution de l'eau est une cause majeure de maladies contagieuses d'origine hydrique, principalement transmises par la voie fécale-buccale. Elle entraîne divers problèmes de santé, notamment le cancer, les maladies diarrhéiques, respiratoires,

neurologiques et cardiovasculaires. Certains produits chimiques, comme les composés azotés, sont responsables de maladies graves telles que le cancer et le syndrome du bébé bleu (**Kumar et Borah, 2020**).

Les zones urbaines et rurales souffrent d'un taux de mortalité élevé en raison de la contamination de l'eau potable par des déchets. L'absence d'infrastructures adéquates de traitement de l'eau aggrave la situation, en particulier dans les régions rurales où l'eau non traitée est largement consommée. Les populations les plus vulnérables, notamment les personnes pauvres et les femmes enceintes, sont exposées à des risques accrus en raison du manque d'assainissement, d'hygiène et d'un accès limité à l'eau potable (**Kumar et Borah, 2020**).

### **III.4 Principales techniques de traitement des eaux usées**

#### **III.4.1 Procédé d'épuration physique**

Le traitement physique des eaux usées repose sur des méthodes ne nécessitant aucun produit chimique, telles que la décantation, la filtration, la flottation et l'écrémage (**Englande et al., 2015**). Principales techniques :

- **L'aération** : qui consiste à injecter de l'air dans l'eau afin d'augmenter son oxygénation (**Englande et al., 2015**).
- **Filtration** : Retrait des impuretés solides à l'aide d'un filtre, comme le filtre à sable (**Englande et al., 2015**).
- **Dégrillage** : Capture des gros déchets à l'aide de grilles (**Alexandre et al., 1998**).
- **Décantation** : Séparation des particules plus denses par dépôt sous l'effet de la gravité (**Bürger et Wendland., 2001**).
- **Centrifugation** : Séparation des composants sous l'action de la force centrifuge (**Hadj-Sadok, 1999**).
- **Flottation** : Remontée des particules légères à la surface, avec ou sans injection d'air (**Norström, 2005**).

Ces procédés permettent d'éliminer efficacement les solides et polluants des eaux usées avant leur traitement ultérieur.

### **III.4.2 Procède d'épuration chimique**

Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur l'utilisation de produits chimiques pour le traitement des eaux usées. Le chlore, un puissant agent oxydant, est couramment employé pour éliminer les bactéries responsables de la décomposition des matières organiques, tout en empêchant l'ajout de nouveaux contaminants dans l'eau. Un autre oxydant fréquemment utilisé pour la purification des eaux usées est l'ozone (**Yargeau, 2012**).

La neutralisation est une autre technique chimique qui consiste à ajuster le pH de l'eau en y ajoutant un acide ou une base afin de la ramener à une valeur neutre (proche de 7) ou dans l'intervalle recommandé (**Grangeiro et al., 2019**). De plus, certains produits chimiques jouent un rôle préventif en inhibant la prolifération bactérienne, contribuant ainsi à la purification de l'eau (**Gohil et Choudhury, 2018**).

### **III.4.3 Procède d'épuration physico-chimique**

Le traitement physico-chimique est l'un des procédés les plus efficaces pour le traitement des eaux. Il combine plusieurs techniques, qui peuvent être appliquées successivement dans une seule unité ou dans des unités distinctes. Parmi ces processus figurent la coagulation, la floculation (**Gerba et Pepper, 2015**).

Deux techniques sont utilisées (**Hadj-Sadok, 1999**) :

- **La coagulation** : annule les charges électriques des particules en suspension par l'ajout de réactifs minéraux.
- **La floculation** : provoque l'agglomération des particules déchargées par les coagulants. La fraction des flocons peut être améliorée par addition de floculant.

### **III.4.4 Procède d'épuration biologique**

Les traitements biologiques utilisent l'action de micro-organismes pour éliminer les polluants organiques. Ils peuvent être intensifs, lorsque les conditions sont contrôlées pour accélérer l'épuration, ou extensifs, lorsque le processus repose sur des interactions naturelles.

#### **III.4.4.1 Traitement biologique intensif**

Trois méthodes principales sont utilisées :

- **Disques biologiques tournants** : des micro-organismes se développent sur des disques partiellement immergés en rotation lente, favorisant l’oxygénation et la dégradation des polluants. Ce système est peu énergivore mais peut causer des nuisances olfactives (**Bakiri, 2007**).
- **Lits bactériens** : les eaux usées prétraitées s’écoulent sur un support poreux qui héberge un biofilm bactérien. L’aération (naturelle ou forcée) permet aux bactéries aérobies et anaérobies d’éliminer les matières organiques (**European Commission, 2001**).
- **Boues activées** : un bassin d’aération favorise l’activité de bactéries en suspension, qui transforment les polluants biodégradables en flocs, ensuite séparés dans un décanteur secondaire (**European Commission, 2001**).

#### **III.4.4.2 Traitement biologique extensif**

- **Le lagunage naturel** : procédé fondé sur l’interaction entre algues et bactéries dans une série de bassins. Les algues produisent de l’oxygène par photosynthèse, permettant aux bactéries aérobies de dégrader la matière organique. En profondeur, les bactéries anaérobies poursuivent la dégradation. Ce système écologique repose sur la lumière solaire et un temps de séjour prolongé (**Mancer, 2010**).

### **III.5 Traitement des eaux usées par les graines de *Moringa oleifera***

Le traitement biologique des eaux usées repose sur divers processus permettant la décomposition de la matière organique, telle que le savon, les huiles, les déchets humains et les résidus alimentaires. Les micro-organismes jouent un rôle clé en métabolisant ces substances (**Gerba et Pepper, 2015**). Un traitement secondaire est ensuite requis pour éliminer les solides restants, bien que certains nutriments dissous, comme l’azote et le phosphore, puissent persister (**Vogel, 2006**).

#### **III.5.1 *Moringa oleifera* comme agent coagulant-floculant**

La protéine cationique contenue dans les graines neutralise les particules colloïdales chargées négativement, favorisant leur sédimentation (**Foidl et al., 2001**). Ce pouvoir coagulant permet de réduire significativement la turbidité et d’éliminer jusqu’à 99 % des

métaux lourds (**Fatombi et al., 2007**). Par ailleurs, différentes techniques d'extraction (solvants, fluides supercritiques) ont été explorées pour isoler ces protéines actives (**Yusoff et al., 2019**).

La coagulation-flocculation par *Moringa* est aussi efficace que les coagulants classiques comme le sulfate d'aluminium, tout en étant biodégradable et non toxique (**Kabore et al., 2013 ; Vilasecaise et al., 2014**).

### **III.5.2 *Moringa oleifera* comme agent adsorbant**

L'utilisation des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement de l'eau laisse souvent d'autres parties de la plante inutilisées, considérées comme des déchets. Toutefois, des recherches ont montré que ces matériaux peuvent être valorisés dans d'autres procédés, notamment l'adsorption, pour éliminer divers polluants émergents tels que les métaux lourds, les colorants, les pesticides et les résidus pharmaceutiques (**Quesada et al., 2019 ; Cusioli et al., 2021**).

Les graines de *Moringa oleifera* possèdent d'excellentes propriétés absorbantes grâce à leurs protéines. Elles permettent de réduire les concentrations de métaux lourds comme le fer, le cuivre, le zinc, l'aluminium, le plomb et le magnésium par un mécanisme de patch électrostatique. Ce processus repose sur l'adsorption et la neutralisation des impuretés chargées négativement par les protéines cationiques des graines (**Fatombi et al., 2007 ; Nand et al., 2012 ; Ravikumar et Sheeja, 2013**).

### **III.5.3 *Moringa oleifera* comme agent désinfectant**

La flocculation induite par *Moringa oleifera* favorise l'agrégation et l'élimination des bactéries fixées sur les particules solides, jouant ainsi un rôle essentiel dans la purification de l'eau et la réduction des maladies hydriques (**Hendrawati, 2016**). Cette action est renforcée par la capacité des graines à coaguler les particules et à augmenter le pH, créant un environnement défavorable à la prolifération des coliformes.

Des études ont montré que l'utilisation de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux usées permet de réduire la présence d'*E. coli* de 80 %, tandis que son application dans l'eau souterraine diminue la charge microbienne de 45 %. Cette efficacité est due à la capacité des graines à coaguler les particules et à augmenter le pH de l'eau, rendant

l'environnement défavorable à la croissance des coliformes. De plus, *Moringa oleifera* possède des propriétés bactéricides prouvées contre des bactéries comme *S. faecalis* et *P. aeruginosa* (**Hendrawati, 2016**).

En complément, les feuilles de *Moringa oleifera*, émergent comme une alternative prometteuse en raison de leurs bienfaits pour la santé et de l'absence d'effets secondaires synthétiques. Des études ont démontré l'activité antimicrobienne des extraits de feuilles de *Moringa oleifera* contre diverses bactéries, dont *E. coli*, *S. aureus*, *B. subtilis*, et d'autres, bien que *P. aeruginosa* soit résistant à l'extrait aqueux. Les propriétés antimicrobiennes sont attribuées à des composés phytochimiques présents dans les feuilles, comme les isothiocyanates et les glucosinolates. L'activité antifongique des feuilles de *Moringa oleifera* a également été prouvée contre diverses espèces de champignons, avec une inhibition maximale observée contre *A. niger*. Des composés bioactifs comme la pterygospermine, qui se dissocie en deux molécules de benzyle isothiocyanate antimicrobien, renforcent encore l'efficacité antimicrobienne des feuilles (**Kashyap et al., 2022**).

## *Matériels et Méthodes*

## 1. Matériels

### 1.1. Matériel végétal

Les graines de *Moringa oleifera* utilisées dans cette étude proviennent de la pépinière de Béchar, située dans le sud de l'Algérie. La récolte a été effectuée entre juillet et août 2024 (**figure 11**).



**Figure 11 :** Graines de *Moringa oleifera* (**Himeur et Goumri**).

### 1.2. Les eaux usées

L'étude a porté sur deux types d'eau provenant de la station d'épuration Iben Ziad : L'eau brute et l'eau de sortie (traitée).

Les échantillons ont été collectés dans des bouteilles de 5 L, pour un volume total de 10 L pour chaque type d'eau.

Le prélèvement et les expérimentations ont été effectués pendant la période du 9 mars au 8 avril 2025.

### 1.3. Présentation de la station d'épuration d'Ibn Ziad

La station d'épuration des eaux usées d'Iben Ziad est située à 12 km au nord de la ville de Constantine, dans la daïra de Hamma Bouziane, sur la route de Mila. Elle occupe une superficie de 12 hectares et se trouve entre les latitudes 36° 15 et 36° 30 Nord, ainsi qu'entre les longitudes 6° 30 et 6° 45 Est.

Elle est localisée au nord de la mechtat Ouldjet El Cadi, en contrebas de la route nationale n° 2 (**A.N.P.E., 1998**).

## **2. Méthodes**

### **2.1. Étude de la biocoagulation**

Les essais expérimentaux ont été réalisés au laboratoire des ateliers de la Faculté de Génie des Procédés de l'Université Salah Boubnider – Constantine 3

#### **2.1.1. Protocol experimental**

##### **Matériels utilisés:**

- Broyeur de marque SKANEX
- Balance de précision de marque KERN PCB 250-3
- Jar Test de marque VELP Scientifica
- Turbidimètre de marque HANNA
- pH-mètre de marque JENWAY
- Conductivimètre de marque HANNA
- Béchers de 1 L
- Verres de montre
- Pipette graduée

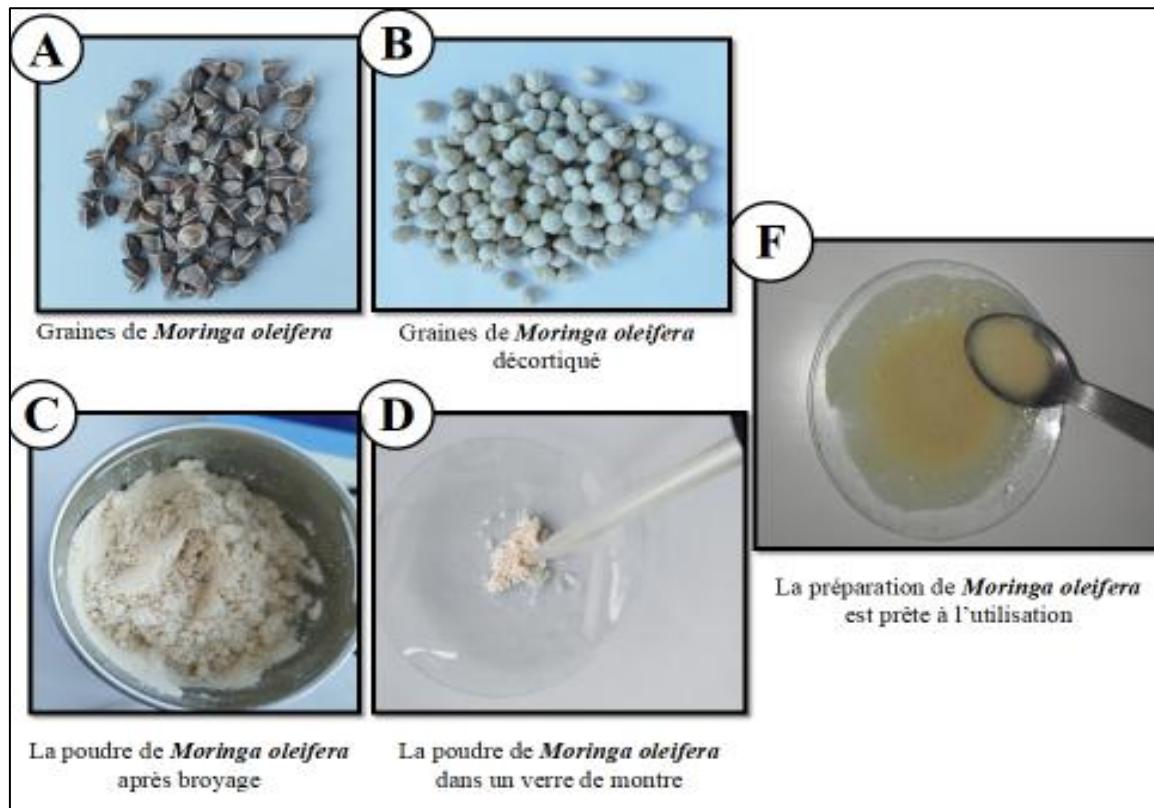


**Figure 12 :** Matériels utilisés au laboratoire

### 2.1.2. Préparation du coagulant

Le protocole de préparation du coagulant à base de poudre de graines de *Moringa oleifera* comprend plusieurs étapes successives.

Tout d'abord, les graines séchées sont décortiquées afin d'en extraire les amandes, qui sont ensuite broyées et filtrés afin d'obtenir une poudre fine. Les doses à tester sont alors pesées à l'aide de verres de montre. À chaque portion de poudre, on ajoute quelques gouttes d'eau distillée afin de former une pâte homogène, qui est mélangée à l'aide d'une spatule. Enfin, la préparation ainsi obtenue est incorporée à l'eau à traiter.



**Figure 13 :** Schéma représentatif des principales étapes de préparation de la poudre de *Moringa oleifera*.

## **2.2. Le Jar Test**

### **2.2.1. Principe du Jar Test**

Le test de jarres est une technique utilisée depuis plusieurs décennies pour évaluer la quantité de produits chimiques ajoutés, le temps nécessaire à la coagulation et à la flocculation, ainsi que les vitesses d'agitation optimales (**Mujawamariya, 2012**).

Il permet de simuler à petite échelle les phénomènes qui se déroulent dans une station de traitement pendant les étapes de coagulation-flocculation, et d'optimiser des paramètres tels que le type et la dose du coagulant, la valeur optimale du pH, la durée et la vitesse de mélange, ainsi que le temps de décantation.

C'est un outil essentiel pour déterminer les conditions opératoires idéales assurant une qualité optimale de l'eau traitée (**Pivokonský et al., 2022**).

### **2.2.2. Description de l'appareil Jar Test**

L'appareil est composé d'un banc de test comportant six bêchers d'un litre chacun, équipés d'un axe avec une pale rotative à l'extrémité. Tous les axes sont reliés à un même moteur pour garantir une vitesse identique dans chaque bêcher.

Cet appareil de laboratoire est indispensable pour évaluer l'efficacité de la coagulation-flocculation, car il permet de contrôler différents paramètres comme la dose du coagulant, le pH, et les conditions de mélange (**Pivokonský et al., 2022**).

### **2.2.3. Les étapes principales du Jar Test**

#### **❖ Coagulation**

Cette étape commence par l'ajout du coagulant à différentes concentrations, suivi d'un mélange rapide provoquant la déstabilisation des particules colloïdales et permettant les premières interactions (**Pivokonský et al., 2022**).

#### **❖ Flocculation**

Une vitesse plus lente est appliquée afin de permettre au coagulant de former des flocs avec les polluants sans les casser. Cela permet l'agrégation des particules en flocs denses (**Pivokonský et al., 2022**).

### ❖ Décantation

L'agitation est arrêtée pour laisser les flocs se déposer au fond des béchers. Le surnageant est ensuite récupéré pour analyses (**Pivokonský et al., 2022**).

Dans notre étude, nous avons utilisé un Jar Test de marque VELP Scientifica (**figure 12**). Cet appareil permet une agitation simultanée de plusieurs béchers contenant chacun 1 L d'eau, avec une vitesse réglable de 0 à 300 tours par minute.

### 2.3. Analyses physico-chimiques

Le protocole expérimental a commencé par un nettoyage soigneux des béchers. Chaque bécher a été rempli avec 1000 ml d'eau brute, puis placé sous l'agitateur avec les pales immergées. Les différentes doses de coagulant ont été ajoutées dans chaque bécher. L'agitation a été effectuée d'abord rapidement à 150 tours par minute pendant 3 minutes (coagulation), puis lentement à 45 tours par minute pendant 20 minutes (floculation). Après cela, l'agitation a été arrêtée et les pales retirées délicatement. Les échantillons ont été laissés en décantation pendant 3 heures.

L'analyse physico-chimique a été réalisée sur différents types d'eau : l'eau brute, l'eau brute traitée par *Moringa oleifera*, l'eau de sortie (traitée par la station) et l'eau de sortie traitée par *Moringa oleifera*. Elle a consisté en la mesure de trois paramètres : le pH, la conductivité et la turbidité.

La mesure du pH a été déterminée par un appareil pH-mètre, marque JENWAY, de type 3510 (**Figure 12**).

La mesure de la conductivité a été déterminée par un appareil Conductivimètre, marque HANNA, de type HI 98311 (**Figure 12**).

Pour la turbidité nous avons utilisés un Turbidimètre Turbidimètre, marque HANNA, référence HI88703 (**Figure 12**).

Un étalonnage du turbidimètre à l'aide d'eau ultra pure a été effectué avant chaque mesure.

Afin d'évaluer l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des différents types d'eau (eau brute, eau brute traitée au *Moringa oleifera*, eau de sortie, eau de sortie traitée au *Moringa oleifera*), des mesures de la turbidité, du pH et de la conductivité ont été réalisées à plusieurs temps de décantation : 30 minutes, 1 heure, 1 heure 30, 2 heures, 2 heures 30 et 3 heures.

#### **2.4. Analyse statistique**

Les résultats obtenus ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel statistique MINITAB 21. La comparaison des moyennes a été réalisée selon le test de **Tukey** au seuil de signification de 5 % ( $p < 0,05$ ). Une analyse de corrélation de **Pearson** a également été calculée pour évaluer les relations entre les paramètres physico-chimiques étudiés. L'ensemble des analyses a été effectué en triplicat, afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des données.

## *Résultats et discussion*

## 1. Paramètres physico chimiques

### 1.1. Caractérisations initiales des eaux

Dans le cadre de ce travail, deux types d'eau ont été étudiés afin d'évaluer l'efficacité de la poudre de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux usées : l'eau brute (non traitée) et l'eau de sortie de la station d'épuration.

Les paramètres physico-chimiques mesurés comprennent la turbidité, le pH et la conductivité électrique. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 08**).

**Tableau 08 :** Résultats des paramètres physico-chimiques de l'eau brute et de l'eau de sortie avant l'ajout de la poudre de *Moringa oleifera*.

Paramètre	Symbole	Unité	Eau brute	Eau de Sortie
Ph	pH	-	8.52±0,00	8.90±0,00
Conductivité électrique	CE	µs/cm	1550±0,01	1420±0,01
Turbidité	NTU	Unité NTU	194± 0.1	20.5 ±0.06

#### 1.1.1. Potentiel hydrogène (pH)

La comparaison des moyennes de pH entre les deux types d'eau ne montre pas de différence significative ( $p = 0,214$  ; **annexe 02**). Le pH de l'eau brute, initialement basique, a légèrement augmenté après traitement de la station, mais cette variation reste faible et non significative. Ce constat est cohérent avec les résultats rapportés par **Ayaicha et al. (2016)**, **Derrouiche et Hammidi (2020)**, ainsi que **Sahnoune et Ougoufri (2024)**, qui ont tous observé une stabilité du pH après traitement.

#### 1.1.2. Conductivité électrique

La comparaison des moyennes de pH entre les deux types d'eau ne révèle pas de différence significative ( $p>0.05$ ). Cela indique que les deux types d'eaux présentent une homogénéité globale de la composition ionique entre l'eau brute et l'eau

de sortie (**annexe 3**). Nos résultats sont conformes aux résultats obtenus par **Ayaicha et al. (2016)**, ainsi que **Sahnoune et Ougoufri (2024)**, ceux qui n'ont pas constaté une différence après traitement.

### 1.1.3. Turbidité

Une analyse de variance (ANOVA) a révélé une différence très hautement significative entre l'eau brute et l'eau de sortie ( $p < 0,001$  ; **annexe 04**). La turbidité moyenne de l'eau brute était de 194,1 NTU contre 20,5 NTU pour l'eau de sortie, soit un taux d'abattement de 89 %. Ces résultats confirment l'efficacité du traitement conventionnel appliqué à la station. Toutefois, la turbidité résiduelle demeure au-dessus du seuil recommandé par la réglementation algérienne (**Annexe 01**). Nos résultats sont en accord avec ceux de **Mourdi et Rekhili (2022)**.



**Figure 14 :** Eau brute provenant de la station d'épuration Ibn Ziad avant ajout de la poudre de *Moringa oleifera* (**Test Jar** ; photo du 07/04/2025).

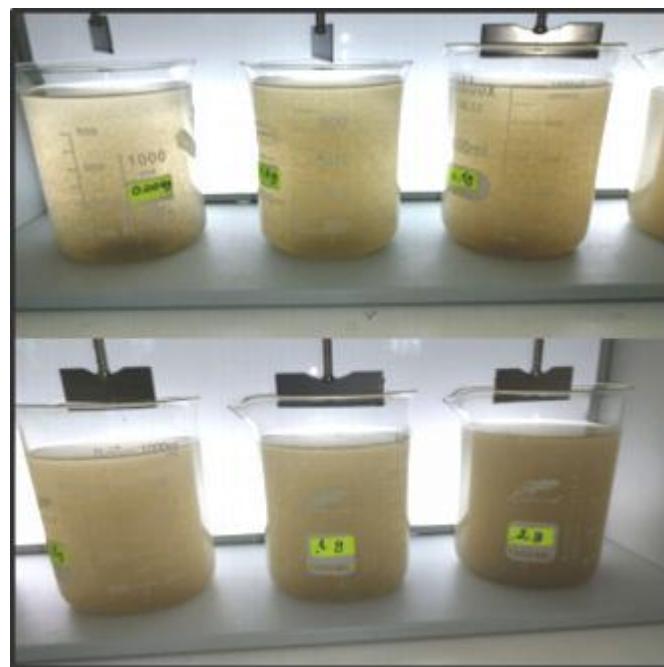


**Figure 15 :** Eau de sortie provenant de la station d'épuration Ibn Ziad avant ajout de la poudre de *Moringa oleifera* (Test Jar ; photo du 08/04/2025).

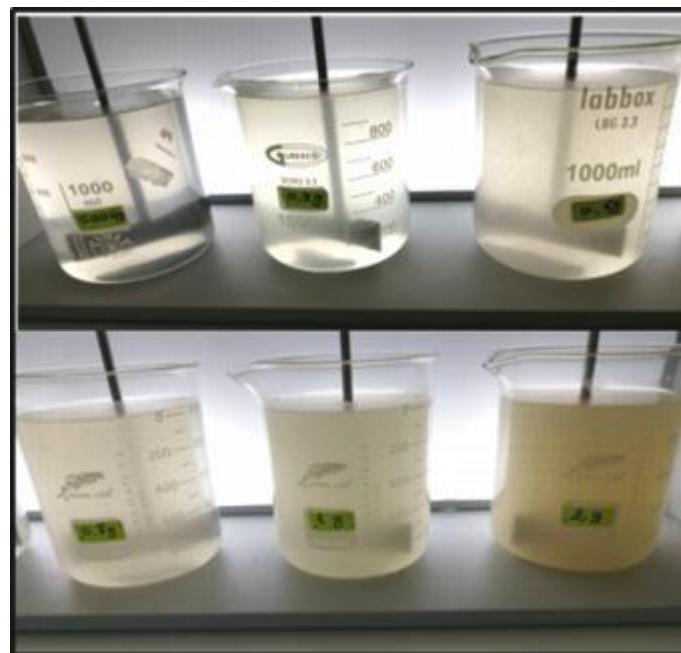
## 2. Évaluation de l'efficacité du traitement par *Moringa oleifera* sur les paramètres physicochimiques

La coagulation et la floculation sont des étapes essentielles dans le traitement de l'eau, visant à éliminer les particules colloïdales et les matières en suspension. La coagulation repose sur la désstabiliisation des particules fines à l'aide de produits chimiques ou naturels, suivie par la floculation qui favorise l'agglomération de ces microflocs en macroflocs plus faciles à séparer (Sorokhaibam et Ahmaruzzaman, 2014).

Dans notre étude, la poudre de *Moringa oleifera* a été ajoutée pour le traitement de l'eau brute ainsi que de l'eau de sortie. Après une phase de coagulation de 3 minutes suivie de 20 minutes de floculation, la formation de flocs a été clairement observée dans les deux types d'eau. L'ajout de la poudre de *Moringa oleifera* a favorisé l'agglomération des particules en suspension, conduisant à la formation d'amas visibles (Figures 16 et 17).



**Figure 16 :** Aspect de l'eau de sortie après coagulation et flocculation après ajout de la poudre de *Moringa oleifera*.



**Figure 17:** Aspect de l'eau de sortie après coagulation et flocculation après ajout de la poudre de *Moringa oleifera*.

## 2.1. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est une mesure l'activité des ions H contenus dans une eau (**Henry et al., 1992**), il est également influencé par de nombreux facteurs physico-chimiques et varie selon plusieurs éléments, notamment l'origine de l'eau (**Karastogianni et al., 2016**).

### ➤ L'eau brute :

Le tableau 09 présente l'évolution du pH de l'eau brute après traitement par différentes concentrations de poudre de *Moringa oleifera* et pour diverses durées de décantation. Le pH initial de l'eau brute était de **8,52**. Après traitement, les valeurs ont fluctué entre **7,60 et 8,60**, soit une variation relativement modérée.

**Tableau 09 :** Influence des concentrations (g/l) de *Moringa oleifera* (CM) sur le pH de l'eau brute en fonction des durées de décantation (min).

Temps/CM	0.004	0.2	0.5	0.8	1	2
<b>30</b>	8 ,02	7 ,70	8 ,09	7 ,60	7,73	7 ,73
<b>60</b>	7 ,74	7 ,68	7 ,63	8 ,60	7,73	7 ,61
<b>90</b>	7 ,77	7 ,75	7 ,70	7 ,67	7 ,64	7 ,65
<b>120</b>	7 ,79	7 ,75	7 ,72	7 ,73	7 ,65	7 ,64
<b>150</b>	7 ,83	7 ,77	7 ,74	7 ,73	7 ,71	7 ,67
<b>180</b>	8 ,02	7 ,70	8 ,09	7 ,60	7,73	7,60
<b>Moy ±Ec</b>	7,86±0,18	7.72±0,18	7,82±0,18	7,82±0,18	7,69±0,18	7,65±0,18

### ➤ L'eau de sortie :

Le tableau 10 illustre les résultats obtenus pour l'eau de sortie. Le pH initial mesuré était de **8,90**, tandis que les valeurs après ajout de la poudre de moringa se situaient entre **7,09 et 8,6**.

**Tableau 10 :** Influence des concentrations (g/l) de *Moringa oleifera* (CM) sur le pH de l'eau de sortie en fonction des durées de décantation (min).

Temps/CM	0.004	0.2	0.5	0.8	1	2
<b>30</b>	8 ,09	8 ,50	7 ,97	7 ,95	7 ,91	7 ,89
<b>60</b>	7 ,79	7 ,89	7 ,97	7 ,98	7 ,98	7 ,86
<b>90</b>	7 ,93	7 ,96	8 ,02	8 ,01	7 ,95	7 ,70
<b>120</b>	7 ,09	8 ,06	8 ,06	7 ,50	8 ,01	7 ,77
<b>150</b>	7 ,15	7 ,12	7 ,09	7 ,50	7 ,99	7 ,73
<b>180</b>	8 ,18	8 ,15	8 ,08	8 ,03	7 ,95	7 ,72
<b>Moy ±Ec</b>	7,70±0,33	7,94±0,33	7,86±0,33	7,82±0,33	7,96±0,33	7,77±0,33

Aucune variation significative du pH n'a été observée après l'ajout de la poudre de *Moringa oleifera*, quel que soit le type d'eau ( $p > 0,05$  ; **Annexe 02**). Les tests post-hoc de Tukey confirment cette stabilité, avec des valeurs moyennes proches avant et après traitement. Toutes les mesures appartiennent au même groupe statistique (groupe A), indiquant l'absence de différence significative.

Les valeurs enregistrées se situent dans les normes recommandées pour l'eau d'irrigation (**Annexe 01**), indiquant que le *Moringa oleifera* ne perturbe pas l'équilibre acido-basique de l'eau.

Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par **Shahzad et al. (2014)**, qui ont également constaté l'absence de variation du pH après traitement de l'eau par les graines de *M. oleifera*. De même, **Kitheka et al. (2022)** ont confirmé que l'utilisation de *Moringa oleifera* comme coagulant naturel ne perturbe pas l'acidité de l'eau, renforçant ainsi son intérêt dans le traitement des eaux usées, notamment dans des contextes agricoles ou domestiques.

## 2.2. Conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique dépend de la concentration des ions, des sels et des minéraux dissous dans l'eau, qui se présentent généralement sous forme d'ions électriquement chargés (**Gaujous, 1998**), ce qui fait de la mesure de la conductivité un

moyen d'estimer la quantité de ces sels, laquelle varie selon le type d'eau (**Lagnika et al., 2014**).

### ➤ L'eau brute

Le tableau 11 présente l'évolution de la conductivité de l'eau brute après traitement par différentes concentrations de poudre de *Moringa oleifera* et selon plusieurs temps de décantation. Les valeurs mesurées ont montré peu de variations notables, conservant une moyenne de 1549,46 µS/cm, ce qui suggère un effet limité du traitement immédiat sur ce paramètre.

**Tableau 11 :** Conductivité électrique (µs/cm) de l'eau brute en fonction du temps de décantation (min) et de la concentration (g/l) de poudre de *Moringa oleifera* (CM).

Temps/CM	0.004	0.2	0.5	0.8	1	2
<b>30</b>	1560	1560	1570	1570	1560	1560
<b>60</b>	1560	1550	1550	1550	1550	1560
<b>90</b>	1550	1550	1550	1550	1520	1540
<b>120</b>	1540	1540	1530	1540	1550	1550
<b>150</b>	1550	1550	1540	1540	1540	1550
<b>180</b>	1540	1540	1530	1540	1550	1550
<b>Moy ± Ec</b>	1550±103,81	1548±103,81	1545±103,81	1548±103,81	1545±103,81	1551±103,81

### ➤ L'eau de sortie

Le tableau 12 illustre les résultats obtenus pour l'eau de sortie. Contrairement à l'eau brute, la conductivité de l'eau de sortie a nettement diminué après traitement, avec une moyenne de 1423,91 µS/cm. Cette réduction significative indique un effet favorable du traitement par *Moringa oleifera*, contribuant à la diminution de la teneur en sels dissous.

**Tableau 12** : Conductivité électrique ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) de l'eau de sortie en fonction du temps de décantation (min) et de la concentration (g/l) de poudre de *Moringa oleifera*(CM).

Temps/CM	0.004	0.2	0.5	0.8	1	2
<b>30</b>	1420	1420	1420	1420	1420	1420
<b>60</b>	1420	1420	1430	1430	1430	1420
<b>90</b>	1410	1430	1420	1420	1420	1430
<b>120</b>	1420	1420	1430	1430	1430	1420
<b>150</b>	1420	1430	1430	1430	1430	1430
<b>180</b>	1420	1420	1420	1420	1430	1420
<b>Moy ± Ec</b>	1418±5,44	1423±5,44	1425±5,44	1425±5,44	1426±5,44	1423±5,44

L'analyse de la variance (ANOVA) de la conductivité électrique en fonction de tous les types d'eaux a révélé une différence hautement significative entre les groupes ( $p = 0,000$ , **Annexe 3**). Les résultats du test post-hoc de Tukey, montrent que seule l'eau de sortie traitée avec *Moringa oleifera* (moyenne = 1423,91  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) se distingue significativement des autres types d'eau. En effet, les eaux brutes avec et sans *Moringa* et sorties sans *Moringa* présentent des moyennes similaires (environ 1550–1560  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) et ne diffèrent pas significativement entre elles (groupement A), tandis que l'eau de sortie traitée appartient seule au groupe B, confirmant ainsi une baisse significative de la conductivité.

Ces résultats confirment l'efficacité du *Moringa* dans l'amélioration de la conductivité de l'eau de sortie, en accord avec les travaux de **Benkaddour (2016)**, **Dalichaouche et Bouchama (2018)** et **Derdour (2019)**. En revanche, dans l'eau brute, aucune modification significative n'a été observée, ce qui rejoint les conclusions de **Zorzanelli et al. (2022)**, selon lesquelles ni la poudre ni les extraits de *Moringa* n'affectent la conductivité, contrairement à l'alun.

## 2.3. La turbidité

La turbidité est considérée comme l'indicateur inverse de la transparence ; son augmentation reflète une eau plus trouble et moins claire (**Henry et al., 1992**). Elle constitue également l'un des premiers critères perçus par le consommateur lors de l'évaluation de la qualité de l'eau (**Dégrémont, 1995**). Elle est causée par la présence de particules en suspension telles que l'argile, les limons, les matières organiques ou les micro-organismes (**Rodier et al., 2005**). Il est essentiel d'éliminer la turbidité afin d'améliorer l'efficacité de la désinfection, de retirer les polluants adsorbés sur les particules en suspension comme les métaux lourds, et de prévenir la formation de dépôts dans le réseau de distribution (**Dégrémont, 1995**).

### ➤ L'eau brute

Le tableau 13 présente l'évolution de la turbidité de l'eau brute traitée par différentes concentrations de poudre de *Moringa oleifera* à divers temps de décantation. La turbidité initiale, de 194 NTU, diminue progressivement après traitement. La valeur la plus basse, 9,74 NTU, est atteinte avec une concentration de 1 g/L après 3 heures de décantation, correspondant au taux d'abattement le plus élevé.

**Tableau 13 :** Effet de différentes concentrations (g/l) de *Moringa oleifera* (CM) sur la turbidité (NTU) de l'eau brute en fonction des durées de décantation (min).

Temps/CM	0,004	0,2	0,5	0,8	1	2
<b>30</b>	45	44,1	26	24,3	27,9	44,9
<b>60</b>	45,7	44,9	16,4	17,2	18,6	29,9
<b>90</b>	44,8	27,7	13,9	13,9	14,4	24
<b>120</b>	44,8	26,8	12,8	12,7	12,4	18,9
<b>150</b>	43,4	26,2	12,6	10,7	10,5	16,7
<b>180</b>	43,6	25,5	11	10	9,74	13,9
<b>Moy ± Ec</b>	<b>44,5 ±14,04</b>	<b>32,5±10,41</b>	<b>15,45±4,84</b>	<b>14,8±5,38</b>	<b>15,59±7,31</b>	<b>24,71±10,09</b>

### ➤ L'eau de Sortie

Le tableau 14 présente les résultats obtenus pour l'eau de sortie, dont la turbidité initiale était de 20,5 NTU. Le traitement au *Moringa oleifera* permet une amélioration significative, avec une turbidité finale atteignant 5,00 NTU. La réduction la plus marquée est observée avec une concentration de 0,5 g/L après 3 heures de décantation.

**Tableau 14 :** Effet de différentes concentrations (g/l) de *Moringa oleifera* (CM) sur la turbidité de l'eau de sortie en fonction des durées de décantation (min).

Temps/CM	0,004	0,2	0,5	0,8	1	2
<b>30</b>	17,33	13,37	12,07	19,1	32,17	23,57
<b>60</b>	17	9,5	11,1	14,73	25,78	19,37
<b>90</b>	17,17	8	8,1	11,6	21,7	21,93
<b>120</b>	17,63	7,15	6,47	9,05	16,37	11,43
<b>150</b>	16,6	6,99	5,64	7,25	12,7	9,13
<b>180</b>	15,57	5,85	5,00	5,92	11,37	7,9
<b>Moy ± Ec</b>	16,88±14,04	8,47±10,41	8,76±4,84	12,34±5,38	20,01±7,31	15,55±10,09

### ➤ Turbidité selon le type d'eau, la concentration en *Moringa oleifera* et leur interaction

Les résultats de l'ANOVA ont mis en évidence un effet hautement significatif du type d'eau ( $p = 0,000$ ), de la concentration en *Moringa oleifera* ( $p = 0,000$ ), ainsi que de leur interaction sur la turbidité ( $p = 0,000$ , **annexe 04**). Ces résultats indiquent que l'efficacité du traitement dépend à la fois de la nature de l'eau et de la dose utilisé.

L'interaction entre le type d'eau et la concentration en *Moringa oleifera* s'avère elle aussi hautement significative ( $p = 0,000$ ). Cela suggère que l'effet de la concentration de *Moringa oleifera* sur la turbidité varie en fonction de l'état initial de l'eau (brute ou traitée). Autrement dit, la concentration optimale ne serait pas universelle, mais dépendrait du type d'eau à traiter (**annexe 04**).

### ➤ Variation de la turbidité en fonction de la dose de *Moringa oleifera*

L’analyse statistique montre une diminution nette et significative de la turbidité dès 0,004 g de poudre de *Moringa oleifera*, avec un effet plateau observé à partir de 0,2 g. Les doses comprises entre 0,2 et 2 g/L ne présentent pas de différences significatives entre elles (groupe C, **annexe 05**). La dose optimale de 1g permet d’atteindre la turbidité de 95% dans l’eau brute, tandis qu’à une concentration de 0,5 g, la réduction atteint 75% dans l’eau de sortie (**annexe 06**). La dose de 0,5 g/l est à la fois efficace et économique, ce qui la rend idéale pour un usage à grande échelle. À l’inverse, la dose minimale testée (0,004 g) reste significativement moins efficace (**annexe 05**), bien qu’elle montre un effet perceptible.

Nos résultats sont cohérents avec ceux de **Kitheka et al. (2022)**, qui ont observé une réduction maximale de la turbidité (95 %) à 0,5 g/L dans des eaux de l’est du Kenya, tandis qu’une dose de 0,2 g/L permettait une réduction modérée (64 %), suffisante pour des eaux peu chargées.

De même, **Choudhary et Desale (2021)** ont rapporté une réduction de 60–70 % à 0,2 g/L, ce qui concorde avec nos observations dans l’eau de sortie (62 %). Dans l’eau brute, la réduction à cette même dose atteint 87 %, probablement en raison de la turbidité initiale plus élevée favorisant la coagulation.

Enfin, **Chinedu et Lyela (2011)** ont obtenu une réduction notable de la turbidité (jusqu’à 98 %) avec une dose de 0,8 g/L dans des eaux de rivière. Nos résultats à cette dose (95 % dans l’eau brute, 71 % dans l’eau de sortie) confirment la performance du moringa, même dans des conditions de forte turbidité initiale.

### ➤ Turbidité en fonction du temps de décantation :

Le temps de décantation a été mesuré à intervalles réguliers de 30 minutes sur une durée totale de 3 heures.

Les résultats ont montré que l’eau brute comme l’eau de sortie présentaient initialement une couleur foncée. Toutefois, après 30 minutes de décantation avec la poudre de *Moringa oleifera*, une clarification notable a été observée, la couleur de l’eau devenant plus claire, puis restant globalement stable par la suite (**figures 18 et 19**).

D’après le tableau 15 on constate que la baisse la plus importante est observée dès les 30 premières minutes, avec une moyenne de turbidité de 26,41 NTU, indiquant une forte efficacité initiale du traitement. Cependant, le processus de clarification se poursuit au-delà de cette période, bien que de manière plus modérée : les moyennes à 60, 90 et 120

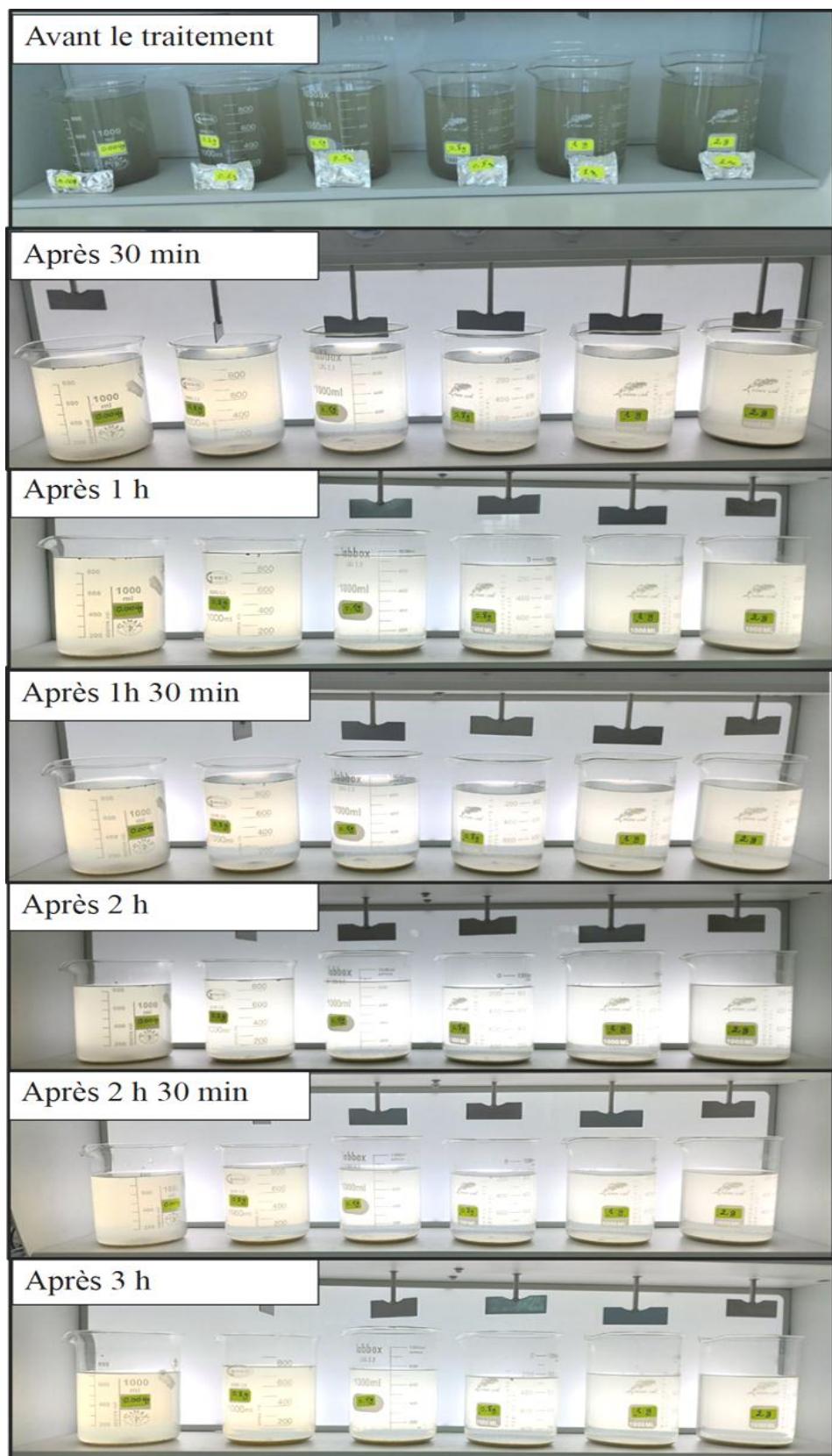
minutes restent significativement différentes de celles de 30 minutes, montrant une amélioration continue.

À 180 minutes, la turbidité atteint une valeur moyenne de 13,79 NTU, statistiquement distincte de celle de 30 minutes (groupe A vs groupe C). Cela indique que, malgré une atténuation de l'effet avec le temps, des différences significatives persistent jusqu'à 180 minutes.

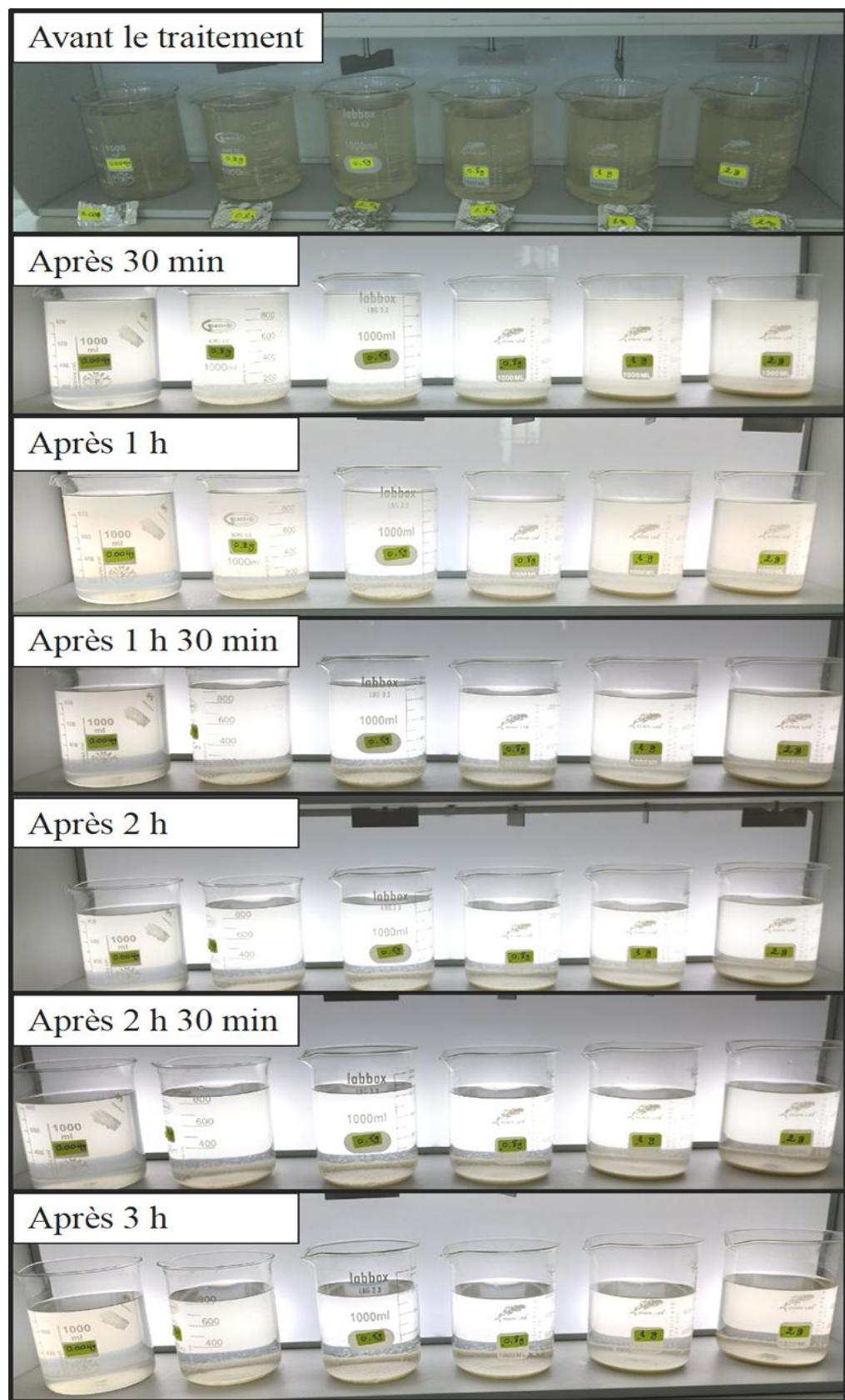
Ainsi, le temps de décantation optimal peut être fixé à 30 minutes pour des raisons d'efficacité et de rapidité, mais un allongement du temps jusqu'à 90 ou 180 minutes peut apporter des gains supplémentaires mesurables, surtout lorsque des niveaux de turbidité très faibles sont recherchés.

**Tableau 15** : Résultats de l'analyse de variance au seuil 5%, par le test Tukey, de la turbidité en fonction du temps de décantation après ajout de la poudre de *Moringa oleifera*.

Temps(min)	N	Moyenne	Groupement	
30	36	26,41	A	
60	36	21,24	A	B
90	36	18,17	B	C
120	36	16,34	B	C
150	36	14,92	B	C
180	36	13,79	C	



**Figure 18 :** Effet de la poudre des graines de *Moringa oleifera* sur la turbidité en fonction de temps de décantation pour l'eau brute.



**Figure 19 :** Effet de la poudre des graines de *Moringa oleifera* sur la turbidité en fonction de temps de décantation pour l'eau de sortie.

### 3. Corrélations entre tous les paramètres mesurés

Les analyses de corrélation de Pearson (**Tableau 16**) montrent que la turbidité est principalement influencée par le temps de décantation, le type d'eau, et dans une moindre mesure, la concentration en *Moringa oleifera*. Cette dernière présente une corrélation négative faible mais significative avec la turbidité, suggérant un effet dose modéré, probablement lié à un phénomène de saturation ou de seuil au-delà duquel l'augmentation de la concentration n'améliore plus la clarification.

D'un point de vue physico-chimique, la conductivité s'est révélée fortement dépendante du type d'eau, avec une corrélation très élevée ( $r = -0,930$ ), confirmant que ce paramètre varie largement entre eau brute et eau traitée. En revanche, aucune variation significative du pH n'a été détectée en fonction des variables étudiées, ce qui confirme la stabilité de ce paramètre après traitement au *Moringa oleifera*.

**Tableau 16 :** Corrélations de Pearson entre conductivité (CDV), turbidité (NTU), pH, concentration de *Moringa* (CM), temps de décantation (TD) et type d'eau (TE).

Paramètres	Turbidité (NTU)	CM (g)	TD (min)	pH	CDV	TE
Turbidité (NTU)	—		-0,155	-0,372	0,100	0,553
CM (g)	-0,155	—		-0,000	-0,008	-0,149
TD (min)	-0,372		-0,000	—	-0,295	-0,067
pH	0,100		-0,008	-0,295	—	-0,017
CDV	0,553		-0,149	-0,067	-0,017	—
TE	-0,484		0,000	0,000	0,054	-0,930

## *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

---

### **Conclusion**

L'objectif de ce travail été d'évaluer l'efficacité de la poudre de *Moringa oleifera* comme agent naturel de traitement des eaux usées, à travers l'analyse de trois paramètres physico-chimiques essentiels : le pH, la conductivité électrique et la turbidité. Deux types d'eau ont été examinés : l'eau brute et l'eau de sortie d'une station d'épuration d'Ibn Ziad, située de la commune de Constantine.

Les résultats montrent, d'une part, que le pH reste globalement stable après traitement au *Moringa oleifera*, indépendamment du type d'eau, de la concentration utilisée ou du temps de décantation. Cette stabilité, confirmée par l'analyse statistique (ANOVA et test de Tukey), indique que le coagulant naturel n'altère pas l'équilibre acido-basique de l'eau, ce qui est un atout majeur pour une éventuelle réutilisation agricole.

Concernant la conductivité électrique, aucune variation significative n'a été observée dans l'eau brute. En revanche, une baisse significative a été constatée dans l'eau de sortie, notamment à des doses de 0,5 à 1 g/L, suggérant une capacité du moringa à réduire la charge ionique résiduelle après traitement.

Concernant la turbidité, le traitement par *Moringa oleifera* s'est révélé particulièrement efficace. La dose optimale a été déterminée à 1 g/L pour l'eau brute permettant une réduction moyenne de la turbidité de 95 % pour l'eau brute avec, tandis que pour l'eau de sortie la dose optimale 0,5 g/l avec un taux d'abattement 75%.

La baisse la plus marquée de la turbidité est observée dès les 30 premières minutes de décantation, indiquant une efficacité rapide du traitement. Bien que les valeurs continuent de diminuer au-delà de ce délai, les résultats du test de Tukey montrent que des différences statistiquement significatives persistent jusqu'à 180 minutes. Cela suggère que la réaction est particulièrement intense en début de processus, mais qu'un effet d'atténuation s'installe progressivement. Le prolongement du temps de décantation au-delà de 90 minutes permet encore des gains mesurables, bien que plus modérés.

Les résultats des corrélations entre la conductivité, la turbidité, le pH, la concentration en *Moringa*, le temps de décantation et le type d'eau soulignent que l'efficacité du traitement est essentiellement conditionnée par des paramètres tels que la décantation et la qualité initiale de l'eau, tandis que l'effet de la dose de Moringa, bien réel, reste limité au-delà d'une certaine concentration.

Par ailleurs, l'utilisation des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux usées s'inscrit pleinement dans une démarche de développement durable, en

## ***Conclusion générale***

---

valorisant une ressource naturelle, renouvelable, et biodégradable. Cette approche écologique peut représenter une solution alternative, particulièrement adaptée aux zones rurales ou à faibles ressources, où l'accès à des technologies de traitement conventionnelles reste limité

## *Références bibliographiques*

## Références Bibliographiques

---

- **Adaora, V., Florett, C. (2014).** Nutritional, Therapeutic, and Prophylactic Properties of *Vigna subterranea* and *Moringa oleifera*. In O. Oguntibeju (Ed.), Antioxidant-Antidiabetic Agents and Human Health. InTech.  
<https://doi.org/10.5772/57338>
- **Agoyi, E. E., Assogbadjo, A. E., Gouwakinnou, G., Okou, F. A. Y., Sinsin, B. (2014).** Ethnobotanical Assessment of *Moringa oleifera* Lam. In Southern Benin (West Africa). Ethnobotany Research and Applications, 12, 551.  
<https://doi.org/10.17348/era.12.0.551-560>
- **Ahmad, A., et al. (2022).** Exploring the extraction methods for plant-based coagulants and their future approaches. Science of the Total Environment.
- **Alexandre O, Boutin C, Duchène P, Lagrange C, Lakel A, Liénard A ,Orditz D (1998)** Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités. Technique et documentation Lavoisier (FNDAE N22). Paris. France.
- **Aliyu, A. O., Nwaedozie, J. M., Adams, A. (2013).** Quality Parameters of Biodiesel Produced from Locally Sourced *Moringa oleifera* and *Citrullus colocynthis* L. Seeds Found in Kaduna, Nigeria. Applied Chemistry.
- **Allouche, FN. (2006).** La phytoremédiation pour la dépollution des eaux usées. bulletin des énergies renouvelables. Recherche et développement. 16-17p
- **Alshikh, O. (2007).** Parameters affecting Coagulation/ Flocculation of Drinking Water under Cold Temperatures. Windsor, Ontario, Canada. Available at: [https://scholar.uwindsor.ca/etd/6987/?utm\\_source=scholar.uwindsor.ca%2Fetd%2F6987&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](https://scholar.uwindsor.ca/etd/6987/?utm_source=scholar.uwindsor.ca%2Fetd%2F6987&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages).
- **Amjad, M. S., Qureshi, H., Arshad, M., Chaudhari, S. K., Masood, M. (2015).** The incredible queen of green: Nutritive value and therapeutic potential of *Moringa oleifera* Lam. J Coast Life Med, 3(9), 744-751.
- **Anwar, F., Latif, S., Muhammad, A., Gilani, A. H. (2007).** *Moringa oleifera* : A food plant with multiple medicinal uses. Phytotherapy Research, 21(1), 17 - 25.  
<https://doi.org/10.1002/ptr.2023>
- **Armelle de Saint Sauveur et Dr Mélanie Broin :** «Produire et transformer les feuilles de *Moringa* ». Document d'origine Moringanews / *Moringa* Association of Ghana. Page 9, 19, 21, 23 , 25, 27, 29.

## Références Bibliographiques

---

- **Ashfaq, M., Basra, S. M. A., Ashfaq, U. (2012).** *Moringa: A Miracle Plant for Agro-forestry.* Int. J. Agric. Biol., 8(3).
- **Bakiri, Z. (2007).** Traitement des eaux usées par des procédés biologiques classiques : expérimentation et modélisation. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas.Sétif. 120p
- **Baptista, A. T. A., et al. (2015).** Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleifera* for the treatment of surface water. Chemical Engineering Journal, 276, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.045>
- **Benettayeb, A., Usman, M., Tinashe, C., Adam, T., Haddou, B. (2022).** A critical review with emphasis on recent pieces of evidence of *Moringa oleifera* biosorption in water and wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research, 29(32), 48185 - 48209. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19938-w>
- **Benslimane M, Mostephaoui T, Hamimed A, Cherif Z. (2014).** Performances épuratoires et intérêt du procédé de phytotraitement des eaux usées par des végétaux macrophytes. Courrier du savoir 17.
- **Bhateria, R. et Jain, D. (2016).** Water quality assessment of lake water: a review. Sustainable Water Resources Management, 2(2), 161–173.
- **Bibata, A. O., Adamou, H., Mahamane, A., Patrick, D. (s. d.).** Techniques de production du moringa.
- **Brix,H. (1994).** Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands. Water Science and Technology, 29: 71-78.
- **Boelee, E. et al. (2019).** ‘Water and health: From environmental pressures to integrated responses’, Acta Tropica, 193(March), pp. 217–226.doi:10.1016/j.actatropica.2019.03.011.
- **Bolón-Canedo, V. and Alonso-Betanzos, A. (2018).** ‘Basic concepts’, Intelligent Systems Reference Library, 147, pp. 1–11. doi: 10.1007/978-3-319-90080-3\_1.
- **Bürger,R. Wendland, W. (2001).** Sedimentation and suspension flows: Historical perspective and some recent developments. Journal of Engineering Mathematics 41 : 101-116.

## Références Bibliographiques

---

- **Chinedu, P. C., lyela, A. O. (2011).** Chemical evaluation of water treated with seed powder of *Moringa oleifera*. Bajopas, 4(2), 207-214.
- **Choudhary, A., Desale, K. (2021).** Water purification improvement using *Moringa oleifera* seed extract. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), NCETESFT – 2021 Conference Proceedings, 9(18), 163–166. Retrieved from <https://www.ijert.org/research/water-purification-improvement-using-moringa-oleifera-seed-extract-IJERTCONV9IS18032.pdf>
- **Cusioli, L. F. et al. (2021).** ‘Modified *Moringa oleifera* Lam. Seed husks as low-cost biosorbent for atrazine removal’, Environmental Technology (United Kingdom), 42(7), pp. 1092–1103. doi: 10.1080/09593330.2019.1653381.
- **Dégrémont.T. (2005).** Mémento technique de l'eau (10e éd.). Lavoisier
- **Dégrémont, T. (1995).** Mémento technique de l'eau (Tome 1, 10<sup>e</sup> éd.). France : Lavoisier
- **Derdour R (2019).** Essai de production de *Moringa oleifera* pour une éventuelle contribution à l'étude des potentialités de la graine dans l'épuration des eaux usées de la région de Constantine, 2019, 108 p.
- **Derrouiche, C., Hammidi, N. (2020).** Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées du barrage de Bouhamdane [Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie des Procédés].
- **Driscoll, T. P., et al. (2008).** Industrial wastewater management, treatment, and disposal. Water Environment Federation.
- **De Saint Sauveur, A et Dr Mélanie Broin :** «Produire et transformer les feuilles de *Moringa* ». Document d'origine Moringanews / *Moringa* Association of Ghana. Page 9, 19, 21, 23 , 25, 27, 29.
- **Dulal, K. (2013).** Small tree of *Moringa oleifera* in Panchkhal, Nepal [Photographie]. Wikimedia Commons  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moringa\\_oleifera\\_NP.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moringa_oleifera_NP.JPG).
- **Englande, A. J., Krenkel, P. and Shamas, J. (2015).** Wastewater Treatment WaterReclamation, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier Inc. doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.09508-7.

## Références Bibliographiques

---

- European Commission (Éd.). (2001). Extensive wastewater treatment processes adapted to small and medium sized communities (500 to 5,000 population equivalents): Implementation of Council Directive 91/271 of 21 May 1991 concerning urban wastewater treatment. Publications Office.
- Faby, J. A., Eleli, A. (1993). Utilisation de la graine de *Moringa*, essais de flocculation au laboratoire et en vraie grandeur (Série hydraulique urbaine et assainissement, 132 p.). CIEH/EIER/OIEau.
- Fahey, J. W. (2005). *Moringa oleifera*: A Review of the Medical Evidence for Its Nutritional, Therapeutic, and Prophylactic Properties. Part 1.
- Falowo, A. B., Mukumbo, F. E., Idamokoro, E. M., Lorenzo, J. M., Afolayan, A. J., Muchenje, V. (2018). Multi-functional application of *Moringa oleifera Lam.* in nutrition and animal food products: A review. *Food Research International*, 106, 317-334.
- Fatombi JK, Jossé RG, Wotto V, Aminou T, Coulomb B. (2007). Paramètres physico-chimiques de l'eau d'Opkara traitée par les graines de *Moringa oleifera*. Journal-Société Ouest Africaine de Chimie 23 : 75
- Foidl N, Makkar HPS, Becker K.(2001). Potentiel de *Moringa oleifera* en agriculture et dans l'industrie. Actes du séminaire sur *Moringa oleifera* du, 29. Dar el Salaam, Tanzanie.
- Gerba, C. P. and Pepper, I. L. (2015). Municipal Wastewater Treatment. 3rd edn, environmental Microbiology: Third Edition. 3rd edn. Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-394626-3.00025-9.
- Gohil, J. M. and Choudhury, R. R. (2018). Introduction to Nanostructured and Nano-enhanced Polymeric Membranes: Preparation, Function, and Application for Water Purification, Nanoscale Materials in Water Purification. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-813926-4.00038-0.
- Gope, M. and Saha, R. (2021). Removal of heavy metals from industrial effluents by using biochar, Intelligent Environmental Data Monitoring for Pollution Management.elsevier Inc. doi: 10.1016/b978-0-12-819671-7.00002-6.
- Gaujous, didier. (1995). La pollution des milieux aquatique (2émé). Technique et documentation LAVOISIER.

## Références Bibliographiques

---

- **Grangeiro, L. C. et al. (2019).** ‘New trends in biogas production and utilization’, Sustainable Bioenergy: Advances and Impacts, pp. 199–223.doi: 10.1016/B978-0-12817654-2.00007-1.
- **Grizzetti, B. et al. (2016).** ‘Assessing water ecosystem services for water resource management’, Environmental Science and Policy, 61, pp. 194–203.doi:10.1016/j.envsci.2016.04.008.
- **Guiraud, J. P. (1998).** Microbiologie alimentaire. Paris: Lavoisier, Technique et Documentation / Édition DUNOD.
- **Hadj-Sadok,ZM. (1999).** Modélisation et estimation dans les bioréacteurs ; prise en compte des incertitudes : application au traitement de l'eau. Thèse de doctorat.Université de Nice Sophia Antipolis, France. 293p
- Hannachi, A., et al. (2016). Essai de valorisation des eaux usées traitées en culture hydroponique
- **Harimalala-Andriambelo N, Lafarge C, Saurel R, et Razanamparany L. J .(2015).** Analyse du profil de texture (tpa) et caractérisation physicochimique des pâtes de tamarin enrichies en feuilles de *Moringa oleifera*. Afrique science 12 : 66-75.
- **Hénault-éthier,L.(2016).** La phytoremédiation. Société québécoise de phytotechnologie, Fiches techniques de la SQP.
- **Hendrawati, Yuliastri, I. R., Nurhasni, Rohaeti, E., Effendi, H., Darusman, L. K. (2016).** The use of *Moringa Oleifera* Seed Powder as Coagulant to Improve the Quality of Wastewater and Ground Water. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 31, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/31/1/012033>.
- **Henry, M., Beaudry, J. (1992).** Chimie des eaux. Le Griffon d'Argile.
- **Fakeye, H. M. (2008).** Étude de faisabilité du développement de la filière *Moringa oleifera*. Document d'origine, Direction de la Coopération Suisse au Bénin.
- **Jahn, S. A. A. (1988).** Using *Moringa* seeds as coagulants in developing countries. Journal of the American Water Works Association, 80, 43–50.
- **James, A., & Zikankuba, V. (2017).** *Moringa oleifera* a potential tree for nutrition security in sub-Saharan Africa. American Journal of Research Communication, 5(4), 1-14.

## Références Bibliographiques

---

- **Kabore A, Savadago B, Rosillon F, Straore A, Dianou D .(2013).** Optimisation de l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux de consommation en Afrique sub-saharienne : cas des eaux du Burkina Faso. Journal of Water Science 26 : 209-220.
- **Kadhim E. J, AL-Shammaa D. A.(2014).** Phytochemical characterization using GC-MS analysis of methanolic extract of *Moringa oleifera* (Family Moringaceae) plant cultivated in Iraq. Chem Mater Res 6: 9-26.
- **Kaki M, Mimouni A. (2018).** Essai de production de *Moringa oleifera* pour une éventuelle amélioration de la ration alimentaire. Mémoire de Master en sciences agronomiques. Université Kasdi Merbah Ouargla.6p
- **Kalonga, R. K., Katala, M. M., Mungu, D.B. S. K. (s. d.).** Effet d'un traitement couplant la coagulation-flocculation par la poudre des graines de *Moringa oleifera Lam.* Et la filtration sur sable fin associé au charbon de bois sur la purification des eaux de la rivière Kalamu à Kinshasa.
- **Karastogianni, S., Girousi, S., Sotiropoulos, S. (2016).** pH : Principles and Measurement. In Encyclopedia of Food and Health (p. 333 338). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00538-9>.
- **Kashyap, P., Kumar, S., Riar, C. S., Jindal, N., Baniwal, P., Guiné, R. P. F., Correia, P. M. R., Mehra, R., Kumar, H. (2022).** Recent Advances in Drumstick (*Moringa oleifera*) Leaves Bioactive Compounds : Composition, Health Benefits, Bioaccessibility, and Dietary Applications. Antioxidants, 11(2), 402. <https://doi.org/10.3390/antiox11020402>.
- **Kitheka, J. U., Mutinda, J. M., Musyoka, S. M., Muendo, B. M. (2022).** The effectiveness of *Moringa oleifera* seed powder in reducing turbidity and improving the physicochemical characteristics of wastewater. African Journal of Environmental Science and Technology, 16(1), 1–11. <https://doi.org/10.5897/AJEST2021.3027>.
- **Khawaja, T. M., Mugal, T., Haq, I. U. (2010).** *Moringa oleifera*: a natural gift – A review. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, 2(11), 775–781.
- **Klimek-Szczykutowicz, M., Gaweł-Bęben, K., Rutka, A., Blicharska, E., Tatarczak-Michalewska, M., Kulik-Siarek, K., Kukula-Koch, W., Malinowska, M. A., Szopa, A. (2024).** *Moringa oleifera* (drumstick tree)—

## Références Bibliographiques

---

- nutraceutical, cosmetological and medicinal importance : A review. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1288382. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1288382>.
- **Koolheat, N., Sranujit, R., Chumark, P., Potup, P., Laytragoon-Lewin, N., Usuwanthim, K. (2014).** An Ethyl Acetate Fraction of *Moringa oleifera Lam.* Inhibits Human Macrophage Cytokine Production Induced by Cigarette Smoke. *Nutrients*, 6(2), 697-710. <https://doi.org/10.3390/nu6020697>.
  - **Kumar, M., Borah, P. and Devi, P. (2020)** ‘Priority and emerging pollutants in water’, inorganic Pollutants in Water, pp. 33–49.doi: 10.1016/b978-0-12-818965-8.00003-2.
  - **Lagnika, M., Ibikounle, M., Montcho, J. C., Wotto, V. D., Sakiti, N. G. (2014).** Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobè (Bénin, Afrique de l'ouest). *Journal of Applied Biosciences*, 79(1), 6887. <https://doi.org/10.4314/jab.v79i1.13>.
  - **Laleye, O. A. F., Ahissou, H., Olounlade, A. P., Azando, E. V. B., Laleye, A. (2016).** Etude bibliographique de trois plantes antidiabétiques de la flore béninoise : *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss (Meliaceae), *Momordica charantia* Linn (Cucurbitaceae) et *Moringa oleifera Lam* (Moringaceae). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(5), 2682.
  - **Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., Bertoli, S. (2016).** *Moringa oleifera* Seeds and Oil : Characteristics and Uses for Human Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(12), 2141. <https://doi.org/10.3390/ijms17122141>.
  - **Liñan, T. F. (2010).** *Moringa oleifera* El árbol de la nutrición. Ciencia y salud virtual, 2(1), 130-138. Retrieved from <http://www.curn.edu.co/journals/index.php/cienciaysalud> / article/view/70.
  - **Louni, S. (2009).** Extraction et caractérisation physico- chimique de l'huile de graines de *Moringa oleifera*.
  - **Mancer,H. (2010).** Analyse du pouvoir Epurateur de quelques plantes Macrophytes dans les régions arides. Mémoire de Magister. Université Khider Mohamed. Bisekra.105p.
  - **Mancini, G., Roccaro, P., et Vagliasindi, F. G. A. (2005).** Water intended for human consumption - Part II: Treatment alternatives, monitoring issues and

## Références Bibliographiques

---

- resulting costs. Desalination, 176(1–3) SPEC. ISS.), 143–153.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.007>.
- **Mareddy, A. R. (2017)** Impacts on water environment, Environmental Impact assessment. doi: 10.1016/b978-0-12-811139-0.00006-2.
  - **Mariod, A. A., Osmana, N. A. E. E., Ahmad, E. E. M. (2022)**. Antimicrobial activity of moringa peregrina seed oil : Chemical composition and effect of extraction procedure. *Functional Foods in Health and Disease*, 12(6), 283.
  - **Mbikay, M. (2012)**. Therapeutic Potential of *Moringa Oleifera* Leaves in Chronic Hyperglycemia and Dyslipidemia : A Review. *Frontiers in Pharmacology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fphar.2012.00024>.
  - **Meenakshi M, Manjunatha BM, Manjunath NT. (2015)**. Performance Assessment *Moringa Oleifera* and other locally available seeds in Fiji for heavy metal removal. *International Journal of Applied* 2 :125-129.
  - **Metcalf and Eddy, Inc., Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R. et Tchobanoglous, G. (2007)**. Water reuse (pp. 6–15). É.-U. : McGraw-Hill Professional Publishing.
  - **Moussaoui, A., et Benhabib, A. (2015)**. La réutilisation des eaux usées traitées et l'agriculture : Les entreprises familiales comme une alternative de développement en Algérie.
  - **Mujawamariya,M. (2012)**. Optimisation de la décantation primaire par ajout de produits chimiques – Jar-Tests ; département de génie civil et de génie des eaux, Pavillon Adrien-Pouliot, Université Laval, 1065, av. de la médecine Québec, Canada.
  - **Nand, V., Maata, M., Koshy, K., Sotheswaran, S. (2012)**. Water purification using *Moringa oleifera* and other locally available seeds in Fiji for heavy metal removal. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(5), 125–131. <https://www.researchgate.net/publication/251946144>
  - **Nargis, N., Koul, B., Koul, B. (2020)**. application of *Moringa oleifera lam.* seeds in wastewater treatment. plant archives,21(supplement).  
<https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.S1.393>.

## Références Bibliographiques

---

- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., et Talbot, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. Water Research, 29(2), 703–710.
- Ngbolua, K.-N., Pambu, A. L., Mbutuku, L. S., Nzapo, H. K., Bongo, G. N., Muamba, B., Falanga, C. M., Gbolo, Z. B., Mpiana, P. T. (s. d.). Etude comparée de l'activité floculante de *Moringa oleifera* et *Vetivera zizanoides* dans la clarification des eaux de mare au plateau de Batéké, République Démocratique du Congo.
- Nguyen, P. Q., et al. (2018). Engineered Living Materials: Prospects and challenges for using biological systems to direct the assembly of smart materials. Advanced Materials, 30(19), 1–34. <https://doi.org/10.1002/adma.201704847>.
- Nhut, H. T., Hung, N. T. Q., Lap, B. Q., Han, L. T. N., Tri, T. Q., Bang, N. H. K., Hiep, N. T., Ky, N. M. (2021). Use of *Moringa oleifera* seeds powder as bio-coagulants for the surface water treatment. International Journal of Environmental Science and Technology, 18(8), 2173 - 2180. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02935-2>.
- Norström, A. (2005). Treatment of domestic wastewater using microbiological processes and hydroponics in Sweden. Doctorat thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden. 62p.
- Obiefuna, G., & Orazulike, D. (2010). Physicochemical Characteristics of groundwater quality from Yola Area, Northeastern Nigeria. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 14(1). <https://doi.org/10.4314/jasem.v14i1.56468>.
- Olusola, A. A., Abdulkareem, F., Adeyinka, S., Yusuff, A., Mayowa, L., et Akindele, O. (2019). Response surface methodology approach to optimization of process parameter for coagulation process of surface water using *Moringa oleifera* seed. South African Journal of Civil Engineering.
- Outani, B. A., Adamou, H., Mahamadou, A., Delmas, P. (2023). *Moringa (Moringa oleifera Lam)*: A Review on its Importance Worldwide. East African Scholars Journal of Agriculture and Life Sciences, 6(07), 112-120.

## Références Bibliographiques

---

- **Owon, M., Osman, M., Ibrahim, A., Salama Mohamed, A., Bertrand, M.** (2021). Characterisation of different parts from *Moringa oleifera* regarding protein, lipid composition and extractable phenolic compounds.
- **Pavithra, K. G., et al.** (2019). Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75(March), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.011>.
- **Perumalsamy, H., Balusamy, S. R., Sukweenadhi, J., Nag, S., MubarakAli, D., El-Agamy Farh, M., Vijay, H., Rahimi, S.** (2024). A comprehensive review on *Moringa oleifera* nanoparticles: Importance of polyphenols in nanoparticle synthesis, nanoparticle efficacy and their applications. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02332-8>.
- **Pivokonský, M., Novotná, K., Čermáková, L., Petříček, R.** (2022). Jar Tests for Water Treatment Optimisation : How to Perform Jar Tests – a handbook. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789062694>.
- **Prajapati, C., Ankola, M., Upadhyay, T. K., Sharangi, A. B., Alabdallah, N. M., Al-Saeed, F. A., Muzammil, K., Saeed, M.** (2022). *Moringa oleifera* : Miracle Plant with a Plethora of Medicinal, Therapeutic, and Economic Importance. *Horticulturae*, 8(6), 492.
- **Price, M. L.** (2007). Le *Moringa*. Note technique-ECHO (revue en 2000, en 2002 et en 2007).
- **Quesada, H. B. et al.** (2019). ‘Acetaminophen adsorption using a low-cost adsorbent prepared from modified residues of *Moringa oleifera Lam.* seed husks’, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(10), pp. 3147–3157. doi:10.1002/jctb.6121.
- **Ravikumar K., Sheeja AK.** (2013). Heavy Metal Removal from Water using *Moringa Oleifera* Seed Coagulant and Double Filtration. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 4:10-13.
- **Roccaro, P., Mancini, G., et Vagliasindi, F. G. A.** (2005). Water intended for human consumption - Part I: Compliance with European water quality standards. *Desalination*, 176(1–3) SPEC. ISS.), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.010>.

## Références Bibliographiques

---

- **Rodier, J., Bazin, C., Chambon, P., Broutin, G.-P., Champsaur, H., Rodi, L.** (2005). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (8<sup>e</sup> éd.). Paris : DUNOD Technique.
- **Rosman, N., et al.** (2018). Hybrid membrane filtration–advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residue. *Journal of Colloid and Interface Science*, 532, 236–260. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.118>.
- **Saa, R. W., Fombang, E. N., Ndjantou, E. B., Njintang, N. Y.** (2019). Treatments and uses of *Moringa oleifera* seeds in human nutrition : A review. *Food Science & Nutrition*, 7(6), 1911–1919. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1057>.
- **Saini, R. K., Sivanesan, I., Keum, Y. S.** (2016). Phytochemicals of *Moringa oleifera*: a review of their nutritional, therapeutic and industrial significance. *3 Biotech*, 6(2), 203. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0526-3>.
- **Sánchez-Muñoz, M., Valdez-Solana, M., Avitia-Domínguez, C., Ramírez-Baca, P., Candelas-Cadillo, M., Aguilera-Ortíz, M., Meza-Velázquez, J., Téllez-Valencia, A., Sierra-Campos, E.** (2017). Utility of Milk Coagulant Enzyme of *Moringa oleifera* Seed in Cheese Production from Soy and Skim Milks. *Foods*, 6(8), 62. <https://doi.org/10.3390/foods6080062> Security in sub-Saharan Africa. American Journal of Research Communication 5: 1-14.
- **Shahzad, M.A.B., Basra, Z., Iqbal, K.-ur-R., Hafeez-Ur-Rehman, M.F., Ejaz,(** 2014). Time course changes in pH, electrical conductivity and heavy metals (Pb, Cr) of wastewater using *Moringa oleifera Lam.* seed and alum, a comparative evaluation. 12, 560–567. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71635-9](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71635-9).
- **Sorokhaibam, L. G., Ahmaruzzaman, M.** (2014). Phenolic wastewater treatment: Development and applications of new adsorbent materials. In Industrial wastewater treatment, recycling and reuse . Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00008-8>
- **Srivastava, M., Dhakad, P. K., Srivastava, B.** (2020). A Review on Medicinal Constituents and Therapeutic Potential of *Moringa oleifera*. *Universal Journal of Plant Science*, 8(2), 22-33.
- **Stimm, B., Roloff, A., Lang, U. M., Weisgerber, H. (Éds.).** (2014). Enzyklopädie der Holzgewächse : Handbuch und Atlas der Dendrologie (1<sup>re</sup> éd.). Wiley.

## Références Bibliographiques

---

- Sun, Y., Zhou, S., Chiang, P.-C., et Shah, K. J. (2019). Evaluation and optimization of enhanced coagulation process: Water and energy nexus. *Water-Energy Nexus*, 2, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.01.001>.
- Su, X., Lu, G., Ye, L., Shi, R., Zhu, M., Yu, X., Li, Z., Jia, X., Feng, L. (2023). *Moringa oleifera Lam.* : A comprehensive review on active components, health benefits and application. *RSC Advances*, 13(35), 2435324384.<https://doi.org/10.1039/D3RA03584K>.
- Tambone F, Pradella M, Bedussi F, Adani F (2019) *Moringa oleifera Lam.* as an energy crop for biogas production in developing countries. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Taouati, L. (2021). Cours de pollution des eaux. université des frères mentouri.
- The incredible queen of green: Nutritive value and therapeutic potential of *Moringa oleifera Lam.* (2015). *Journal of Coastal Life Medicine*, 3(9), 744-751.
- Ueda Yamaguchi, N., et al. (2021). A review of *Moringa oleifera* seeds in water treatment: Trends and future challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 405–420.
- Velázquez-Zavala, M. et al. (2016) ‘*Moringa (Moringa oleifera Lam.)*: Potential uses in agriculture, industry and medicine’, *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 22(2), pp. 95– 116. <https://doi:10.5154/r.rchsh.2015.07.018>.
- Vilaseca M, López-Grimau V, Gutiérrez-Bouzán C (2014) Valorization of waste obtained from oil extraction in *Moringa oleifera* seeds: coagulation of reactive dyes in textile effluents. *Materials* 7: 6569-6584.
- Vogel, K. E. (2006) ‘Chapter 14 Biological treatment 14.1’, *Wetland Systems to Control Urban Runoff*, 100, pp. 81–83. doi: 10.1016/B978-0-444-52734-9.50017-7.
- Xinyue S., Guanzheng L., Lu L., Ye Ruyu S., Maomao Z., Xinming Y., Zhiyong L., Xiaobin J., Liang F., (2023) ; *Moringa oleifera Lam.* : Une revue complète des composants actifs, des bienfaits pour la santé et de leurs applications ; *RSC Adv.* 11 août 2023 ; 13(35) : 24353–24384.

## Références Bibliographiques

---

- **Yang, R.-Y., Chang, L.-C., Hsu, J.-C., Weng, B. B. C., Palada, C., Chadha, M. L., Levasseur, V.** (2006). Propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des feuilles de *Moringa* – Du germoplasme, à la plante, à l'aliment et à la santé.
- **Yargeau, V.** (2012). ‘Water and wastewater treatment: Chemical processes’, Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment, 1854, pp. 390–405.doi: 10.1533/9780857096463.3.390
- **Yusoff, M. A. M., Lee, C. W. and Bong, C. W.** (2019). ‘Analysis of water treatment by *Moringa oleifera* bioflocculant prepared via supercritical fluid extraction’, Polish Journal of Environmental Studies, 28(4), pp. 2995–3002.doi: 10.15244/pjoes/92119.
- **Zongo, U., Savadogo, A., Zoungrana, S. L., Sékoné, P. L., & Traoré, A. S.** (2013). Intérêt nutritionnel de *Moringa oleifera Lam.*(syn. *Moringa pterygosperma* CF Gaertn.). *Ethnopharmacologia*, 50, 31-38.
- **Zorzanelli, R. F. F., Raucci, M. L. S., Furieri, L. G., & Cerminato, V. R.** (2022). Impact of *Moringa oleifera* Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water. Water, 14(13), 2058. <https://doi.org/10.3390/w14132058>.

## *Annexes*

**Annexe 01**

**Arrêté interministériel correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation, paramètres physicochimiques**

PARAMETRES		UNITE	CONCENTRATION MAXIMALE ADMISSIBLE
Physiques	Ph	-	6.5 ≤ pH ≤ 8.5
	MES	mg/l	30
	Cl	mg/l	3
	Infiltration le SAR = 0 – 3		0.2
	3 - 6		0.3
	6 - 12	ds/m	0.5
Chimiques	12 - 20		13
	20 – 40		3
	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	CHI.ORURE (Cl)	meq/l	200
Éléments toxiques (*)	AZOTE (NO <sub>3</sub> - N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> )	meq/l	8.5
	Aluminium	mg/l	20.0
	Arsenic	mg/l	2.0
	Béryllium	mg/l	0.5
	Bore	mg/l	2.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Chrome	mg/l	1.0
	Cobalt	mg/l	5.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fluor	mg/l	15.0
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Plomb	mg/l	10.0
	Lithium	mg/l	2.5
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Molybdène	mg/l	0.05
	Nickel	mg/l	2.0
	Sélénium	mg/l	0.02
	Vanadium	mg/l	1.0
	Zinc	mg/l	10.0

## Annexe 2

Résultats de l'analyse de variance au seuil 5%, pour la variable potentiel hydrogène (pH) en fonction type d'eau par tests Tukey avant et après l'ajoute de la poudre de *Moringa oleifera*

### Analyse de variance

Source	DL	Somme des Carré	Valeur F	Valeur de p
Type eau	3	0,3051	1,41	0,241
Erreur	218	15,7500		
Total	221	16,0551		

### Moyenne, écart type et groupes homogènes

Type eau	N	Moyenne	Ecart Type	Groupement
Brute	108	7,7784	0,1817	A
Brute S	3	8,000	0,000	A
Sortie	108	7,8118	0,3379	A
sortie S	3	8,000	0,000	A

### **Annexe 03**

**Résultats de l'analyse de variance au seuil 5%, pour la variable conductivité électrique en fonction de condition par tests tukey avant et après l'ajoute de la poudre de *Moringa oleifera***

#### **Analyse de variance**

Source	DL	Somme des carrés	Valeur F	Valeur de p
Type Eau	3	882662	55,47	0,000
Erreur	218	1156360		
Total	221	2039021		

#### **Moyenne, écart type et groupes homogènes**

Type Eau	N	Moyenne	Ecart Type	Groupement
Brute	108	1549,46	103,81	A
Brute S	3	1560,01	0,01	A
Sortie S	3	1560,01	0,01	A
Sortie	3	1423,91	5,44	B

## **Annexe 04**

**Résultats de l'analyse de variance au seuil 5%, pour la variable Turbidité en fonction de type d'eau, la concentration de la poudre de *Moringa oleifera* et l'interaction type d'eau \*concentration par tests tukey**

### **Analyse de variance**

Source	DL	Somme des Carrés	Valeur F	Valeur de p
Type Eau	1	6132	214,01	0,000
CM(g)	5	8200	57,23	0,000
Type Eau*CM(g)	5	5988	41,80	0,000
Erreur	204	5845		
Total	215	26165		

## **Annexe 05**

**Résultats de l'analyse de variance au seuil 5%, pour la variable Turbidité en fonction  
la concentration de la poudre de *Moringa oleifera***

### **Analyse de variance**

Source	DL	Somme des Carrés	Valeur F	Valeur de p
CM(g)	6	54203	30,77	0,000
Erreur	215	63119		
Total	221	117322		

### **Moyenne, écart type et groupes homogènes**

CM(g)	N	Moyenne	Ecart Type	Groupement
0,000	6	107,3	95,0	A
0,004	36	30,68	14,04	B
0,200	36	18,46	10,41	C
0,500	36	11,473	4,846	C
0,800	36	13,147	5,382	C
1,000	36	17,73	7,31	C
2,000	36	19,38	10,09	C

## **Annexe 06**

**Taux de réduction de turbidité de chaque dose de la poudre de *Moringa oleifera* pour l'eau brute et l'eau de sortie**

	<b>0,004g</b>	<b>0,2g</b>	<b>0,5g</b>	<b>0,8g</b>	<b>1g</b>	<b>2g</b>
<b>Eau brute</b>	<b>77%</b>	<b>87%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>	<b>92%</b>
<b>Eau de sortie</b>	<b>24%</b>	<b>62%</b>	<b>75%</b>	<b>71%</b>	<b>45%</b>	<b>61%</b>

**Année universitaire : 2024-2025**

**Présenté par :** GOUMRI Hadil  
HIMEUR Khadidja

## **Optimisation de la concentration de la poudre de *Moringa oleifera* pour une meilleure efficacité de coagulation dans le traitement des eaux**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Biotechnologie et Génomique Végétale**

### **Résumé**

Le *Moringa oleifera*, couramment surnommé arbre miracle ou arbre aux mille vertus, est une plante reconnue pour ses multiples propriétés, en particulier pour son potentiel dans le traitement de l'eau.

Une étude a été menée sur des eaux usées provenant de la station d'épuration STEP Iben Ziad de Constantine, en comparant les caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes à l'entrée de la station et des eaux traitées à la sortie. Les analyses ont révélé que les eaux brutes sont fortement polluées, et bien que le traitement conventionnel permette une réduction partielle de la turbidité, les valeurs restent supérieures aux normes algériennes ce qui rend ces eaux improches à l'irrigation. L'ajout de la poudre de *Moringa oleifera* a permis une amélioration significative de la qualité de l'eau. La dose optimale de coagulant a été déterminée à 1 g/L dans l'eau brute avec un taux d'abattement 95%, tandis que pour l'eau de sortie, la dose optimale 0.5g/l avec un taux d'abattement 75%. La turbidité diminue fortement en 30 min, puis plus lentement jusqu'à 180 min. Par ailleurs, aucun changement notable n'a été observé concernant le pH. En revanche, une différence hautement significative a été observée dans la conductivité de l'eau de sortie après l'ajout de *Moringa oleifera*, ce qui suggère une modification de la composition ionique résiduelle. Les résultats obtenus avec le traitement au *Moringa oleifera* sont très prometteurs. Une turbidité finale de 5,00 NTU, correspondant au seuil réglementaire, témoigne de l'efficacité du procédé et confirme le fort potentiel de cette plante dans l'amélioration de la qualité de l'eau.

**Mots-clés :** *Moringa oleifera*, eaux usées, station d'épuration, eau brute, l'eau de sortie, paramètre physico-chimique, coagulation-flocculation.

**Laboratoires de recherche :** Laboratoire des ateliers de la Faculté : Génie des Procédés  
Université Constantine 3 Salah Boubenider.

### **Jury d'évaluation :**

**Président du jury :** Dr BAZIZ Karim (MCA - U Mostepha Ben Boulaid, Batna 2.).

**Encadrant :** Dr KACEM Nadia Sandra (MCA- U Constantine 1 Frères Mentouri).

**Examinateur(s) :** Pr HAMMOUDA Dounia (Pr - U Constantine 1 Frères Mentouri).

**Date de soutenance :** 24/06/2025