

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCÉDES**

**Spécialité : Génie de l'environnement**

Intitulé du mémoire

**COAGULATION-FLOCCULATION DES ACIDES  
HUMIQUES PAR UN BIOCOAGULANT :  
LA POUDRE DES GRAINES DE *MORINGA OLEIFERA***

**Présenté par :**

BELKACEM Soumia

BENSAIFI Hanane

**Encadré par :**

Dr. N. TAOUALIT

Dr. N. BENSASSIA

Année universitaire 2020/2021

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقليل الأحماض الدبالية في المحلول المائي عن طريق عملية التخثر والتلبد باستخدام اثنين من مواد التخثر: كبريتات الألومنيوم وبذور المورينجا أوليفيرا. تم اجراء دراسة تحديد عوامل تخثر و تلبد الاحماض الدبالية عن طريق تغيير درجة حموضة المحلول و جرعة المخثر و وقت الترسب. تم تحديد خصائص المخثر الطبيعي (بذور المورينجا أوليفيرا) باستخدام التحليل الطيفي لتحويل فورييه وتحديد الأس الهيدروجيني. أظهرت التجارب التي تم إجراؤها أن بذور المورينجا أوليفيرا لها كفاءة ملحوظة في مجال معالجة المياه ويمكن اعتبارها بديلاً للمخثر الاصطناعي. كلمات المفتاح: التلبد التخثر ، الأحماض الدبالية ، المورينجا أوليفيرا.

## Abstract

The main objective of this study is the reduction of humic acids (HA) in aqueous solution by the coagulation-flocculation process using two coagulants: Aluminum sulfate and Moringa Oleifera seeds.

A parametric study of HA coagulation-flocculation was carried out by varying the pH of the solution, the dose of the coagulant, the settling time, etc.

The natural coagulant (Moringa Oleifera seeds) was characterized using Fourier transform spectroscopy (FTIR) and the determination of pH<sub>pzc</sub>.

The experiments carried out have shown that the seeds of Moringa Oleifera have a remarkable efficiency in the field of water treatment and can be considered as an alternative to synthesized coagulants.

**Keywords:** coagulation flocculation, coagulant, humic acids, Moringa Oleifera.

## Résumé

L'objectif principal de la présente étude est la réduction des acides humiques(AH) en solution aqueuse par le procédé de coagulation-floculation en utilisant deux coagulants : le sulfate d'Aluminium et les graines de Moringa Oleifera.

Une étude paramétrique de la coagulation-floculation des AH a été réalisée en faisant varier le pH de la solution, la dose du coagulant, le temps de décantation....

Le coagulant naturel (graines de Moringa Oleifera) a été caractérisé en utilisant la spectroscopie à transformée de Fourier (FTIR) et par la détermination du pH<sub>pzc</sub>.

Les expériences réalisées ont montré que les graines de Moringa Oleifera possèdent une efficacité remarquable dans le domaine de traitement des eaux et peuvent être considérés comme alternatif aux coagulants synthésés.

**Mots clés :** coagulation floculation, coagulant, les acides humiques, Moringa Oleifera.

## **Remerciements**

*Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU le tout puissant et miséricordieux, qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude et l'accomplissement de ce présent mémoire.*

*Nous tenons à remercier notre promotrice Madame **Taoualît Nedjet**, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses grandes compétences autant pédagogiques que scientifiques, pour ses conseils, ses remarques fructueuses et nous la remercions vivement pour sa gentillesse et ses encouragements. Tout notre respect et notre gratitude, merci.*

*Nous remercions aussi chaleureusement notre co-promotrice Madame **Bensassia Nabila** pour ses orientations.*

*Nous remercions également les ingénieurs de laboratoire Mr **Dahmouche Rachid**, Madame **Terradi Nafissa**, pour leur disponibilité ainsi que pour nous avoir accueillis dans d'excellentes conditions de travail, nous leur exprimons notre gratitude.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Un grand merci à nos familles pour leurs soutiens aussi bien pour leurs amours et leurs sacrifices.*

*Nous tenons à remercier vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation universitaire en général et ceux du département de **Génie des Procédés** en particulier.*

*Nous présentons également nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU, le tout puissant qui m'a ouvert les portes du savoir et m'a permis de réaliser ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père **Djillali** et ma mère **Assia** ;*

*Je te dis merci maman du fond de mon cœur pour ton tout éducation, ton sacrifice, ton assistance, ta patience, ton courage et pour ce tu m'as fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur ;*

*Je te dis merci mon cher père qui n'a cessé de m'aider avec son indéfectible soutien ;*

*Avec toute ma fidélité et tout mon amour pour vous, mes parents, je ne pourrai jamais égaler votre mérite ;*

*Je dédie ce travail aussi :*

*A mes sœurs : **Yassmina, Fathia, Assia, Naima, Amina et Nadjua** et leurs enfants : **Salsabil, Abdelkader, Malak, Wissal, Midou, Chiraz, Wassim, Dhoha, Hamza, Ibrahim et Nouh** ;*

*A mes frères : **Mohammed, Ilias et Bilal** ;*

*A tout ma famille en témoignage de mon profond respect;*

*A tous mes amis (e) proche en particulier pour leurs conseils très précieux ;*

*A ma chère binôme **Soumia** et sa famille ;*

*A Tous ceux qui m'ont aidé, à tous ceux que j'aime bien j'adresse mes sentiments les plus chaleureux*

**HANANE**



## Dédicaces

*Tout d'abord, je tiens à remercier **DIEU**, le tout puissant qui m'a ouvert les portes du savoir et m'a permis de réaliser ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père **M'hamed** et ma mère **Naima**, qui ont tout fait, pour moi pour arriver à cette place, je vous dis merci du fond de mon cœur pour tous vos sacrifices, votre amour, votre tendresse, votre soutien, votre patience tout au long de mes études, sans votre soutien ce mémoire ne serait jamais devenue une réalité, Je vous remercie d'avoir été toujours là pour moi. Avec toute ma fidélité et tout mon amour pour vous, mes parents, je ne pourrai jamais égaler votre mérite. Que dieu vous bénisse.*

*Je dédie ce travail aussi :*

*A ma chère sœur **Khadidja** qui m'a toujours soutenue et encouragé ainsi que sa petite famille ;*

*A mes chère frères : **Abdelhafid, Abdelhalim, Abdelkader** et sa femme **Hafsa** pour leur appui et encouragement ;*

*A mon fiancé **Mohamed** pour son soutien moral ainsi que sa famille ;*

*A mon neveu **Racim** et Ma nièce **Maria** ;*

*A tous les membres de ma famille et mes proches ;*

*A ma chère binôme **Hanane** et sa famille ;*

*A tous mes amies, et mes collègues de la promotion 2<sup>ème</sup> année master spécialité génie de l'environnement ;*

*A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

**SOUMIA**



## Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction Générale	1
<b>Chapitre 1 : Coagulation-Floculation</b>	
1.1. Mécanisme de la coagulation floculation	3
1.2. Particules mis en jeu	3
1.3. Suspensions colloïdales	4
1.4. Décantation des suspensions colloïdales	4
1.5. Théorie de la double couche	6
1.6. Potentiel zêta	7
1.7. Facteurs influençant la coagulation	7
1.7.1. Influence du pH	7
1.7.2. Influence de la dose du coagulant	8
1.7.3. Influence de condition de mélange	8
1.7.4. Influence des sels dissous	8
1.7.5. Influence de la température	8
1.7.6. Influence de la turbidité	8
1.8. Phénomène de la coagulation	9
1.8.1. Coagulants	11
1.8.2. Avantages et inconvénients des coagulants	12
1.8.2.1. Sulfate d'aluminium	12
1.8.2.2. Chlorure de fer	12
1.9. Floculation	13
1.10. Types de floculation	13
1.10.1. Flocculants	13
<b>Chapitre 2 : Moringa Oleifera</b>	
2.1. Historique et généralités sur le Moringa Oleifera	15

<b>2.2. Dénomination et taxonomie</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1. Différentes espèces de Moringa</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Importance socio-économique</b>	<b>16</b>
<b>2.4. Conditions écologiques</b>	<b>16</b>
<b>2.5. Utilisation des différents organes de Moringa Oleifera</b>	<b>17</b>
<b>2.6. Graines de Moringa Oleifera</b>	<b>18</b>
<b>2.7. Utilisation des graines de Moringa Oleifera dans la purification de l'eau</b>	<b>18</b>
<b>2.8. Avantages et inconvénients du Moringa Oleifera dans les traitements des eaux</b>	<b>18</b>
<b>2.8.1. Avantages</b>	<b>19</b>
<b>2.8.2. Inconvénients</b>	<b>20</b>

### **Chapitre 3 : Acides Humiques**

<b>3.1. Origine des substances humiques</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Composantes et caractéristiques des substances humiques (SH)</b>	<b>21</b>
<b>3.3. Acides humiques</b>	<b>22</b>
<b>3.4. Structure et propriétés des acides humiques</b>	<b>23</b>
<b>3.5. Effets indésirables et danger de la présence des AH dans les eaux</b>	<b>24</b>
<b>3.6. Techniques d'élimination des acides humiques</b>	<b>26</b>

### **Chapitre 4 : Matériels et méthodes**

<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Réactifs utilisés</b>	<b>27</b>
<b>4.2. Préparation de la solution d'acide humique et établissement de la courbe d'étalonnage</b>	<b>27</b>
<b>4.3. Coagulation-floculation des acides humiques</b>	<b>28</b>
<b>4.3.1. Description du jar-test</b>	<b>28</b>
<b>4.3.2. Mode opératoire</b>	<b>28</b>
<b>4.4. Étude paramétrique de la coagulation floculation des AH par le sulfate d'aluminium</b>	<b>29</b>
<b>4.5. Étude paramétrique de la coagulation floculation des AH par le biocoagulant Moringa Oleifera</b>	<b>29</b>
<b>4.5.1. Préparation du biocoagulant</b>	<b>29</b>
<b>4.5.2. Effet de pH</b>	<b>30</b>

<b>4.5.3. Effet de la masse de biocoagulant</b>	<b>30</b>
<b>4.5.4. Effet de temps de décantation</b>	<b>30</b>
<b>4.6. Caractérisation du biocoagulant : la poudre de graine de Moringa Oleifera</b>	<b>30</b>
<b>4.6.1. Détermination de pH<sub>pzc</sub></b>	<b>31</b>

## **Chapitre 5 : Résultats et discussions**

<b>5.1. Caractérisation de Moringa Oleifera</b>	<b>32</b>
<b>5.1.1. Caractérisation par FTIR</b>	<b>32</b>
<b>5.1.2. Détermination de potentiel zêta</b>	<b>33</b>
<b>5.2. Étude paramétrique de la coagulation floculation des AH en utilisant le sulfate d'aluminium Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></b>	<b>34</b>
<b>5.2.1. Effet de pH</b>	<b>34</b>
<b>5.2.2. Influence de la dose de biocoagulant</b>	<b>38</b>
<b>5.3. Étude paramétrique de la coagulation-floculation en utilisant les graines de Moringa comme biocoagulant</b>	<b>38</b>
<b>5.3.1. Influence de la masse de biocoagulant</b>	<b>38</b>
<b>5.3.2. Effet de pH</b>	<b>39</b>
<b>5.3.3. Effet de temps de décantation</b>	<b>40</b>
<b>5.4. Application des conditions optimales de la coagulation-floculation des AH présentes dans un échantillon du lixiviat par les deux coagulants</b>	<b>41</b>
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>43</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>44</b>
<b>Annexe</b>	

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES	<b>5</b>
<b>Tableau 2.1</b> : Classification botanique de Morinaga Oleifera	<b>16</b>
<b>Tableau 2.2</b> : Exigences environnementales de Moringa Oleifera	<b>17</b>
<b>Tableau 2.3</b> : Parties de la plante et leurs intérêts	<b>17</b>
<b>Tableau 2.4</b> : Composition chimique des graines de Moringa Oleifera	<b>18</b>
<b>Tableau 3.1</b> : Compositions des acides humiques (AH) et fulviques (AF) des sols, des milieux aquatiques des lixiviats	<b>24</b>
<b>Tableau 3.2</b> : Principaux procédés d'éliminations des AH	<b>26</b>
<b>Tableau 4.1</b> : Les différents réactifs utilisé	<b>27</b>
<b>Tableau 5.1</b> : Effet de la dose du biocoagulant sur la réduction des AH	<b>38</b>
<b>Tableau 5.2</b> : Effet de pH sur la réduction des AH	<b>39</b>
<b>Tableau 5.3</b> : Effet de temps de décantation des floccs d'AH	<b>41</b>
<b>Tableau 5.4</b> : Comparaison entre le sulfate d'aluminium et le Moringa	<b>41</b>
<b>Tableau 5.5</b> : Résultats de la coagulation-floculation des AH présents dans lixiviat	<b>42</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.1 :</b> Potentiel électrique de particules colloïdales	<b>6</b>
<b>Figure 1.2 :</b> Représentation schématique de la compression de la couche diffuse	<b>10</b>
<b>Figure 1.3 :</b> Représentation schématiques de neutralisation des charges	<b>10</b>
<b>Figure 1.4 :</b> Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation	<b>11</b>
<b>Figure 1.5 :</b> Adsorption et pontage à l'aide d'un polymère	<b>11</b>
<b>Figure 2.1 :</b> Graine de <i>Moringa Oleifera</i>	<b>18</b>
<b>Figure 3.1 :</b> Différentes classes de la matière organique	<b>22</b>
<b>Figure 3.2 :</b> Modèle d'un AH selon Stevenson (1982)	<b>23</b>
<b>Figure 4.1 :</b> AH en poudre	<b>28</b>
<b>Figure 4.2 :</b> (a) graine de <i>Moringa Oleifera</i> ; (b) Poudre de graines de <i>Moringa Oleifera</i>	<b>30</b>
<b>Figure 5.1 :</b> Spectre Infrarouge des graines de <i>Moringa Oleifera</i>	<b>32</b>
<b>Figure 5.2 :</b> Potentiel zêta en fonction du p	<b>34</b>
<b>Figure 5.3 :</b> Évolution du rendement d'élimination des AH en fonction de la variation du pH	<b>35</b>
<b>Figure 5.4 :</b> Coagulation flocculation des AH au différentes pH	<b>36</b>
<b>Figure 5.5 :</b> Diagramme de Pourbaix du sulfate d'aluminium	<b>37</b>
<b>Figure 5.6 :</b> Effet de la dose du coagulant sur la réduction AH	<b>38</b>
<b>Figure 5.7 :</b> Rendement d'élimination des AH par le bio-coagulant à différentes pH	<b>40</b>
<b>Figure 5.8 :</b> Échantillon de lixiviat traité par le biocoagulant	<b>42</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Malheureusement, aujourd'hui les ressources en eau sont soumises à diverses formes de pollution, l'on distingue la pollution naturelle due à la présence des débris végétaux et animaux (matière organique) et la pollution anthropique causée par l'activité humaine. Cette dernière peut être accidentelle ou générer volontairement à travers les rejets industriels, les pesticides, les engrais, etc. Si l'on peut contrôler voire limiter la pollution causée par l'activité humaine, il est difficile d'empêcher la présence de débris végétaux et animaux dont leur dégradation s'accompagne en effet de la production de biogaz, d'odeurs et de lixiviats[1-2].

Les effluents ou liquides de percolation de la décharge (lixiviats) sont chargés bactériologiquement et surtout chimiquement de substances minérales (ions minéraux et métaux lourds) et organiques notamment les acides gras volatils et substances humiques (un mélange d'acides humiques (AH) et fulviques (AF)) qui sont issue de la dégradation de la matière organique fraîche et qui constituent 25 à 50 % du carbone organique dissous (COD) des eaux de surface et parfois 90% dans certaines eaux très colorées[1-3].

Ces substances humiques véhiculées par les eaux, outre leur toxicité sur la faune aquatique, sur l'homme et les animaux, risquent de contaminer les sols, les eaux de surface et souterraines [2,4].

La présence d'AH dans une eau de consommation est un souci majeur car il représente un sérieux problème de santé publique. En effet, l'AH est responsable de la dégradation des caractères organoleptiques des eaux (couleur, goût et odeurs)[1]. Elles peuvent être un véhicule pour la plupart des substances toxiques (métaux lourds, pesticides...), participent également à la corrosion du système, et plus grave, lorsqu'une eau contenant l'AH subie la chloration, le chlore réagit avec les composés humiques pour former des organochlorés tels les trihalométhanes (THM) reconnus pour être cancérigènes et mutagènes [1,5].

Pour résoudre la pollution liée à la présence des AH dans l'eau, diverses méthodes de traitement ont été développées, telle que la coagulation-floculation, l'adsorption, l'échange ionique, les procédés membranaires ; les procédés biologiques, ... etc.

Dans le traitement des eaux la coagulation-floculation est le procédé le moins cher par rapport à la quantité de particules éliminées. En effet, ce procédé élimine à peu près 100% des particules initialement présentes [6].

Une récente étude américaine (CEN, 1990) montre que la demande en produits floculants augmente de 6,5 % par an pour atteindre aux USA 765 millions de dollars en l'an

2000. Ce procédé ancien est appelé à se développer, à se sophistication grâce à des efforts de recherche sur la chimie des coagulants-floculants reliée à la taille, la densité et la cohésion des floes [6].

Les coagulants utilisés sont des sels métalliques hydrolysables (aluminium ou fer(III)) et/ou des polymères organiques. Le résultat de la coagulation est une diminution du nombre initial des particules et une augmentation de la taille. Si l'efficacité dépend aussi du temps de contact, de l'énergie dissipée dans le réacteur, de sa géométrie, elle dépend surtout des propriétés chimiques et structurales des coagulants-floculants [6].

Les coagulants minéraux les plus employés sont le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique ce qui conduit à la production des boues riches (chargées) en aluminium / fer et même des concentrations élevées en aluminium ou fer dans l'eau traitée.

De nouveaux produits sont apparus depuis dix ans : ce sont les sels préhydrolysés d'aluminium (chlorure ou chlorosulfates), de fer (III) et les polymères organiques cationiques, anioniques ou nonioniques.

Chacun a été l'objet de nombreuses études à l'échelle tant du laboratoire, que pilote ou en grandeur réelle.

C'est dans ce contexte général que se propose cette étude ayant pour objectif principal l'étude de la possibilité d'utiliser la poudre des graines de Moringa Oleifera comme un coagulant naturel alternatif (biocoagulant).

Contrairement au sulfate d'aluminium, les boues obtenues après le traitement au Moringa Oleifera sont plus biodégradables et moins polluantes.

Ce manuscrit expose ce travail en cinq chapitres :

- ✓ Le chapitre 1 est consacré aux quelques rappels sur le procédé de la coagulation-floculation
- ✓ Le deuxième chapitre est sur les substances humiques : leur origine, composition et leurs effets indésirables
- ✓ Le chapitre 3 concerne des généralités sur le Moringa Oleifera
- ✓ Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des matériels, produits et méthodes utilisés dans ce travail. Les méthodes de caractérisation et les protocoles expérimentaux utilisés y sont présentés.
- ✓ Le chapitre 5 est consacré à la présentation des différents résultats obtenus.

À partir de l'interprétation générale des résultats expérimentaux, nous présentons une conclusion générale avec quelques perspectives à envisager pour la suite de ce travail.

# CHAPITRE 1 : COAGULATION-FLOCCULATION

## Introduction

La coagulation-floculation est un procédé physico-chimique visant la déstabilisation et l'agglomération des particules colloïdales présentes dans l'eau [7-9].

La coagulation-floculation facilite l'élimination des Matières En Suspension (MES) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration. C'est donc un traitement physique qui permet d'éliminer tous ou une partie des polluants des effluents notamment les fractions particulaires (la fraction associée aux particules dont la taille est supérieure à 0,45  $\mu\text{m}$ ), les fractions floculables des matières organiques et de certains métaux lourds ; les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales [9-11].

### 1.1.Mécanisme de la coagulation-floculation

Il existe quatre grands mécanismes élémentaires qui sont traditionnellement identifiés pour expliquer l'agglomération des particules et qui agissent individuellement ou ensemble dans la coagulation floculation. Il s'agit de [12] :

- a) Réduction de l'épaisseur de la couche ionique c'est-à-dire compression de la double couche: transportée par les particules, par augmentation de la force ionique de la solution.
- b) Adsorption et neutralisation des charges ioniques : par ajout d'un réactif chimique contenant des contre ions du colloïde ; le coagulant.
- c) Pontage entre les particules : par utilisation des polymères de haut poids moléculaire.
- d) Piégeage des particules : par formation de polymères d'hydroxydes minéraux volumineux.

### 1.2.Particules mis en jeu

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter sous les trois groupes suivants :

#### a) Matières en suspension MES

Qui regroupent les plus grosses particules. Ces matières sont d'origine minérale ou organique et possèdent un diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$ . Leur temps requis

pour décanter d'un mètre variant de quelques dixièmes de seconde à plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité [7].

#### **b) Matières colloïdales**

Elles sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ . Leur vitesse de décantation est pratiquement nulle. Les matières colloïdales d'origine minérale ont une densité relative de l'ordre de 2,65 alors que celles d'origine organique ont une densité relativement beaucoup plus faible, soit de l'ordre de 1,1. Les particules colloïdales de faible densité peuvent nécessiter théoriquement jusqu'à 66600 années pour décanter de un mètre [7].

#### **c) Matières dissoutes**

Elles sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre [7].

### **1.3.Suspensions colloïdales**

Les particules colloïdales sont divisées en deux catégories selon leur comportement dans l'eau en particules hydrophobes et hydrophiles [7].

#### ➤ **Colloïdes hydrophiles**

Ce sont des particules qui possèdent une forte affinité pour les molécules d'eau, les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourées de molécules d'eau qui préviennent tout contact ultérieur entre ces particules, elles sont souvent d'origine biologique : protéines, polysaccharides, lignine, matière humique....etc. elles sont plus difficiles à déstabiliser que les hydrophobes [7,13].

#### ➤ **Colloïdes hydrophobes**

Ce sont des particules qui ont peu ou pas d'affinité pour l'eau, leur dispersion dans l'eau n'étant pas spontanée [13]. Ce sont en général des particules minérales telles que la silice et les argiles [7].

### **1.4. Décantation des suspensions colloïdales**

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. Ce temps va d'une seconde pour du gravier coagulé ayant un diamètre de 10mm et une surface spécifique de  $6,102 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  à 20 ans pour du colloïde de  $10^{-2} \mu\text{m}$  ayant une surface spécifique de  $6,108 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ . Il est donc

impossible que certaines particules notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée décantent naturellement [11,14].

Dans le tableau 1.1 sont répertoriés certains matériaux ou organismes avec leur dimension et l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour que, sous la seule influence de leur poids, ces particules parcourent un mètre d'eau à 20°C [11].

**Tableau 1.1** : Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES [11,14, 15]

Diamètre de particules		Type de particule	Temps de décantation pour 1m d'eau	Surface spécifique (m <sup>2</sup> .m <sup>-3</sup> )	
mm	µm				
10	10 <sup>4</sup>	Gravier	1 seconde	6.10 <sup>2</sup>	MES
1	10 <sup>3</sup>	Sable	10 secondes	6.10 <sup>3</sup>	
10 <sup>-1</sup>	10 <sup>2</sup>	Sable fin	2 minutes	6.10 <sup>4</sup>	
10 <sup>-2</sup>	10	Limon	2 heures	6.10 <sup>5</sup>	
10 <sup>-2</sup>	10	Kyste de protozoaire	20 heures	6.10 <sup>5</sup>	Colloïdes
10 <sup>-3</sup>	1	Argile	2 jours	6.10 <sup>6</sup>	
10 <sup>-3</sup>	1	Bactérie	8 jours	6.10 <sup>6</sup>	
10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	Colloïde	2 ans	6.10 <sup>7</sup>	
10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup>	Colloïde	20 ans	6.10 <sup>8</sup>	

La chute d'une particule dans l'eau est régie par la loi de Stokes :

$$v = \frac{g}{18 \times \eta} \times (\rho_s - \rho_l) \times d^2 \quad \text{Équation 1.1}$$

Avec :

**V**: vitesse de décantation de la particule,

**g**: accélération de la pesanteur,

**η**: viscosité dynamique,

**ρ<sub>s</sub>**: masse volumique de la particule,

$\rho_l$ : masse volumique du liquide,

$d$ : diamètre de la particule[15].

### 1.5. Théorie de la double couche

Les colloïdes sont généralement chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde (Figure 1.1). Diverses théories expliquent ce phénomène [9,11, 16].

- **Théorie de Helmholtz** : une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche fixée) ;
- **Théorie de Gouy-Chapman**: la couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à une plus grande distance (couche diffuse) ;
- **Théorie de Stern** : qui combine les deux théories précédentes et considère la formation d'une double couche : la première formée d'ions du liquide mais adhérente au colloïde, la seconde diffuse dans le liquide environnant. le potentiel subit une première chute significative dans la couche fixée, puis diminue plus lentement à mesure que la distance augmente jusqu'à son annulation au point A (point isoélectrique).

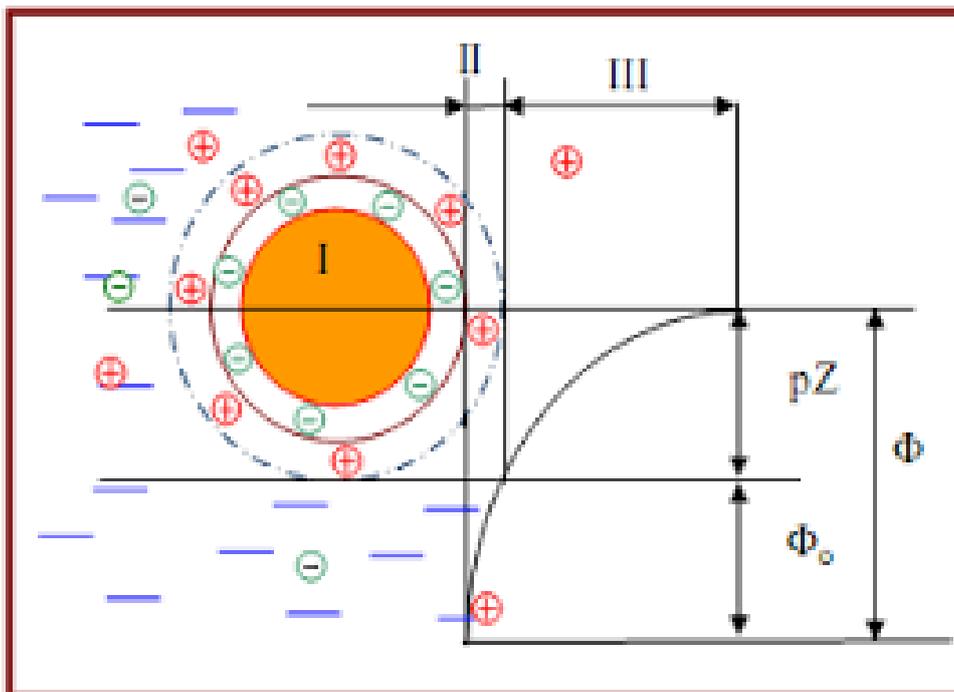


Figure 1.1 : Potentiel électrique de particules colloïdales [9, 11]

Avec :

**I** : Particule colloïdale

**II** : Couche adhéree de Stern

**III** : Couche diffuse de Gouy-Chapman

**Φ** : Potentiel total à l'interface

**Φ<sub>0</sub>** : Potentiel différentiel dans la couche adsorbée

**Pz** : Potentiel zêta

## 1.6. Potentiel zêta

Un colloïde se caractérise donc par 2 potentiels :

- E : Potentiel thermodynamique, encore appelé potentiel de Nernst, présent à la surface même du colloïde mais non mesurable par des méthodes simples.
- Z : le potentiel électrocinétique appelé potentiel Zêta est défini par la relation suivante :

$$Z = \frac{kx\mu xme}{\varepsilon} \quad \text{Equation 1.2}$$

Avec [11] :

K= fonction du diamètre de la particule.

μ= viscosité dynamique (Pa. s).

me= mobilité électro phorétique ( $\mu s^{-1} \cdot v^{-1}$ ).

ε= constante diélectrique du milieu

## 1.7. Facteurs influençant la coagulation-floculation

Pour optimiser le procédé de coagulation-floculation, il faut tenir compte de plusieurs variables, tels que le pH, les sels dissous, la température, la dose du coagulant, la turbidité, le temps de décantation ... .

### 1.7.1 Influence du pH

Pour chaque solution, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation s'effectue rapidement. Plage qui dépend du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Pour abaisser le pH, dans certains cas, il est plus avantageux d'augmenter la

quantité de coagulant. Lorsque le pH est optimal, les produits d'aluminium ou de fer solubles sont pratiquement inexistantes. Pour les sels de fer et d'aluminium, les plages de pH s'étendent de 4 à 6 et de 5 à 7 respectivement [7,17].

### **1.7.2 Influence de la dose du coagulant**

Le choix du coagulant influence les caractéristiques de la coagulation [7]. La dose du réactif est un paramètre à prendre en compte. Le coagulant, qui est généralement fortement acide, a tendance à abaisser le pH de l'eau. Pour atteindre le pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base. Une dose excessive de coagulant entraîne une restalinisation des particules et augmente le coût de l'opération. Alors qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité insuffisante de l'eau traitée. On peut déterminer la quantité des réactifs soit par l'utilisation de la mesure du potentiel zêta (nécessite un équipement très coûteux) soit par un test au laboratoire, connu sous le nom de « Jar-Test » [12].

### **1.7.3 Influence de condition de mélange**

Les deux étapes de formation des floes consistent en une phase d'agitation rapide suivie d'une phase d'agitation lente permettant la maturation du floe. Néanmoins, il faut éviter que l'agitation est trop intense car elle empêche l'agrégation, ni trop prolongée car elle provoque la restauration des colloïdes [12].

### **1.7.4 Influence des sels dissous**

Les sels contenus dans une eau exercent les influences suivantes sur la coagulation et la floculation [12,18] :

- a) modification de la plage de pH optimale.
- b) modification de la quantité de coagulant requis.
- c) modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

### **1.7.5 Influence de la température**

Comme toute réaction chimique, la température joue un rôle important, donc une baisse température, entraînant une augmentation de la viscosité de l'eau. La coagulation et la décantation du floe sont ralenties et la plage de pH optimale diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution est de changer le coagulant selon les saisons [7, 12,18].

### 1.7.6 Influence de la turbidité

La turbidité est également un paramètre qui affecte le fonctionnement normal du procédé de coagulation [8]. La turbidité de l'eau est due à la présence de particules suffisamment grosses pour se déposer. Naturellement, la coagulation de ces particules est donc facile à réaliser tout en maintenant le pH dans sa plage optimale [18].

### 1.8. Phénomènes de la coagulation

La coagulation consiste dans la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. On utilise, pour ce faire, des réactifs chimiques nommés coagulants [19].

D'après les revues bibliographiques on distingue quatre mécanismes de base pour la déstabilisation des particules colloïdales [19-20].

- a) compression de la double couche ;
- b) adsorption et neutralisation des charges ;
- c) emprisonnement des particules dans un précipité ;
- d) adsorption et pontage.

#### a) Compression de la double couche

L'augmentation de la force ionique de l'eau réduit le volume et l'épaisseur de la couche diffuse (Figure 1.2). Les forces de répulsion sont considérablement réduites alors que les forces d'attraction de Van Der Waals ne sont pas affectées. La force ionique est représentée par l'équation suivante :

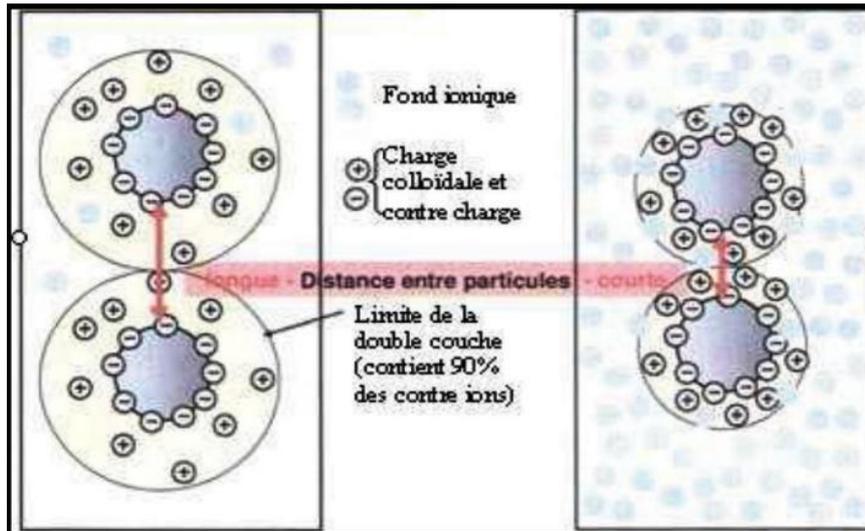
$$\mu = \frac{1}{2} \sum n = 1 C_n Z_N^2 \quad \text{Equation 3}$$

Avec :

$\mu$  : Force ionique.

$C_n$  : Concentration de l'ion n ( $\text{mol.L}^{-1}$ )

$Z_N$  : Valence de l'ion n [20].

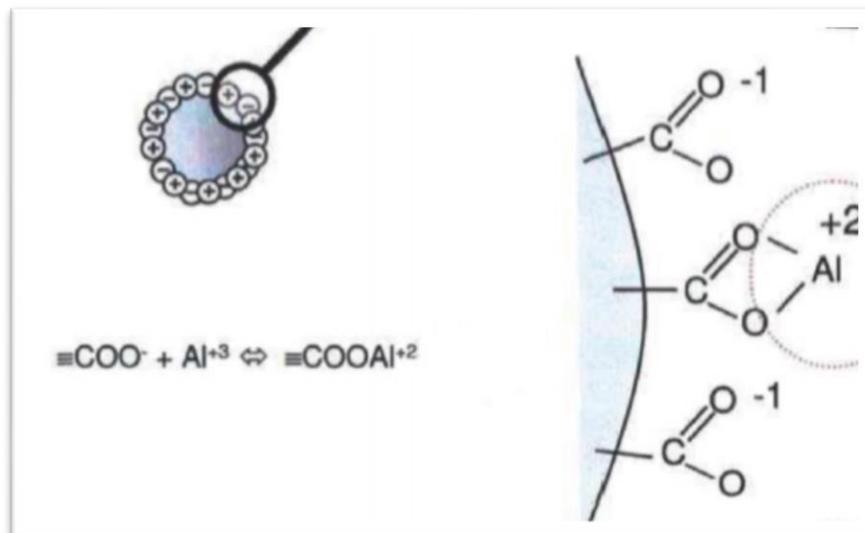


**Figure 1.2** : représentation schématique de la compression de la couche diffuse [7,15]

### b) Adsorption et neutralisation des charges

Ce mécanisme repose sur l'ajout suffisant de cations afin de neutraliser la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface (Figure 1.3). Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut en résulter une adsorption trop importante de cations et inverser la charge des particules qui devient alors positive. Les particules seraient ainsi rentabilisées [20].

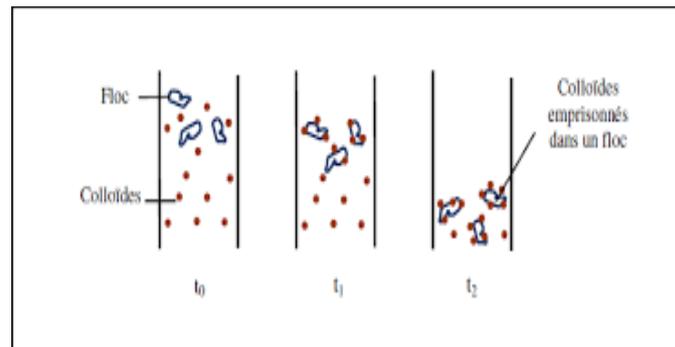
Ce mécanisme permet donc l'agglomération des particules par "pontage" des polymères [20].



**Figure 1.3:** Représentation schématiques de neutralisation des charges [7,20]

### c) Emprisonnement des particules dans un précipité

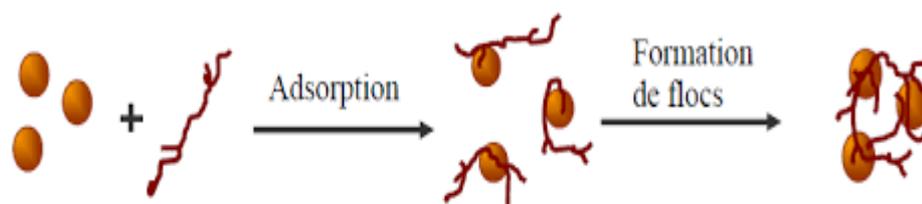
Lorsque des quantités suffisantes de coagulant comme le  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ou le  $\text{FeCl}_3$ , sont ajoutés, ils forment un précipité possédant généralement une charge positive. Le pH de l'eau doit se situer dans une plage où la solubilité des sels est minimale. Le précipité formé, appelé floc, entre en contact avec les particules de charge négative et les emprisonne. Les particules sont ensuite entraînées lors de la décantation [20]. La figure 1.4 représente ce phénomène.



**Figure 1.4** : Emprisonnement des particules dans les floes pendant la décantation [7,20]

### d) Adsorption et pontage entre les particules

Ce mécanisme implique l'utilisation de polymères cationiques, non anioniques ou anioniques ayant une masse moléculaire élevée et une structure longitudinale. Un polymère en présence d'un colloïde l'adsorbe à une de ses extrémités à l'aide d'un de ces groupes fonctionnels. Les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde. Ce mécanisme permet donc l'agglomération des particules par "pontage" des polymères. La figure 1.5 décrit ce processus. Par contre, une concentration de polymères trop élevée peut rentabiliser les colloïdes. Les polymères verront alors chacune de leurs extrémités être adsorbées par la même particule, d'où une rentabilisation [20].



**Figure1.5** : Adsorption et pontage à l'aide d'un polymère [7,20]

### 1.8.1. Coagulants

Le coagulant est un tel produit chimique développé par des chercheurs pour stabiliser les particules colloïdales en retirant les forces qui les font pendre vers le bas [21].

Les coagulants se distinguent en synthétiques (minéraux et organiques) et naturels.

Les coagulants minéraux les plus employés sont le sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$  et le chlorure ferrique  $FeCl_3$ . De nouveaux produits sont apparus depuis dix ans : ce sont les sels préhydrolysés d'aluminium, chlorure ou chlorosulfates de fer(III) et les polymères organiques cationiques, anioniques ou nonioniques [6].

Les coagulants naturels d'origine végétale ou animale sont considérés comme une bonne alternative aux coagulants synthétiques car ces derniers malgré leurs capacités à réduire la charge organique en solutions, ils possèdent aussi de divers inconvénients [22-23].

On peut citer quelques coagulants naturels (végétale et animal) ou encore appelés biocoagulant. Il s'agit de : cactus, tanin, fécule de pomme de terre, manioc, lentille culinaire, fécule de riz, amidon de riz, graines de Moringa, carapace de crevette, carapace de crabe, coquille de pervenche, coquillages et crustacés [23].

### 1.8.2. Avantages et inconvénients des coagulants

Les coagulants tels que les sels d'aluminium ou de fer présentent certains avantages et inconvénients [12].

#### 1.8.2.1. Sulfates d'Aluminium

##### ✓ Avantages

- relativement peu coûteux,
- moins acide (il faut quand même porter un équipement de protection).

##### ✓ Inconvénients

- les erreurs de dosage produisent une grande quantité de résidus, d'aluminium, posant un risque potentiel pour la santé.

### 1.8.2.2. Chlorures de Fer

#### ✓ Avantages

- le meilleur pour éliminer les matières organiques,
- bas prix,
- les concentrations élevées de résidus de fer sont faciles à détecter.

#### ✓ Inconvénients

- un mauvais dosage produit une coloration rougeâtre et une concentration élevée de résidus de fer,
- la forte concentration de résidus de fer risque de boucher les filtres et de tacher la lessive,
- très acide (le port d'un équipement de protection complet est de rigueur)
- boue inesthétique (brune),
- élimination plus faible COD.

## 1.9.Floculation

La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration [24].

Donc c'est l'agrégation des particules déjà déstabilisées, par collision les unes contre les autres ce qui conduit à la croissance en taille des floes et à la diminution en nombre des particules en solution [7].

### 1.9.1. Types de floculation

➤ **Floculation péri-cinétique** : ce phénomène est lié à la diffusion brownienne, Elle est en fonction de la température du milieu dispersif [25].

➤ **Floculation ortho-cinétique** : celle-ci est distinguée par la notion du gradient de vitesse. En effet, le mixage (gradient de vitesse imposée) est nécessaire pour apporter un complément à l'addition du coagulant afin de détruire la stabilité du système colloïdale [25].

### 1.9.2. Floculants

Les floculants, appelés aussi adjuvants de floculation, sont destinés à favoriser l'agglomération des particules, constituées en floes après coagulation, afin qu'elles précipitent. On distingue les floculants d'après leur nature (minérale ou

organique), leur origine (naturelle ou synthétique) ou le signe de leur charge électrique (anionique ou cationique) [18].

- **La silice activée** : la silice activée est le premier flocculant utilisé, elle peut donner les meilleurs résultats lorsqu'elle est employée conjointement avec le sulfate d'aluminium. Elle est constituée d'une solution d'acide polysilicique  $(H_2SiO_3)_4$  provenant de la polymérisation de l'acide silicique. Parmi les autres flocculants minéraux utilisés, on peut citer : certaines argiles, le blanc de Meudon ou le carbonate de calcium précipité et le sable fin.

- **Polymères organiques** : ce sont des molécules chimiques fabriquées à partir de produits naturels : les alginates (extraits d'algues), les amidons (extraits de graines végétales) et certains dérivés de la cellulose. Mais, leur utilisation dans le traitement des eaux destinées à la consommation fait l'objet de règlements sanitaires.

- **Polymères synthétiques** : on distingue les polyacrylamides (polymères anioniques) et les polyamines (polymères cationiques). Les premiers sont utilisés à la fois dans la clarification des eaux et la déshydratation des boues, alors que les polyamines sont employés exclusivement dans la clarification. Aucune règle ne permet de prévoir lequel des flocculants peut donner les meilleurs résultats, il est donc nécessaire de faire des essais au laboratoire. Dans le cas de la clarification des eaux, le choix est à faire entre un flocculant anionique et un flocculant cationique. Si le pH est neutre et en présence de grandes quantités de matières organiques, on expérimente les flocculants cationiques [18].

## CHAPITRE 2 : MORINGA OLEIFERA

### 2.1. Historique et généralités sur le Moringa Oleifera

Moringa Oleifera est une plante à fleurs appartenant à la famille monogénérique des arbustes et des arbres des Moringaceae qui est originaire de l'Inde, au sud de la chaîne de montagne de l'Himalaya.

Aujourd'hui le M.Oleifera est cultivé à travers le Moyen-Orient, ainsi que tout le long de la ceinture tropicale et subtropicale. Il a été introduit en Afrique de l'est au début du 20<sup>ème</sup> siècle par le biais du commerce et des échanges maritimes durant cette période [26-29].

Le Moringa, aussi appelé « *Ne meurt jamais* », peut croître aussi bien sur un sol riche que sur un sol pauvre et n'est que peu affecté par les conditions climatiques difficiles telles que la sécheresse. Il croît rapidement lorsqu'il est semé ou coupé. Il peut également se régénérer par lui-même, après une coupe très sévère [30].

Le Moringa n'a pas volé ses surnoms d'« *arbre de vie* » ou « *arbre aux miracles* » il est utilisé depuis des siècles en médecine Ayurvédique (remonterait à plus de 5000 ans), elle lui attribue le pouvoir de combattre plus de 300 maladies dont, le rhume, le diabète, l'hypertension artérielle, l'anémie, la fièvre, le rhumatisme ou encore pour stimuler le système immunitaire [31-32].

En raison de sa richesse en vitamines, en minéraux et en protéines, le *Moringa Oleifera* est riche en source d'éléments nutritifs.

Les résultats de travaux effectués par une équipe américaine ont montré qu'un gramme de feuilles fraîches de *Moringa Oleifera* contient 7 fois la vitamine C que les oranges, 4 fois le calcium que le lait, 4 fois la vitamine A que la carotte, 3 fois de potassium que la banane, 3 fois le fer que l'épinard et autant de protéines que dans les œufs.

Le *Moringa Oleifera* a un potentiel énorme comme supplément alimentaire et mais aussi en tant que purificateur d'eau usée [29,31-32].

## 2.2. Dénomination et taxonomie

Le *M.Oleifera* appartient à la classification botanique indiquée dans le tableau 2.1 suivant:

**Tableau2.1** : classification botanique de *M.Oleifera*[27,33-34]

Règne	Végétal
Embranchement	Spermatophytes
Sous Embranchement	Angiosperme
Classe	Dicotylédones
Sous Classe	Dilleniidae
Ordre	Capparales
Famille	Moringacea
Genre	Moringa
Espèce	Oleifera

### 2.2.1. Différentes espèces de Moringa

Il existe 12 autres variétés du *Moringa* appartenant à la famille des *Moringaceae* et qui sont :*M. Arborea*, *M. Borziana*, *M. Concanensis*, *M. Drouhardii*, *M. Hildebrandtii*, *M.Longituba*, *M. Ovalifolia*, *M. Peregrine*, *M. Pygmaea*, *M. Rivae*, *M. Ruspoliana*, *M. Stenopetala* [30]. Dans la présente étude, le *Moringa Oleifera* a été choisi.

### 2.3. Importance socio-économique

*Moringa* est l'un des arbres tropicaux les plus utiles. Il se propage relativement facilement, aussi bien de manière végétative que sexuée, et il est peu exigeant en eau et en matières minérales. Ainsi, sa production et son entretien sont aisés. L'introduction de cette plante au sein d'une ferme dans un environnement riche en biodiversité peut être bénéfique à la fois pour l'exploitant et pour l'écosystème environnant [26].

### 2.4. Conditions écologiques

Le *Moringa* peut se trouver dans des zones très arides comme le Sahara, mais il préfère les climats semi-tropicaux humides. Il peut s'accommoder à tout type de sol mais s'adapte mieux les collines et les bordures de rivières. Il résiste bien à la sécheresse grâce à ses racines tubéreuses lui permettant d'accumuler de l'eau [28]. Les limites écologiques de *Moringa Oleifera* sont rapportées dans le tableau 2.2.

**Tableau 2.2** : Exigences environnementales du *M. Oleifera* [27,31, 35]

Caractéristiques	Valeurs/fourchettes
Climat	Tropical ou sub-tropical
Altitude	0-2000 m
Température	25-35°C
Pluviométrie	250 mm-2000 mm. Irrigation nécessaire pour la production de feuilles si pluviométrie < 800 mm
Type du sol	Limoneux, sableux ou sablo-limoneux
pH du sol	Légèrement acide à légèrement alcalin (pH: 5 à 9)

D'après Foidl et al. [26], *Moringa* est considéré comme un arbre pérenne, à croissance rapide, qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur et dont le tronc mesure 20 à 40 cm de diamètre [36,38].

### 2.5. Utilisation des différents organes de *Moringa Oleifera*

*M.Oleifera* est un arbre polyvalent dont la plupart de ses parties sont utiles pour un certain nombre d'applications [40]. Le tableau 2.3 regroupe les différentes utilisations des parties de *Moringa*.

**Tableau 2.3** : Parties de la plante et leurs intérêts [27,30, 35]

Partie de la plante	Usages ou intérêts
Feuilles	Alimentaire, fourrage, biomasse, hormone de croissance végétale, médicinal
Fleurs	Alimentaire, médicinal, miel
Fruits	Alimentaire, médicinal, miel
Racines	Médicinal
Graines	Cosmétiques, alimentaire, traitement des eaux, Médicinal
Bois	Papier, production d'alcool, alimentation animale (jeunes pousses), médicinal
Ecorces	Corde, teinture, gomme pour tannage, médicinal

## 2.6. Graines de Moringa Oleifera

Les graines sont rondes (Figure 2.1), 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. Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par an. Une graine pèse en moyenne 0,3 g et la coque représente 25% du poids de la graine [26-28, 30, 33,38-39].



**Figure 2. 1** : Graines de M. Oleifera

La composition chimique des graines de M.Oleifera est montrée dans le tableau 2.4 de ci-dessous.

**Tableau 2.4** : Composition chimique des graines de Moringa Oleifera [30].

Composés	g/100g	%
Protéines	29,4 - 33,3	34,51-36,5
Huiles	34,7 - 40,4	38,62 - 40,06
Fibres	6,8 - 8,0	10,92 - 12,16
Carbohydrates	16,5 - 19,8	19,00 - 20,29

## 2.7. Utilisation des graines de Moringa Oleifera dans la purification des eaux

Moringa Oleifera a été utilisé pour le traitement domestique de l'eau par des femmes au Soudan, qui ont placé des graines de poudre dans un petit sac en tissu qui a ensuite été tourbillonné dans l'eau trouble.

Les graines sèches de M.Oleifera contiennent un polyélectrolyte cationique qui a prouvé son efficacité dans le traitement des eaux. C'est un coagulant primaire qui provoque la formation des ponts entre les colloïdes [41], en neutralisant les

matières colloïdales dans les eaux boueuses ou sales, puisque la majorité de ces matières ont une charge électrique négative. Cette protéine peut donc être utilisée comme polypeptide naturel non toxique pour provoquer la sédimentation des particules minérales et organiques dans les processus de purification de l'eau potable [26].

## **2.8. Avantages et inconvénients du M.Oleifera dans le traitement des eaux**

### **2.8.1. Avantages**

-C'est un produit d'origine tropicale, intéressant pour les pays du sud car ne faisant pas l'objet de taxes d'importation et ne nécessitant pas de paiement en devises.

-Le Moringa Oleifera a une bonne capacité d'adaptation aux différentes conditions environnementales ce qui lui confère une grande distribution spatiale dans le monde.

- Le coût de la graine de Moringa est, ou peut-être, dans certains pays compétitif par rapport aux floculants industriels. Cependant on manque de recul et d'études économiques sur ce point.

-Les graines de M.Oleifera qui sont bien conservées gardent de bonnes propriétés (jusqu'à 5 ans) mais de réelles études sur le stockage n'ont jamais été réalisées.

-Contrairement au sulfate d'aluminium, les graines de Moringa sont totalement biodégradables, ce qui peut être intéressant dans la conservation de la biodiversité.

-L'efficacité du Moringa comme floculant ne dépend pas des modifications des propriétés chimiques, du pH de l'eau, ...etc., ce qui évite d'avoir à utiliser les rectificateurs d'acidité.

-Les plantes utilisées pour la floculation doivent remplir certaines conditions. En effet, elles ne doivent pas présenter de toxicité, être faciles à produire et le coagulant facile à doser. Les graines de Moringa répondent très bien à ces critères.

-Les plantes utilisées doivent aussi être cultivables dans de nombreux pays et ne pas nécessiter trop d'espace.

-Le M.Oleifera est particulièrement facile à cultiver de manière intensive et il est adapté à la plupart des zones tropicales [41].

-Les erreurs de dosages n'induisent pas de toxicité [41].

-Une filtration lente après la décantation semble très efficace.

-La turbidité colloïdale ( $<10\mu\text{m}$ ) se transforme en turbidité particulaire (entités plus grosses donc sans doute plus facilement éliminée).

-Les boues obtenues après le traitement au *Moringa Oleifera* sont plus biodégradables et moins polluantes qu'une boue obtenue après traitement au sulfate d'alumine, elles peuvent donc être valorisées facilement.

-Les coagulants métalliques induisent une pollution qu'il faut contrôler, le *Moringa* ne contient pas de produits chimiques nocifs laissant des traces dans les eaux traitées [42].

### **2.8.2. Inconvénients**

- La décantation de floccs est lente par rapport à celle du sulfate d'alumine.
- Les coûts de graine de *Moringa Oleifera* si onéreux.
- Les graines mises en solution relarguent de la matière organique ce qui facilite la croissance bactérienne.
- Les concentrations en coagulant sont supérieures par rapport au sulfate d'alumine.
- Approvisionnement dépendant d'une production agricole, nécessité de constituer des stocks pour parer aux fluctuations. Les conditions de stockage optimales doivent être déterminées.
- La décantation à des températures basses est difficile et incomplète à cause de la faible densité des particules de *Moringa*, les floccs d'alumine sont plus solides.
- La turbidité obtenue trop importante pour procéder à une désinfection.

## CHAPITRE 3 : ACIDES HUMIQUES

### 3.1. Origine des substances humiques

Les composantes organiques naturelles qui se trouvent dans l'environnement sont le résultat directe ou indirecte de la biodégradation de la matière organique fraîche, elle est constituée de débris végétaux (feuilles, racines) et animaux, et peuvent se diviser en deux grandes groupes: les substances non humiques et les substances humiques (Figure 3.1), [1, 43-44].

### 3.2. Composantes et caractéristiques des substances humiques(SH)

D'après la définition classique : les substances humiques sont une catégorie générale de substances organique hétérogènes naturellement disponibles qui peuvent être généralement caractérisées comme étant jaunes à noires en couleur, de poids moléculaires élevé [13].

Les substances humiques sont des composés organiques résultant de la transformation physique, chimique et microbiologique des résidus végétaux et animaux. Elles se retrouvent sous forme de macromolécules carbonées hétérogènes et complexes dans tous les écosystèmes au niveau des sols ainsi que des sédiments, des eaux de surface et surtout dans les produits de transformation de matières organiques liées aux activités humaines comme le compost, le fumier, les décharges et le lixiviat [2, 45].

Elles jouent un rôle dans la fertilisation, le transport, l'immobilisation et la dégradation des espèces chimiques organiques ou minérales telles que les pesticides, les composés aromatiques polycycliques ou les métaux lourds dans les sols et les eaux. Elles peuvent, en outre, catalyser certaines réactions chimiques en stabilisant les charges électroniques. Elles doivent ces rôles à leurs caractéristiques chimiques et structurales [46, 48-49].

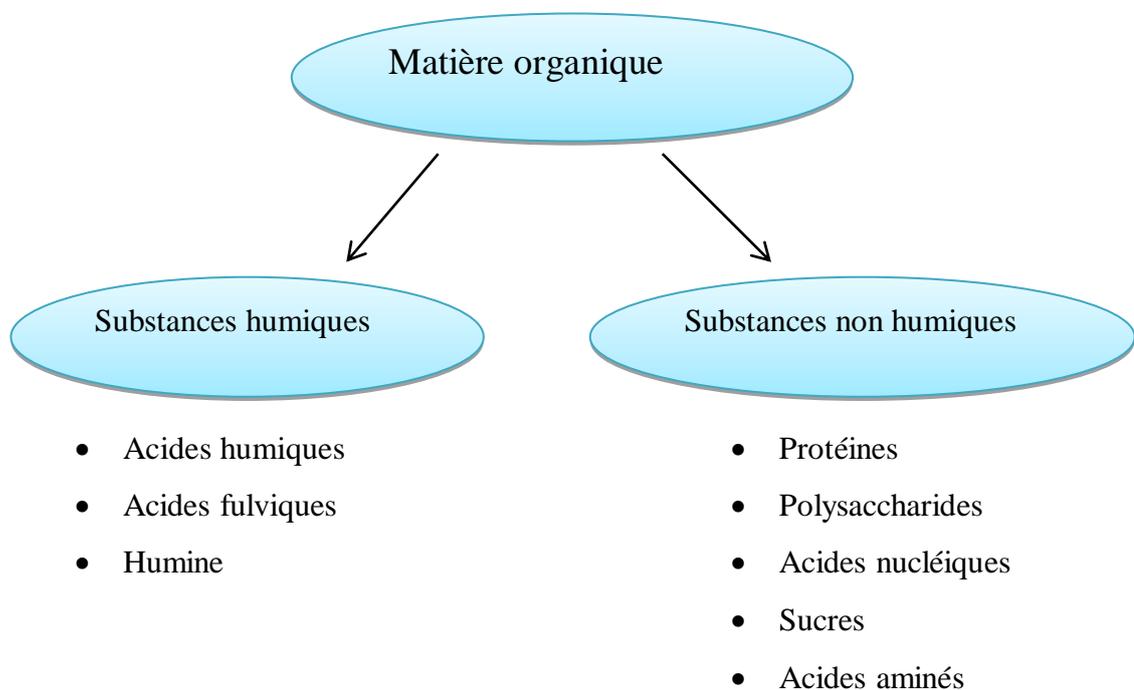
Selon le milieu d'origine, nous pouvons également définir :

- ✓ **les substances humiques des sols** qui sont des substances polymériques jaunes extraites d'un sol avec une solution alcaline,

- ✓ **les substances humiques aquatiques** qui sont des substances polymériques jaunes isolées par des techniques de sorption sur résine (non ionique ou ionique) [44].

Il est possible de distinguer aussi trois fractions, parmi les substances humiques, en fonction de leurs solubilités [44] :

- ✓ **humine** : fraction solide insoluble quel que soit le pH.
- ✓ **acide humique AH** : soluble dans un milieu basique et insoluble en milieu très acide ( $\text{pH} < 2$ ). C'est la fraction la plus abondante dans le sol.
- ✓ **acide fulvique AF** : solubles dans des solutions acides et alcalines [1,43-44,49-53].



**Figures 3.1** : Différentes classes de la matière organique [49]

### 3.3. Acides humiques

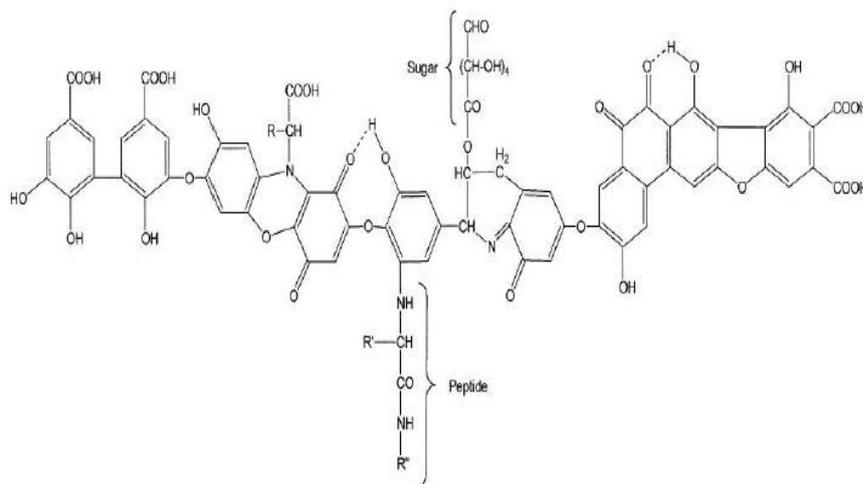
Les acides humiques (AH) peuvent être définis comme produit final de la décomposition de la matière organique par des organismes aérobiques, constituant des substances humiques. Les AH est une macromolécule organique complexe de poids moléculaire très élevé (10000 à 100000), de couleur grise et brune foncée, résultant d'un processus de condensation oxydative des composés phénoliques liés à des acides aminés, des peptides et des polysaccharides [49-50].

Les AH gris sont peu mobiles dans le sol que les marrons à cause de leur nombre réduit de groupes contenant l'oxygène et plus grand poids moléculaires, mais ils peuvent se lier fortement avec les éléments présents dans cette matrice pour former des complexes très stables, tandis que les AH bruns donnent des complexes relativement peu stables [13,49].

En général, les acides humiques sont considérés comme composante la plus précieuse de l'humus. Ils sont peu mobiles, mais sont capables de se lier plus ou moins fortement selon leur type avec d'autres corps présents dans le sol et en particulier avec l'argile [45].

### 3.4. Structure et propriétés des acides humiques

Malgré de nombreuses études, la structure des substances humiques reste mal définie et il est difficile de la représenter par une formule moléculaire. La synthèse des substances humiques aboutit à la formation de molécules de tailles, de composition et de configurations différentes. Au regard de la complexité et de l'hétérogénéité du mélange humique, il est difficile d'extraire une fraction pure et la détermination de sa structure s'avère peu réalisable. Seule, l'analyse des structures humiques a permis de mettre en évidence une série de groupements présents dans les différentes molécules humiques (Figure 3.2) [47].



**Figure 3.2 :** Modèle d'un AH selon Stevenson (1982) [43,45, 51]

Les différentes analyses montrent que, quelle que soit leur origine (sol, eaux ou lixiviats), les SH (AH et AF) sont composées principalement de carbone (C),

d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N) et de groupements fonctionnels (COOH, OH, C=O). Le pourcentage et la concentration de ces éléments varient en fonction du type et de l'origine des SH (Tableau 3.2), [2,45].

**Tableau 3.1 :** Compositions des acides humiques (AH) et fulviques (AF) des sols, des milieux aquatiques et des lixiviats [2,45].

Paramètres		AH			AF		
		Sols	Milieux Aquatiques	Lixiviats	Sols	Milieux Aquatiques	Lixiviats
Compositions	C	54-62	51-60	56,1-57,1	43-55	42-51	45,6-35,6
Elémentaires (% de poids)	O	29,5-36,8	33,4-40,8	26,7-30,2	42,9-51,4	44,2-53,2	32,8-35,2
	H	2,9-5,8	3,7-5,1	7,0-8,8	3,3-5,9	3,6-4,3	6,4-9,6
	N	1,6-4,8	2,0-2,1	5,7-8,3	0,7-4,1	1,0-1,6	2,4-12
	S	-	-	-	0,1-3,5	-	3,4-5,1
Groupes	Acidité totale	5,6 – 8,9	5,9	7,1-8,9	6,4-14,2	6,2	9,6- 16,6
Fonctionnels (meq.g <sup>-1</sup> C)	COOH	1,5-5,7	3,4	4,5-5,9	6,1-11,2	3,9	6,5-10,7
	OH phénolique	2,1-5,7	2,5	2,2-3,7	1,2-5,7	2,3	1,0-4,7
Compositions structurales (%)	C aromatique	41	-	26,2-36,2	21-35	22,3	27,2-29,9
	C carboxylique	-	-	16,4-19,0	10-30	16,1	14,8-27,5

### 3.5. Effets indésirables et danger de la présence des AH dans les eaux

Les eaux de pluie et de ruissellement transportent les molécules d'AH vers les cours d'eaux (rivières, lacs, fleuves) et autres réserves d'eaux. Ainsi, l'AH est naturellement ubiquitaire dans les eaux de surface et les eaux souterraines.

Ces substances ont longtemps été un problème pour les industriels distributeurs d'eau de réseau. Elles affectent la qualité de l'eau de diverses manières [1].

Le lixiviat de décharge est caractérisé par des concentrations importantes de carbone organique dissous, plusieurs centaines de mg de carbone par litre. Cette fraction de carbone organique dissous est un mélange fortement hétérogène, constitué de composés organiques non volatils et de substrats à base de protéines, de lignine, de cellulose, d'hémicellulose, de polysaccharides et de lipides. Cette matière organique dissoute va être dégradée chimiquement et biologiquement au cours du

temps, minéralisée et même condensée en composés de haut poids moléculaire nommés substances humique [52].

Cette fraction de carbone organique dissous est un mélange fortement hétérogène, constitué de composés organiques non volatils et de substrats à base de protéines, de lignine, de cellulose, d'hémicellulose, de polysaccharides et de lipides.

Cette matière organique dissoute va être dégradée chimiquement et biologiquement au cours du temps, minéralisée et même condensée en composés de haut poids moléculaire nommés substances humiques [54].

Leur présence combinée avec d'autres polluants ou particules présentes dans l'eau peuvent provoquer certains effets nuisibles tels que :

- Fixation irréversible sur les résines anioniques de minéralisation,
- En réagissant avec les composés toxiques tels que les pesticides, ils diminuent leur mobilité et leurs servent de véhicules pour leur dispersion [13,45],
- Altération de certaines caractéristiques de l'eau à cause du phénomène « recroissance bactérienne », pouvant être à l'origine de certaines odeurs désagréables aussi bien que du développement de microorganismes indésirables [45],
- Affectation de la qualité de l'eau par une coloration indésirable (aux concentrations supérieures à 5 mg/L), une odeur et un goût [1],
- En formant avec le chlore lors de la chloration (désinfection) de l'eau, des sous-produits de la désinfection (SPD), composés mutagènes et cancérigènes (même à très faible niveau g/L selon l'OMS). A ce jour, plus de 700 SPC ont été identifiés dans l'eau de consommation dont les trihalométhanes (THM) et les acides haloacétiques sont les groupes les plus abondants [1,13].

Le danger sur la santé ne provient pas seulement des produits de chloration, il a été rapporté que la prise d'une grande quantité d'AH pourrait être l'un des facteurs étiologique de la maladie de pied noirs [1,13].

Par conséquent, la concentration en AH est une caractéristique essentielle à mesurer pour les études sur le traitement de l'eau [1].

### 3.6. Techniques d'éliminations des acides humiques

Les substances humiques en solution ne sont pas facilement biodégradables et nécessitent de réduire leur teneur en faisant appel à diverses techniques dont les plus répandues sont rassemblées dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2** : Principaux procédés d'éliminations des AH [1]

<b>Méthodes</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Adsorption	<ul style="list-style-type: none"><li>-Fort taux d'élimination atteint</li><li>-Mise en place simple</li><li>-Utilisation simple</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Efficacité trop dépendante de certains paramètres (exemple pH)</li><li>-Saturation de l'adsorbant</li></ul>
Photocatalyse	<ul style="list-style-type: none"><li>-Efficacité et rapidité</li><li>-Pas de produit chimique</li><li>-Peut être incorporé à un système de traitement déjà existant</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Energétique, si source non solaire</li></ul>
Coagulation	<ul style="list-style-type: none"><li>-Taux d'élimination élevé</li><li>-Faible coût</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Grande consommation de produits chimiques</li><li>-Concentration élevée en aluminium dans l'eau traitée</li><li>-Production de boue riche en Aluminium</li></ul>
Procédés biologique	<ul style="list-style-type: none"><li>-Fractions biodégradables de la matière organique éliminées</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Ajout de nutriment</li><li>-Production de boue</li></ul>
Procédés membranaires	<ul style="list-style-type: none"><li>-Efficace pour enlever les fractions fines de la matière organique</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Saturation de la membrane</li><li>-Cher et énergivore</li></ul>
Echange ionique	<ul style="list-style-type: none"><li>-Efficace dans le traitement de la fraction hydrophile de la matière organique</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Coût élevé</li></ul>

## CHAPITRE 4

### MATERIELS ET METHODES

#### Introduction

Le présent chapitre est consacré à la description de l'ensemble des expériences effectuées. Il comprend les méthodes de préparation des différentes solutions, les modes opératoires ainsi que les techniques de caractérisation utilisés pour la réalisation de ce travail.

#### 4.1. Réactifs utilisés

Les produits et les réactifs chimiques utilisés dans le présent travail sont rassemblés dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1** : Réactifs utilisés

Nom du produit	Formule chimique	Pureté (%)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Fournisseur
Acide chlorhydrique	HCl	37	1.18	Prolabo
Hydroxyde de Sodium	NaOH	98	2.13	Origine CE
Sulfate d'aluminium	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	98	2.67	Panreac
Acide humique	C <sub>40</sub> H <sub>24</sub> O <sub>12</sub>	99	1,83	Fluka

#### 4.2. Préparation de la solution d'Acide Humique AH et établissement de la courbe d'étalonnage

La spectrométrie UV-Visible est une méthode analytique qui consiste à mesurer l'absorbance (ou la densité optique) d'une substance chimique donnée en solution. Pour calculer la concentration des AH dans les échantillons, une courbe d'étalonnage est utilisée. Elle est établie par tracer une droite d'absorbance en

fonction de concentrations connues des AH, puis l'équation linéaire de cette droite est utilisée pour le calcul de la concentration inconnue d'une solution d'AH donnée.

La courbe d'étalonnage a été réalisée en préparant une solution d'acide humique à  $1 \text{ g.L}^{-1}$  de marque Fluka (Figure 4.1) en suivant le protocole tel que décrit dans la littérature [13] (**Annexe A**).



**Figure 4.1** : AH en poudre

### **4.3. Coagulation-floculation des acides humiques**

Le procédé de la coagulation-floculation nécessite l'emploi d'un montage expérimental appelé le Jar-test.

#### **4.3.1. Description du Jar-test**

Le jar-test est une manipulation visant à déterminer, sur un échantillon donné, l'efficacité comparée d'un coagulant en fonction des doses injectées, nous en déduisons la dose optimale nécessaire au traitement et le pH auquel son action est la plus efficace.

#### **4.3.2. Mode opératoire**

Dans la présente étude, la réduction des acides humiques par le procédé de coagulation-floculation a été réalisée en suivant les étapes suivantes :

- Remplissage des béchers avec un litre de la solution d'AH,
- Ajout du coagulant avec une agitation à grande vitesse de 200tours/min pendant 3min ensuite à une faible vitesse d'agitation de 50tours/min pendant 20min,

- Arrêt de l'agitation et décantation pendant 30min,
- Prélèvement de 25mL du surnageant sans perturber la phase décantée.

#### **4.4. Etude paramétrique de la coagulation floculation des AH par le sulfate d'aluminium**

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à la réduction des acides humiques en mettant l'accent sur l'étude paramétrique suivante :

- 1) effet du pH de la solution aqueuse,
- 2) effet de la quantité du coagulant.

##### **4.4.1. Influence du pH**

Le pH est un paramètre important dans la mesure de la concentration des ions  $H^+$  dans l'eau, il traduit ainsi la balance entre l'acide et la base, il est alors un paramètre majeur dans le processus de la coagulation-floculation pour élucider les différents mécanismes responsables de la coagulation-floculation.

La gamme de pH choisie dans cette étude est : 2, 5, 7, 9 et 11 en utilisant un pH mètre de marque Hanna® et une solution d'HCl 1N et de NaOH 2N pour l'ajustement.

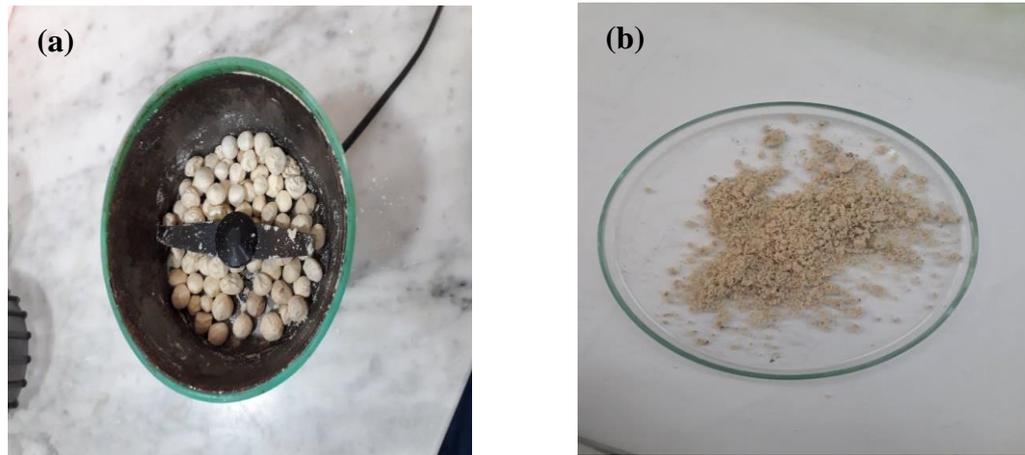
##### **4.4.2. Influence de la dose du coagulant**

Dans le but d'étudier l'effet de la dose du coagulant  $Al_2(SO_4)_3$  sur le processus de coagulation-floculation, une série d'essais a été effectuée : 10, 30, 50, 80, 100, 150, 250 et 300  $mg.L^{-1}$ .

#### **4.5. Etude paramétrique de la coagulation-floculation des AH par le biocoagulant (M.Oleifera)**

##### **4.5.1. Préparation du coagulant naturel**

Les graines ont été décortiquées à la main puis séchées à l'air libre pendant 5 jours et les amandes obtenues (figure 4.3) ont été ensuite broyées dans un mélangeur type Moulinex pour obtenir une poudre assez fine.



**Figure 4.3 :** (a) Graines de Moringa Oleifera  
(b) Poudre de graines de Moringa Oleifera

#### **4.5.2 Effet de pH**

Le pH est un paramètre majeur dans le processus de la coagulation-floculation. Pour étudier l'effet de ce paramètre, nous avons préparé des solutions d'AH de concentration initiale de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ . Les pH initiaux sont fixés à 5, 7, 8, 9 puis 11 en utilisant une solution d'HCl (1N) et/ou d'NaOH (2N) pour l'ajustement.

#### **4.5.3 Effet de la masse du biocoagulant**

La gamme de la quantité du biocoagulant a été choisie comme suit : 0,5 ; 1 et 1,5 g pour déterminer la dose optimale.

#### **4.5.4 Effet de temps de décantation**

La décantation des floccs a été réalisée pour différentes durées de décantation 30, 60, 90 et 120 min.

### **4.6. Caractérisations du biocoagulant : la poudre de graines de Moringa Oleifera**

Pour caractériser la poudre de graines de Moringa, la spectrophotométrie infra rouge à transformée de Fourier (FTIR) a été utilisée à l'aide d'un spectromètre de type « FTIR-8900 » ainsi que la détermination du point de charge nulle pH<sub>pzc</sub>.

#### **4.6.1. Caractérisation par FTIR**

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier constitue un outil pour élucider les groupes fonctionnels et les modifications structurelles dans les échantillons. Cette technique a une capacité de discordance que ne permettent pas certaines autres techniques, car

elle possède une région unique appelée empreinte digitale où la position et l'intensité des bandes sont spécifiques à chaque matrice

#### **4.6.2. Détermination de pHPzc**

Le point de charge zéro est une caractéristique importante pour les surfaces des matériaux, car il représente une estimation de son caractère acide ou basique. Il est défini comme étant le pH pour lequel la charge de surface est nulle, c'est-à-dire la somme des charges positives est égale à la somme des charges négatives. Ce paramètre est très important dans les phénomènes d'adsorption, surtout quand des forces électrostatiques sont impliquées dans les mécanismes.

Une méthode simple et rapide est utilisée pour déterminer le pHPzc. Le mode opératoire suivi pour la détermination de pHPzc est décrit ci-dessus :

- Prélèvement de 100mL d'eau distillée dans un bécher puis l'ajout d'une masse de 0,5g du solide (biocoagulant),
- Remplissage de la burette par une solution d'acide chlorhydrique HCl (0,01M),
- Détermination du pH initial de la solution,
- Dosage par la solution d'acide chlorhydrique HCl de 0,01M,
- Noter la variation du pH selon le volume d'acide chlorhydrique ajouté jusqu'à la stabilisation totale de la valeur du pH.

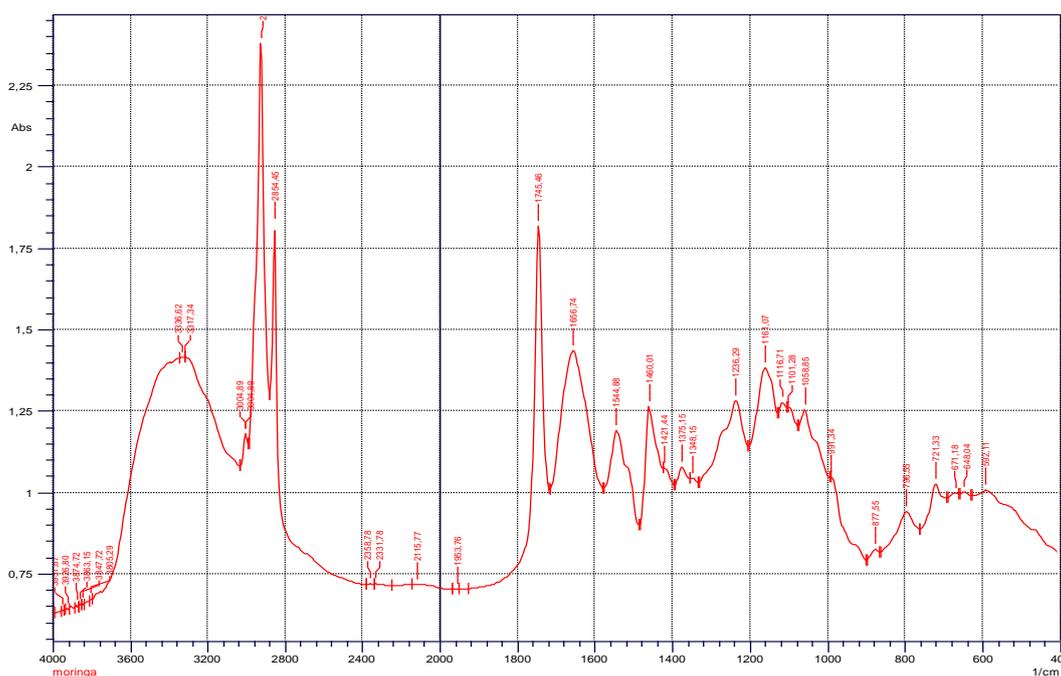
**N.B** : les mêmes étapes sont effectuées pour une solution d'hydroxyde de sodium NaOH (0,01M).

## CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 5.1. Caractérisations de la poudre des graines de *Moringa Oleifera*

#### 5.1.1. Caractérisation par FTIR

La figure 5.1 montre les spectres IR spécifiques de la poudre de graines de *Moringa Oleifera*.



**Figure 5.1** : Spectre Infrarouge de la poudre de graines de *Moringa Oleifera*

Ce spectre montre l'apparition de plusieurs pics traduisant l'existence de nombreux groupements fonctionnels au sein du biocoagulant, indiquant ainsi sa nature complexe.

Deux bandes larges, sont repérées, comprises entre 3400–3200  $\text{cm}^{-1}$  pouvant être attribuées aux vibrations d'élongation de l'hydrogène des groupes hydroxyles O-H asymétriques présentes dans les protéines, les acides gras, la cellulose, la pectine, les glucides et les unités de lignine présentes dans les graines de *Moringa* et/ou de l'eau adsorbée [55-58].

En raison de la teneur élevée des protéines dans ces graines, ces deux bandes peuvent contribuer également à l'étirement N-H de la liaison amide [58].

En outre, deux bandes de forte intensité à  $2900\text{ cm}^{-1}$  et  $2854,45\text{ cm}^{-1}$  ont été détectées liées probablement aux vibrations d'élongation C-H asymétrique des molécules aliphatiques [55,59].

Dans la région comprise entre  $1760$  et  $1400\text{ cm}^{-1}$ , plusieurs bandes sont observées et peuvent être attribuées à l'étirement de la liaison carbonyle C=O (bande de forte intensité à  $1745,6\text{ cm}^{-1}$ ).

En raison de la nature hétérogène des graines de *Moringa Oleifera*, le groupe carbonyle peut être lié à différentes parties dont la partie lipidique des acides gras à  $1745,6\text{ cm}^{-1}$  (une forte bande) ou la partie protéique des amides à  $1656,74\text{ cm}^{-1}$ .

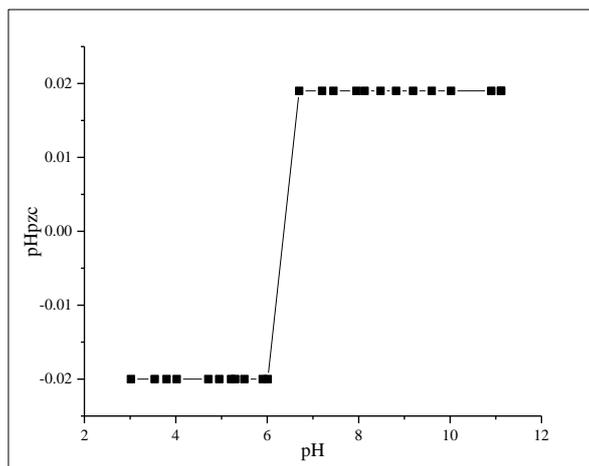
Un étirement de la liaison entre le groupe  $\text{C}\equiv\text{N}$  et/ou une déformation de la liaison N-H présente dans les protéines des graines est observé à  $1544,88\text{ cm}^{-1}$  qui peut confirmer la structure protéique dans les graines de *Moringa* [58, 60-61]. Les mêmes résultats ont été obtenus que ceux de certains auteurs [58].

De plus, des vibrations d'élongation d'ester accompagnées de plusieurs bandes autour de  $1161,07$ ;  $1116,71$ ;  $1101,28$  et  $1058,86\text{ cm}^{-1}$  attribuées aux vibrations d'élongation asymétriques et symétriques de C-O-C. Deux bandes observées à  $1460,01$  et  $1421,44\text{ cm}^{-1}$  sont attribuées respectivement aux  $(\text{CH}_2)$  cisaillement et (C-C) aromatique (conjugué à C=C) [55].

Les bandes observées à  $1375,15$ ;  $1346,15$  et  $1236,29\text{ cm}^{-1}$  sont attribuées respectivement à l'absorption par C-H et C-O d'élongation dans les groupes acétyle des groupements méthoxy de la lignine et les hémicelluloses, [55, 62-63]. Une bande de faible intensité est située à  $877,55\text{ cm}^{-1}$ , peut être attribuée aux liens  $\beta$ glucidiques entre les unités de sucre dans les hémicelluloses et la cellulose [58, 63].

### 5.1.2. Détermination de pH<sub>pzc</sub>

La figure.5.2 représente l'évolution de la charge de surface en fonction du pH pour le biocoagulant *M.Oleifera*.



**Figure 5.2 :** Détermination de point de charge nulle

En analysant la figure 5.2, nous remarquons que le pH<sub>pzc</sub> est de l'ordre de 6,33.

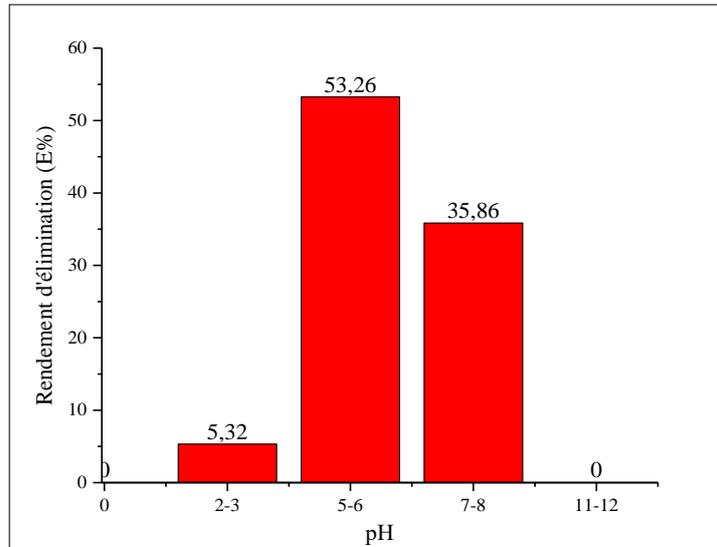
- Pour les pH de la solution inférieurs au pH<sub>pzc</sub>, les groupements fonctionnels de surface de la poudre seront protonés par un excès de protons H<sup>+</sup> de la solution, donc la surface est chargée positivement.
- Cependant, lorsque le pH de la solution est supérieur au pH<sub>pzc</sub>, les groupements fonctionnels de surface seront déprotonés par la présence des ions OH<sup>-</sup> de la solution et par conséquent la surface est chargée négativement.

## 5.2. Etude paramétrique de la coagulation-floculation des AH en utilisant le sulfate d'aluminium Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

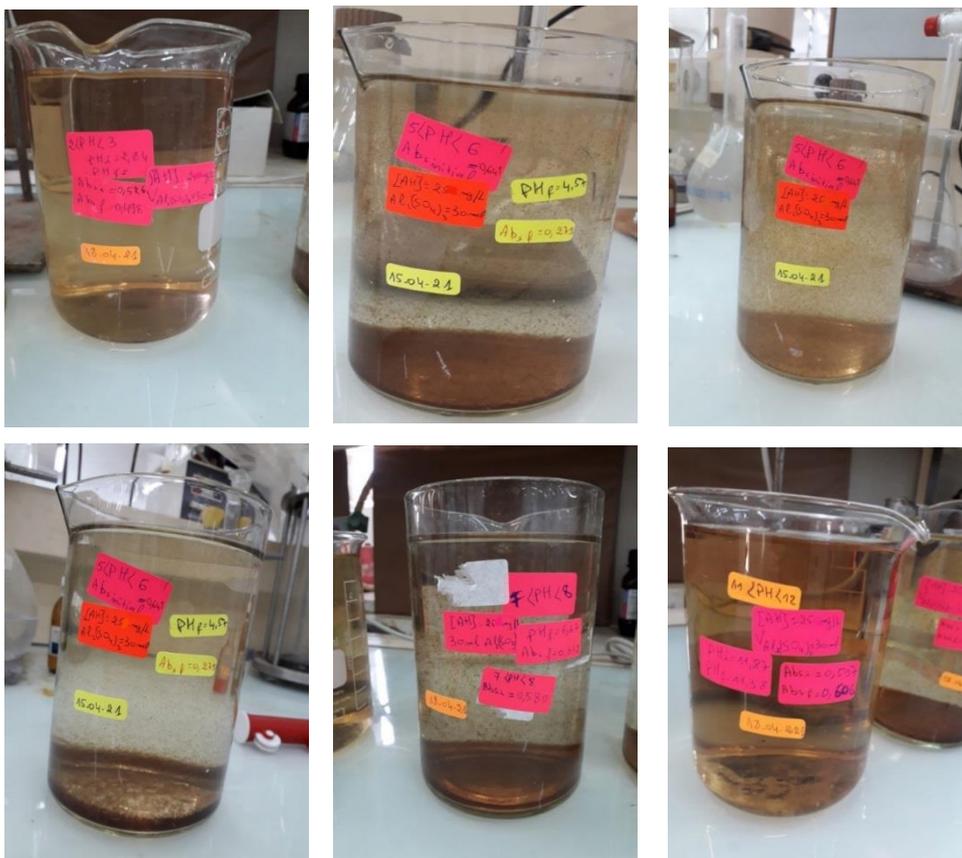
### 5.2.1. Effet de pH

Dans cette partie d'étude, nous avons fixé la concentration des AH à 25 mg.L<sup>-1</sup> avec 30 mg.L<sup>-1</sup> en coagulant. Les résultats obtenus sont rapportés sur la figure 5.3.

Nous remarquons que le meilleur rendement de réduction des AH obtenu est de l'ordre de 53,26 % pour un pH compris entre 5 et 6 et 35,86% au pH compris entre 7 et 8. Par contre, entre 11-12 il n'y a aucune élimination, malgré la formation de petits floccs comme le montre la figure 5.4.



**Figure 5.3 :** Evolution du rendement d'élimination des AH en fonction de pH,  
 $[AH]_{initiale} = 25 \text{ mg. L}^{-1}$



**Figure 5.4 :** Coagulation-floculation des AH aux différents pH

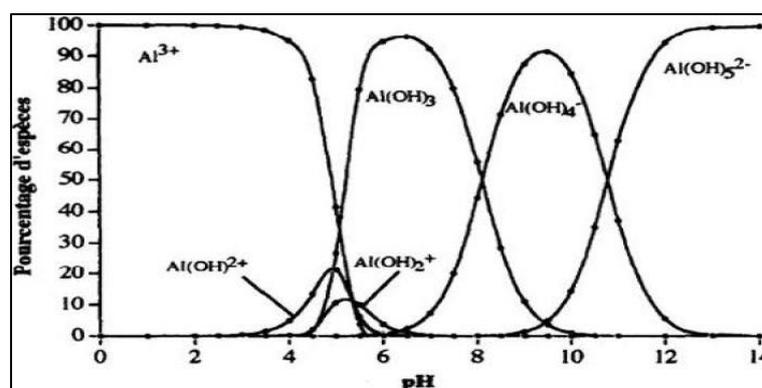
De nombreux auteurs ont mentionné que de bons rendements d'élimination des AH peuvent être obtenus aux mêmes pH à condition d'employer des dosages beaucoup plus importants en coagulant [64].

D'après les résultats expérimentaux obtenus, nous remarquons que la réduction des AH est fortement liée au pH du milieu. En effet, les mécanismes de réduction des AH par coagulation-floculation sont, en fonction de pH, de nature diverses et ils ne suivent pas les mêmes mécanismes classiques de la coagulation-floculation des particules colloïdales responsables de la turbidité.

Les faibles pourcentages de la réduction des AH aux pH très acides sont dus essentiellement à la précipitation des acides humiques à ces pH ( $\text{pH} < \text{pK}_a=4,75$ ) et aussi à la complexation des cations  $\text{Al}^{3+}$  majoritaires à ces pH (Figure 5.5) par les AH. L'élimination partielle des AH peut être la conséquence d'une complexation entre Al(III) et une partie des AH dont la masse molaire est élevée [65-66].

Par contre pour les pH entre 5 et 6, la réduction des AH est plus importante. Les réactions mises en jeu sont probablement nombreuses à cause de la présence majoritaire de plusieurs composés d'hydroxydes d'aluminium solubles et insolubles. Ce domaine de pH correspond à la solubilité de l'hydroxyde  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Figure 5.5).

Plus le pH du milieu augmente, plus les réactions d'hydrolyse de l'aluminium en  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  et  $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$  sont cinétiquement favorisées (Figure 5.5) et moins l'élimination de la matière organique par complexation, avec les composés d'hydroxydes d'aluminium solubles, est importante.



**Figure 5.5 :** Diagramme de stabilité des espèces ioniques dérivant de l'hydrolyse des sels d'aluminium

Lorsque le sel d'aluminium est en solution en présence de molécules organiques anioniques, deux réactions peuvent se traduire :



La première réaction (équation 5.1) correspond à la formation de complexes entre les AH et l'ion  $\text{Al}^{3+}$ .

La deuxième réaction (équation 5.2) correspond à l'adsorption des AH sur les précipités d'aluminium.

La coagulation est d'autant plus efficace que la valence du cation est élevée (théorie de Schulze-Hardy):

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_n^n = 1 C_n Z_N^2 \quad \text{Equation 5.3}$$

Avec :

$\mu$  : Force ionique.

$C_n$  : Concentration de l'ion n ( $\text{mol. L}^{-1}$ )

$Z_N$  : Valence de l'ion n [20].

Ainsi un ion trivalent est environ dix fois plus efficace qu'un ion divalent. Aussi, en pratique, les sels de fer ou d'aluminium trivalents ont été, et continuent d'être, largement utilisés dans tous les traitements de coagulation d'eau.

Les coagulants minéraux, par suite de leur hydrolyse, modifient les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter (pH, conductivité...):

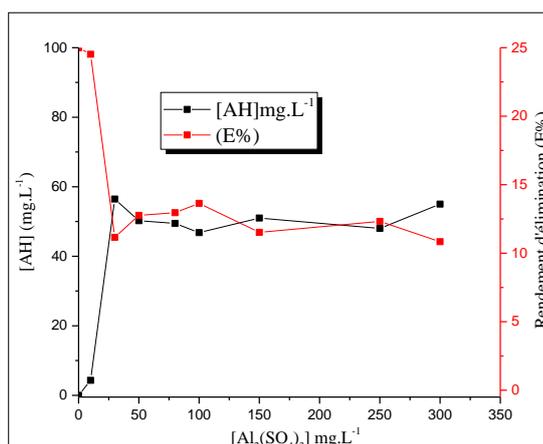


Par ailleurs, le **pH optimal** et la solubilité de l'hydroxyde sont fortement influencés par la force ionique et la présence de composés organiques tels que les acides humiques.

### 5.2.2. Influence de la dose du coagulant

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.6.

Plus la concentration du coagulant augmente, plus l'élimination des AH augmente dans l'intervalle de 0 à 30  $\text{mg.L}^{-1}$ , au-delà de cette valeur, le pourcentage de réduction se stabilise et un palier est observé. La meilleure élimination est obtenue pour 30  $\text{mg.L}^{-1}$  de coagulant. Cette valeur est fixée comme optimale pour le reste du travail.



**Figure 5.6** : Effet de la dose du biocoagulant sur la réduction des AH

### 5.3. Étude paramétrique de la coagulation-floculation des AH en utilisant la poudre de graines de Moringa comme biocoagulant

#### 5.3.1. Influence de la masse du biocoagulant

Le tableau 5.1 rassemble les résultats obtenus au pH de la solution aqueuse des AH préparée, pH = 11-12, pour différents temps de sédimentation des floccs.

**Tableau 5.1** : Effet de la dose du biocoagulant sur la réduction des AH

$$[AH]_{initiale} = 25 \text{ mg.L}^{-1}$$

Masse (Moringa) (g)	Temps de décantation (min)	Rendement d'élimination (E%)
0,5	60	0
	60	0
	120	0
<b>1</b>	60	30
	90	40,55
	<b>120</b>	<b>42,93</b>
1,5	60	0,73
	90	17,5
	120	26,47

Nous remarquons que le meilleur rendement d'élimination est obtenu pour une masse en biocoagulant de 1g.

### 5.3.2. Effet de pH

Dans cette partie d'étude, nous avons fait varier le pH du milieu pour différentes durées de décantation. Le tableau 5.2 résume les résultats de cette expérience.

**Tableau 5.2 :** Effet de pH sur la réduction des AH,  $m = 1g.L^{-1}$ ,

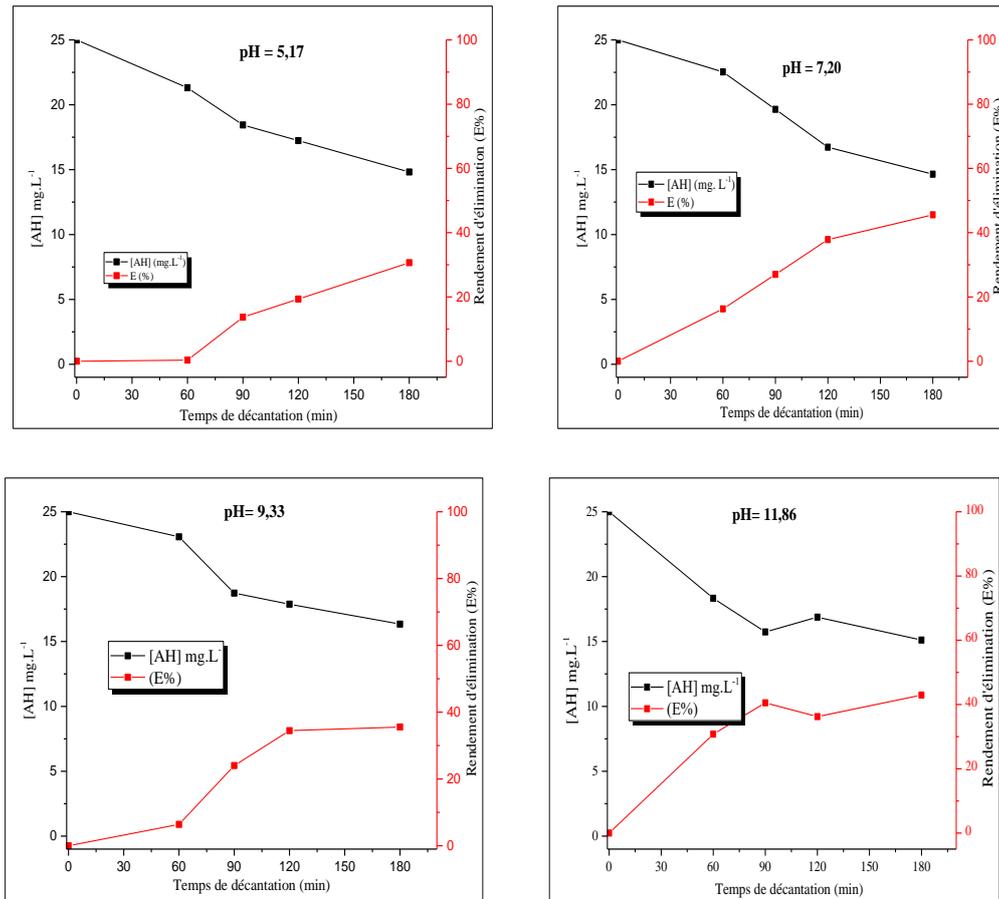
$$[AH]_{initiale} = 25 mg.L^{-1}$$

pH	temps de décantation (min)	Rendement d'élimination (E%)
5,17	30	0,32
	60	13,70
	90	19,35
	120	30,64
7,20	30	16,28
	60	27,00
	90	37,85
	120	<b>45,57</b>
9,33	30	06,39
	60	24,02
	90	34,47
	120	35,56
11,86	30	30,76
	60	40,55
	90	36,22
	120	42,93

Nous remarquons que le meilleur pourcentage de réduction des AH par le biocoagulant est obtenu au pH neutre (7,20). Ce résultat est intéressant puisqu'on n'a pas besoin d'ajouter des produits chimiques pour ajuster le pH des solution d'AH et des eaux de surfaces ni de sels métalliques, ce qui conduit à la formation de boues propres et dépourvues de métaux nocifs tels que l'aluminium et le fer.

Contrairement aux sels d'aluminium, le Moringa a donné de bons pourcentages d'élimination des AH aux pH basiques (11,86), c'est le pH des solutions aqueuses synthétique des AH, ce qui nous laisse réfléchir à effectuer des études approfondies pour élucider les mécanismes responsables de la coagulation-floculation des AH par le biocoagulant utilisé.

Les mêmes résultats ont été obtenus par d'autres chercheurs [67].



**Figure 5.7 :** Rendement d'élimination des AH par le biocoagulant à différents pH

La capacité de coagulation par les graines de *Moringa Oleifera* dépend de la qualité de la protéine cationique et de l'huile dans la graine. Alors que la protéine cationique a le rôle de réticuler les colloïdes de l'eau, comme un moyen de neutraliser leur charge négative et d'affaiblir le rejet de la double couche électrostatique de sorte que les forces de van der Waals réduisent la turbidité, l'huile de la graine de *Moringa Oleifera* a le pouvoir d'empêcher la connexion entre le coagulant et les floes.

### 5.3.3 Effet de temps de décantation

Après la fixation des deux conditions optimales ( $m_{biocoagulant} = 1g$  et  $pH = 7$ ), nous avons varié le temps de décantation des floes. Le tableau 5.3 rassemble les résultats obtenus.

**Tableau 5.3** : Effet de temps de décantation des floes d'AH

$$[AH_{initiale}] = 25\text{mg.L}^{-1} \text{ et}$$
$$m_{\text{Moringa}} = 1 \text{ g}$$

Temps de décantation (min)	Rendement d'élimination (E%)
30	14,54
60	30,76
90	40,55
120	42,93

Plus le temps de décantation augmente de 30 min à 90 min, plus l'élimination des AH est importante. Au-delà de 90 min de décantation, le rendement de réduction des AH ne dépasse pas 42,93%. Pour cela et pour des raisons techniques et économiques, nous avons choisi 90 min comme un temps largement suffisant pour laisser les floes sédimenter dans les réacteurs.

Le tableau 5.4 dresse une comparaison des résultats entre les deux coagulants utilisés.

**Tableau 5.4** : Comparaison entre le sulfate d'aluminium et le Moringa

$$[AH_{initiale}] = 25 \text{ mg.L}^{-1}$$

Sulfates d'aluminium				Poudre de graines de Moringa			
Temps de décantation (min)	Dose (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	E (%)	Temps de décantation (min)	Dose (g)	pH	E (%)
30	30	5-6	53,26	90	1	7,2	46

#### **5.4. Application des conditions optimales de la coagulation-floculation des AH présentes dans un échantillon de lixiviat par les deux coagulants**

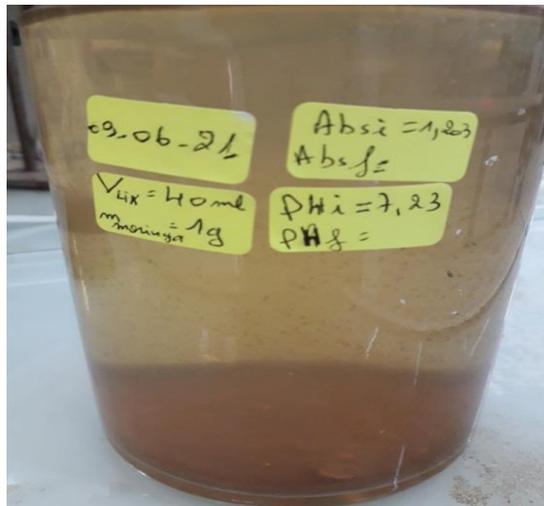
Les conditions optimales obtenues lors de l'étude paramétrique de la coagulation-floculation des AH par les deux coagulants : sulfates d'aluminium et la poudre des graines de Moringa, ont été choisies pour traiter par coagulation-floculation un échantillon de lixiviat prélevé au niveau du centre d'enfouissement technique (CET) de Hamissi (Wilaya de Tipaza) contenant des AH.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 5.5 suivant.

**Tableau 5.5** : Résultats de la coagulation-floculation des AH présents dans le lixiviat

Coagulant utilisé	pH <sub>optimum</sub>	Quantité du coagulant	Rendement d'élimination des AH (%)
Sulfate d'aluminium	7,23	1g	0
Poudre des graines de Moringa	5,21	30 mg.L <sup>-1</sup>	0

L'analyse du tableau montre qu'il n'y a aucune élimination des AH dans le lixiviat alors que la figure 5.8 montre clairement que les floccs d'AH et poudre de graines de Moringa ont pu se former et se décanter mais la charge organique dissoute dans le lixiviat a fait que l'absorbance à 254 nm à la fin du traitement augmente due aux interférences, car le phénomène de la coagulation-floculation n'affecte que les matières non dissoutes (MES).



**Figure 5.8** : Echantillon de lixiviat traité par le biocoagulant

## CONCLUSION GENERALE

Le processus de la coagulation-floculation a fait apparaître divers mécanismes, souvent complexes et dépendant fortement du pH de l'eau à traiter, de la dose du coagulant et du temps de décantation.

Les tests au laboratoire ainsi que les résultats obtenus dans cette étude ont permis de considérer l'hypothèse selon laquelle il est possible de remplacer les coagulants chimiques par les coagulants naturels tels que les graines de *Moringa Oleifera* pour le traitement des eaux chargées en acides humiques (AH).

En effet, une réduction proche de 46 % a été obtenue à pH = 7, pour une concentration initiale en AH de 25 mg.L<sup>-1</sup> et 1g de biocoagulant et un temps de décantation de 1h30 min de décantation. Alors qu'il s'agit de 53 % d'élimination avec 30 mg.L<sup>-1</sup> de sel d'aluminium à pH de 5-6 après 30 min de décantation.

Des efforts doivent être encore faits dans pour mieux comprendre la relation structure/taille et les conséquences vis-à-vis de la cohésion et ultimement vis-à-vis de la sédimentation et du volume des boues tout en essayant de déterminer les mécanismes réactionnels exacts régissant la complexation entre les AH et le biocoagulant.

En perspectives, dans la séparation liquide/solide par coagulation-floculation, le choix des coagulants et/ou floculants est très large et son influence est grande sur les procédés envisagés pour effectuer la séparation (sédimentation, flottation, filtration) et pour limiter la quantité de boues produite. Des coagulants-floculants minéraux et organiques sont disponibles. La connaissance de leur chimie, de leur structure et des mécanismes d'interaction avec les minéraux sont nécessaires pour optimiser les procédés.

## *Références Bibliographiques*

- [1] **GUEU, S., 2019.** Élimination des acides humiques présents dans l'eau par adsorption et/ou photocatalyse. Thèse de Doctorat Département Chimie-physique Université Lorraine
- [2] **TAHIRI, A., DESTAIN, J., DRUART, P., THONART, P., 2014.** Propriétés physico-chimiques et biologiques des substances humiques en relation avec le développement végétal. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 18(3), 436-445.
- [3] **REZEG, A., ACHOUR, S., 2017.** Élimination de l'acide humique par la combinaison sulfate d'Aluminium/Bentonite. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 30, pp. 333-347.
- [4] **FABRE, J., AYELE, M., MAZET and LAFRANCE, P., 2021.** Adsorption du pentachlorophenol sur divers matériaux: influence de co-adsorbats organiques (substance humiques et lindane). *Revue des sciences de l'eau. Journal of water science.*
- [5] **GUERGAZI, S., AMIMEUR, D., ACHOUR, S., 2013.** Élimination des substances humiques de deux eaux de surface algériennes par adsorption sur charbon actif et sur bentonite. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 13, pp. 125-137.
- [6] **BOTTERO, J., LARTIGES, B., 1993 .** Séparation liquide/solide par coagulation-floculation : les coagulants-floculants, mécanismes d'agrégation, structure et densité des floccs. In: *Sciences Géologiques. Bulletin*, tome 46, n°1-4,. Minéraux finement divisés. pp. 163-174; doi : <https://doi.org/10.3406/sgeol.1993.1902>.
- [7] **ZZIANE, S., 2007.** Traitement des eaux de rejets de l'unité CERAMIT <<TENES>>, Mémoire de Magister; Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie.
- [8] **CHERIFI, S., OUAGUED, A.,** Efficacité de la coagulation-floculation dans le traitement des eaux de rejets de l'unité Ceramit «Tenés» Laboratoire eau-environnement, Chlef, Algérie
- [9] **ZONGO, I ., 2009.** Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèse de Doctorat L'institut National Polytechnique de Lorraine.
- [10] **ZODI, S., 2012.** Etude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape

de séparation : application à l'industrie textile et papetière. Thèse de doctorat École Doctorale Ressources Procédés Produits Environnement université de Lorraine.

[11] **LAKHDARI, B., 2011.** Effet de la coagulation floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz. Mémoire magister en Chimie Inorganique et Environnement Université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen, Algérie.

[12] **AMIMEUR, Dj., 2018.** Contribution à l'étude de l'élimination du plomb par coagulation floculation et par adsorption sur charbon actif. Effet de la minéralisation et des paramètres réactionnels thèse de doctorat département de sciences l'hydraulique Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.

[13] **GHERNAOUT, Dj., 2008.** Élimination des substances humiques et des germes indicateurs de contamination bactériologique par électrocoagulation assisté d'un traitement magnétique de l'eau, Thèse de doctorat département de chimie industrielle Université Blida 1, Algérie.

[14] **TAYEB, H., 2018.** Étude sur un pilote de la floculation de nouveaux floculants Acrylamide-4-Vinylpyridine pour la fixation des métaux lourds et des micropolluants thèse de doctorat, Département de Chimie Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Algérie

[15] **RICARDO, H., 2006.** Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable, Thèse de doctorat l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[16] **SIANGSANUN, V., 2010.** New Hybrid Process: Hydro cyclone, Coagulation, Flocculation and Flotation for water treatment process. Thèse de doctorat en génie des procédés et l'environnement université de Toulouse.

[17] **AYECHE, R., BALASKA, A., 2010.** Caractérisation et traitement par Coagulation-floculation d'un effluent de laiterie , journal de la société algérienne J.Soc.Alger.Chim., 20(2), 83-93.

[18] **KHELLILI, H , 2016.** Effet des interactions chlore /coagulant aluminique sur la réactivité d'acides organiques aromatiques. Thèse de doctorat département d'hydraulique Université Mohammed Khider-Biskra, Algérie.

- [19] TZOUPANOS, N. D., ZOUBOULIS, A. I., 2008, Coagulation-Flocculation processes in water / waste water treatment: the application of new generation of chemical reagents. 6th IASME/WSEAS International Conference on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT (HTE'08).
- [20] DESJARDINS, C., 1999. Simulation et étude en laboratoire de la flocculation lestée (actiflo) à l'aide d'une procédure modifiée de jar test. Mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrises sciences appliquées, édition École polytechnique de Montréal, Canada.
- [21] MOHD-SALLEH, N.A., MOHD-ZIN, N. S., NORZILA, A., 2019, Review of Wastewater Treatment using Natural Material and Its Potential as Aid and Composite Coagulant Sains Malaysiana 48(1). 155–164.
- [22] VIJAYARAGHAVAN, G., SIVAKUMAR, T., VIMAL KUMAR, A., 2011. Application of plant based coagulants for waste water treatment. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies E-ISSN2249– 8974.
- [23] KURNIAWAN, B. S., SHEIKH ABDULLAH, S.R., IMRON, M., MOHD SAID, S., IZZATI, I., HASSIMI, A., RAZI OTHMAN, A., PURWANTI, I., 2020. Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. International journal of Environmental Research and Public Health. 17, 9312; doi: 10.3390/ijerph17249312.
- [24] NOUREDDINE, N., 2017. Contribution a la réduction de Cr (VI) par voie biologique. Effet de l'azote et du carbone. Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie.
- [25] Dégriment SUEZ, **Memento technique de l'eau**, dixième édition, Tome 1 et 2, 2005.
- [26] FOIDL, N., MAKKAR, H.P.S., BECKER, K., 2001. The potential of Moringa Oleifera for agricultural and industrial uses (45-76). In: Fuglie L. J (editor). The miracle tree: the multiple attributes of Moringa.-Wageningen : CTA; Dakar: CWS.
- [27] LOUNI, S., 2009. Extraction et caractérisation physicochimique de l'huile de graines de Moringa Oleifera. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, Algérie.

- [28] **MADI, O.P., BOUROU, S., NOE W., 2012.** Utilisations et importances socio-économiques du *Moringa oleifera* Lam. en zone de savanes d’Afrique Centrale. Cas de la ville de Maroua au Nord-Cameroun. *Journal of Applied Biosciences* 60: 4421– 4432.
- [29] **KAMBLE, M., RADMAS CHAVAN, B., GABRIEL, A., AZPELTLA, T., SEEMA, V. MEDHE SURANGNA, J, RAKESH, R., JADHAV. 2014.** Application of *Moringa oleifera* for Development of Sustainable and Biosecure Aquaculture, *Aquacultura Indonesiana* 15 (2): 64-73.
- [30] **RAMANANJANAHARY, M. L., 2016.** Valorisation scientifique du tourteau de graines de *Moringa Oleifera* en alimentation animal, Thèse de Doctorat, université d’Antananarivo, Madagascar.
- [31] **Microfel 2008.** *Moringa oleifera* Lamarck "L'arbre miracle".
- [32] **HASSANATA, M., 2016,** Le *Moringa* : intérêt nutritionnels et sanitaires, ECHO West Africa Forum, Institut de Recherche en Sciences de la Santé Centre national de la Recherche scientifique et technologique (IRSS/CNRST), Ouagadougou, Burkina Faso.
- [33] **LALEYE, O. A. F., AHISSOU, H., OLOUNLADE, A. P., AZANDO, E. V. B., & LALEYE, A, 2015.** 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), 2682-2700.
- [34] **HARITIANA, J. R., NAMBININA, R., RAMAROSON, J., RANDRIANARIVELO, F., HERIHAJANIAVO, A. M., ANDRIANAIVO, L., 2015.** Université d’Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, BP 1500 Antananarivo 101, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil, BP 6294, Antananarivo 101.
- [35] **ARMELLE., BROIN, M., 2010.** Produire et transformer les feuilles de *Moringa*.
- [36] **Quintin, E., Muhl ., Elsa, S., Petrus, J. Robbertse., 2011.** Adaptability of *Moringa oleifera* Lam. (Horseradish) Tree Seedlings to Three Temperature Regimes, University of Pretoria, Pretoria, South Africa.

- [37] **BOUREKOUA, H., 2018.** Panification traditionnelle sans gluten type « *khobz eddar* » : formulation avec améliorants naturels, thèse de doctorat, université de Constantine 1, Algérie
- [38] **PRICE, M. L., 2007.** Le Moringa. Note technique d'ECHO.
- [39] **OLSON, M. E., 2002.** Combining data from DNA sequences and morphology for a phylog-eny of Moringaceae (Brassicales). *Systematic Botany.* ; 27(1).
- [40] **KEBREAB, G., 2006.** Natural Resources for Appropriate Water Treatment, Sustainable development of water resources, water supply and environmental sanitation.
- [41] **KABORE, A., SAVADAGO, B., ROSILLON, F., ALFRED, S., DIANOU, D., 2013.** Optimization of the effectiveness of the Moringa Oleifera seeds in the treatment of drinking water in sub-Saharan Africa, Case study of the waters of Burkina Faso, sciences de l'eau.
- [42] **JACQUES, K., FATOMBI, JOSSE, R., WOTTO, V., TAOUFIKI, A., COULOMB, B., 2007.** Paramètre physico-chimiques de l'eau d'Opkara traitée par les graines de Moringa Oleifera. France.
- [43] **BERRAHOU, Gh., 2013.** Préparation et interaction de matériaux nano-composites avec différents polluants. Mémoire de Magister. Université Mohammed Boudiaf. Oran, Algérie.
- [44] **PLANCQUE, G., 2001.** Interaction entre radionucléides et colloïdes organiques structure et réactivité des substances humiques. Thèse de doctorat. Département de Chimie. Université d'Evry d'Essone.
- [45] **TAOUALIT, N., 2018.** Techniques Membranaires de l'extraction-concentration-récupération des espèces métalliques et organiques. Application aux traitements des eaux. Université Blida1, Algérie.
- [46] **MOURNALOU, K., TCHEGUENI, S., KOLEDZI, K.A., 2013.** Extractions et caractérisations physico-chimiques des substances humiques naturelles des sols et du compost. *Int. J. Dual. Cherm. Sci* : 7(3)-1405-1415.
- [47] **NAMAN, F., SOUDI, B., EL HERRADI, H., 2015.** Extraction et caractérisation des substances humiques des sols du périmètre irrigué des Doukkala au Maroc. Université Chouaib Doukkali. *J Mater. Environ. Sci.*6(9). 2647-2654.

- [48] **SIEF, N., COURTOT, P., 1989.** Comportement conservatif des substances humiques dans un estuaire macrotidal. Composition des Phases particulières et dissoute. Université Tiachreen, Lattaqui, Syrie.
- [49] **AIT RAMDANE, CH.,** Stabilité, synthèse et étude électrochimique de complexes bio-inorganiques de métaux de transition avec acides humiques. Thèse de Doctorat. Université Houari Boumediène, Algérie.
- [50] **RAMDANI, N., 2015.** Transformation de la matière organique au cours de co-compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts. Thèse de Doctorat, Université Ahemd Ben Bella, Oran, Algérie.
- [51] **ROGER, G., 2018.** Structure et dynamique de substances humiques et poly électrolytes modèle en solution. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie.
- [52] **BERTHE, C., 2006.** Étude de la matière organique contenue dans des lixiviats issue de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilées. Thèse de Doctorat. Université de Limoges.
- [53] **BOUMENDIL, S., 2016.** Effet de solvants sur les dérivés de l'acide cinnamique. Étude quantitative. Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes. Algérie.
- [54] **TAOUALIT, N., AZZAZI, F.Z., BENKADI, N.E., HADJ-BOUSSAAD, D.E., 2016.** Extraction and Transport of Humic Acid using Supported Liquid-Membrane Containing Trioctyl Phosphine Oxide (TOPO) as the Carrier", *Acta Physica Polonica Series A* 130 (1), 115-121. DOI : 10.12693/APhysPolA.130.115
- [55] **CHAHMI, GH. S., TIGHEZI, KH., 2017.** Mémoire de Master, Université d'Adrar, Algérie.
- [56] **WUANA, R. A., SHA'ATO, R., IORHEN S., 2015,** Aqueous phase removal of ofloxacin using adsorbents from *Moringa Oleifera* pod husks. *Advances in Environmental Research*, Vol. 4, No. 1: 49-68.
- [57] **REDDY, D. H. K., SESHAIHA, K., REDDYB, A.V.R., LEEC, S. M.,** *Carbohydr. Polym.*, 88 (2012) 86 – 1077.
- [58] **YEHE, M. D., GBASSI, G. K., 2019,** Etude physico-chimique d'un coagulant naturel : la poudre de *Moringa Oleifera*. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 33 287 – 299.

- [59] SCHEUFELE, F.B., MODENES, Q.N., ESPINOZA-QUIÑONES, F.R., CARRARO DE SOUZA P.S., CAMILA RAQUEL BETIN CRIPA C.R., DOS SANTOS J., STEFFEN V. ET KROUMOVA.D., 2015 . Adsorption of Direct of Yellow ARLE Dye by Activated Carbon of Shell of Coconut Palm: Diffusional Effects on Kinetics and Equilibrium States. INT. J. BIOAUTOMATION, 19(2): 187-206.
- [60] REDDY, D. H. K., HARINATHA, Y., SESHAIHA, K., REDDY, A. V. R, Chem Engineer J., 162 (2010) 34 – 626.
- [61] REDDY, D. H. K., RAMANA, D. K. V., SESHAIHA, K., REDDY, A. V. R., Hazard Mater, J, 268 (2011) 57 – 150.
- [62] BENYOUCEF, S., HARRACHE, DJ., 2014. Caractérisation de la microstructure de sciure de bois de pin sylvestre "Pinus sylvestris" (Microstructure characterization of scots pine "Pinus sylvestris"sawdust). J. Mater. Environ. Sci. 6 (3): 765-772.
- [63] NETO, V.O., CARVALHO, T.V., HONORATO, S.B., GOMES, C.L., BARROS, F.C., ARAUJO-SILVA M.A., FREIRE, P .T.C., NASCIMENTO, R.F., 2012. Coconut bagasse treated by thiourea /ammonia solution for cadmium removal: kinetics and adsorption equilibrium. "Cd sorption on coconut" Bio Resources 7(2): 1504 – 1524.
- [64] REZEG, A., ACHOUR, S., 2009. Mécanisme d'élimination d'acides organiques aromatiques par le sulfate d'aluminium et effet de la minéralisation. Courrier du Savoir – N°09.
- [65] N. TAOUALIT., M. AKLOUK, 1994. Mémoire d'ingénieur, Blida 1.
- [66] BOUTEMAK, L., BOUKHATEM, F., 1993. Mémoire d'ingénieur, Blida 1.
- [67] NGUYEN, T., THI HUE, C., 2018. Enhanced water treatment by Moringa Oleifera seeds extract as the bio-coagulant role of the extraction method. Journal of water supply: Recherche and Technology\_Aqua 67.7.