

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences biologiques de l'environnement
Spécialité biodiversité et sécurité alimentaire



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Recherches avancées dans le traitement des
eaux de surfaces et des eaux usées avec les
graines de *Moringa Oleifera***

Présenté par :

GANNA Nassima & AMOUR Douniazed

Soutenu le : 15/09/2022

Devant le jury composé de :

M. SIDI HACHEMI

MCA

Président

M. BEN HAMICHE Nadir

MCA

Encadreur

Mme MANKOU Nadia

MAA

Examinatrice

Année universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Au terme de la rédaction de ce mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que nous devons tout d'abord au **DIEU** le tout puissant et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail. Qu'ils trouvent ici nos vifs respects et notre profonde gratitude.

Par la même volonté et la même chaleur, nous tenons à remercier **Mr BENHAMICHE Nadir**, notre encadreur, qui a suivi ce travail dans tous ces détails avec une rigueur scientifique exceptionnelle. Pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils durant la préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont à **M. SIDI Hachemi** qui nous a honorées en acceptant de présider ce jury et Mme **MANKOU Nadia**, pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail, en acceptant de l'examiner.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement la doctorante **Melle KRIBECHE Amina** pour ses conseils, sa disponibilité, et sa patience pour l'achèvement de ce travail.

Et enfin, toutes nos reconnaissances à tous nos enseignants qui nous ont soutenus durant notre parcours universitaire, et toute personne qui a participé, de près ou de loin, de mener à bien 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 travail à :

*A mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, mon père **ABD ALAZIZ** qui a sacrifiés toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, et ma mère **ATIKA MAOUCHE** qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie.*

*A mes très chers frères **HOUSSAM, WAIL ET NASSIM** que dieu le tout puissant les protègent et les gardent*

*À mon cher fiancé **ANIS**, pour le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail, et sa belle-famille.*

*A mes fideles amies **WISSAM** et **SONIA***

A toute ma grande famille, grands-parents, oncles, tantes cousins et cousines

À mon magnifique et merveilleux binôme qui compte énormément pour moi «

***NASSIMA** »*

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

DOUNIAZED

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

Du profond de mon cœur je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers :

À mon cher père *KAMEL*, l'épaule solide, l'œil attentif, la personne la plus digne de mon respect. Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux. Je tiens à honorer l'homme que tu es.

À la femme la plus chère à mes yeux maman *SAFIA*. Tu m'as donnée la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide.

À mon cher mari *SALIM*, pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail et à qui je voudrais exprimer mes affections et mes gratitude, merci infiniment. Je t'adore !

À mes chers frères *HALIM* et *RAHM* À tous les moments d'enfance passés avec vous mes frères, en gage de ma profonde estime pour l'aide que vous m'as apportée, je vous aime et vous êtes ma force.

À ma belle-sœur *AMEL*. Je te dis merci et je te souhaite que de bonheur, réussite et prospérité. Je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien le long de mes études. Je t'aime beaucoup. Je voudrais t'exprimer à travers ces quelques lignes tout l'amour et toute l'affection que j'ai pour toi. Je t'aime !

À toute ma famille et mes proches qui m'ont toujours encouragée et toutes personnes qui compte pour moi.

Une spéciale dédicace à mon magnifique et merveilleux binôme qui compte énormément pour moi « *DOUMAZED* »

À tous mes enseignants qui mon marquée.

À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment !

NASSIMA

Liste des abréviations

c/f : coagulation/floculation

COT : carbone organique total

DBO5 : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

Em : élimination mesurée

Ep : élimination prédite

FETP: final effluent treatment plant

GC-FID: Gas Chromatograph(y)- Flame Ionization Detector

MES : matières en suspension

MO : *Moringa Oleifera*

MOSH: Master of Science in Occupational Health

NASA : Administration nationale de l'espace et de l'aéronautique

NTU: Unité Standard de Mesure de la Turbidité

ProtAlb: Protéine Albumine

RSM : response surface methodology

THM: trihalométhanes

Liste des figures

Figure 1	Distribution géographique de <i>Moringa Oleifera</i> dans le monde	3
Figure 2	Différentes parties de <i>Moringa oleifera</i>	5
Figure 3	Schéma de fonctionnement d'électrocoagulation	13
Figure 4	Schéma fonctionnement de disque biologique	15
Figure 5	Schéma explique le fonctionnement des boues activées	15
Figure 6	Schéma de fonctionnement de la phytoépuration	16
Figure 7	Schéma de coagulation-floculation	18
Figure 8	Répartition des études passées de 2016 à 2021 sur l'adsorption de MO pour l'élimination des métaux lourds et des colorants organiques	41

Liste des tableaux

Tableau I	Classification systématique de la plante <i>Moringa Oleifera</i>	4
Tableau II	Limites écologiques de <i>Moringa Oleifera</i>	3
Tableau III	Autres intérêts de <i>Moringa oleifera</i>	5
Tableau IV	Composition chimique des graines de <i>Moringa oleifera</i>	7
Tableau V	Profils vitaminique et minéral des graines de <i>Moringa oleifera</i>	7
Tableau VI	caractéristiques physicochimiques des eaux usées après la coagulation/floculation (C/F) a laide de MO et d'ultrafiltration (UF)	38
Tableau VII	Solutions générées par design-expert sur la base de la désirabilité pour (a) l'extrait de graines de <i>Moringa oleifera</i> et (b) le chitosane	44

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

1	Introduction générale	1
Chapitre I	Généralités sur <i>Moringa oleifera</i>	2
I.1	Origine et répartition géographique de la plante <i>Moringa Oleifera</i>	3
I.2	Classification Systématique	3
I.3	Description botanique	4
I.4	Ecologie et conditions climatiques du <i>Moringa oleifera</i>	5
I.5	Culture et récolte du <i>Moringa oleifera</i>	5
I.6	Différents domaines d'utilisation et intérêts de <i>Moringa</i>	6
I.6.1	Utilisation nutritionnelle	6
I.6.2	Utilisation médicinale	7
I.6.3	Utilisation dans la purification de l'eau	7
I.7	Composition des graines de <i>Moringa oleifera</i>	8
Chapitre II	Procédés de traitement des eaux	
II.1	Introduction	10
II.2	Procédés physiques	10
II.2.1	Dégrillage	10
II.2.2	Dessablage	10
II.2.3	Déshuilage et dégraissage	10
II.2.4	Tamisage	11
II.2.5	Filtration	11
II.2.6	Flottation	11
II.2.7	Centrifugation	11
II.3	Procédés chimiques	12
II.3.1	Oxydation	12
II.3.2	Echange d'ions	12
II.3.3	Adsorption	12

II.3.4	La photo catalyse	12
II.3.5	L'électrocoagulation	13
II.3.6	Techniques membranaires	13
II.4	Procédés biologiques	14
II.4.1	Disques biologiques	14
II.4.2	Boue activée	15
II.4.3	Lit bactérien	15
II.4.4	Lagunage	16
II.4.5	Phytoépuration	16
II.5	Procédés radiatifs	16
II.5.1	Ultra-violets	17
II.5.2	Bombardement électronique	17
II.6	Procédés complémentaires	17
II.6.1	L'élimination d'azote	17
II.6.2	L'élimination du phosphore	17
II.6.3	La désinfection	18
II.7	Procédés physico-chimiques	18
II.7.1	La coagulation-floculation	18
II.7.2	Rôle de la coagulation-floculation	19
II.7.3	But de la coagulation-floculation	19
II.7.4	Principe de la coagulation-floculation	19
II.7.5	Particules mises en jeu	19
II.7.5.1	Matières en suspension	19
II.7.5.2	Matières dissoutes (moins de quelques nanomètres)	19
II.7.5.3	Particules colloïdes	20
II.7.5.4	Mode déstabilisation des particules colloïdales	20
II.7.6	Théorie de la double couche	20
II.7.7	Phénomène de coagulation	21
II.7.8	Phénomène de floculation	22
II.8	Traitement des eaux avec <i>Moringa oleifera</i>	22
Chapitre III	Les dernières recherches de traitement des eaux avec <i>Moringa oleifera</i>	24
III.1	Introduction	

III .2	Dans le traitement des eaux potables	24
III.2.1	Etude menée par Reck et ses collaborateurs en 2020	24
III.2.2	Etude menée par Teo et ses collaborateurs en 2022	26
III.2.3	Etude menée par Adewole et ses collaborateurs en 2020	28
III.2.4	Etude menée par Bezzara et ses collaborateurs en 2020	30
III.2.5	Etude menée par Gautam et ses collaborateurs en 2020	30
III.2.6	Etude menée par Islam et ses collaborateurs en 2021	31
III.2.7	Etude menée par Akshay murali et ses collaborateurs en 2022	32
III.2.8	Etude menée par Moulin et ses collaborateurs en 2020	33
III.3	Dans le traitement des eaux usées	34
III.3.1	Traitement avec <i>Moringa oleifera</i> seule	35
III.3.1.1	Etude menée par Adulodun et ses collaborateurs en 2020	35
III.3.1.2	Etude menée par Sané et ses collaborateurs en 2022	36
III.3.1.3	Etude menée par Rai et ses collaborateurs en 2022	37
III.3.1.4	Etude menée par Desta et pote en 2021	39
III.3.1.5	Etude menée par Benettayeb et ses collaborateurs en 2022	40
III.3.1.6	Etude menée par Smahi et ses collaborateurs en 2020	42
III.3.2	<i>Moringa</i> et autres coagulant	44
III.3.2.1	Etude menée par Tong et ses collaborateurs en 2022	44
	Conclusion générale	46

Références bibliographiques

Introduction générale

L'eau est source de vie (**Papa, 2002 ; Silman, 2003**). Elle recouvre plus de 71 % de la surface terrestre. L'eau est un élément naturel d'une importance primordiale indispensable à toute forme de Vie. L'eau est une richesse nécessaire à toute activité humaine. C'est un facteur de production déterminant dans le développement durable. Elle devient de plus en plus au centre des intérêts stratégiques. Il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance sur les ressources en eaux existantes ainsi que sur leur qualité (**Reggam et al., 2015**).

Les besoins en eau potable augmentent régulièrement avec l'accroissement démographique et l'industrialisation dans de nombreux pays émergents. A la fin du siècle dernier, le nombre de personnes qui n'avaient pas accès à l'eau potable était estimé à 1,1 milliard, soit 1/6 de la population mondiale (**Lakhdari, 2011**).

Lorsque l'homme utilise l'eau, il ne fait pas que la consommer, mais il en rejette une partie dans l'environnement. C'est ce que l'on appelle l'eau usée. Cette eau usée peut contenir différents polluants. La pollution des eaux est définie comme toute modification physique ou chimique de la qualité des eaux, toute en ayant une influence négative sur l'écosystème et les organismes vivants qui rendent l'eau inadéquate aux usages souhaités (**Manceur et Djaballah, 2016**). Donc, on dit que l'eau est polluée, lorsque sa composition ou son état est directement ou indirectement modifié par des produits chimiques, des déchets industriels ou autres comme l'action de l'homme (**Ezziane, 2007**).

L'eau constitue l'élément majeur du monde minéral et biologique. Un des problèmes sérieux dans le monde est la mise à disposition des populations de l'eau potable, en particulier, dans les pays en voie de développement. La production d'eau potable nécessite l'utilisation des produits chimiques (**Chantrel, 2002**).

Divers coagulants synthétiques à base d'aluminium, de sels ferriques et de soude sont largement utilisés, bien que leurs sécurités pour la santé lors d'une exposition à long terme puisse induire l'Alzheimer et bien d'autres maladies (**Chantrel, 2002**). Récemment, de nombreux rapports ont fait état d'un lien possible entre des niveaux élevés d'aluminium résiduel et plusieurs troubles médicaux. Ce qui a suscité un intérêt mondial pour la recherche d'un coagulant de substitution plus sûr pour la santé et sans danger pour l'environnement (**Tejavath, 2011**).

Des alternatives naturelles aux coagulants et aux désinfectants actuellement utilisés ont été envisagées, y compris les plantes cultivées dont les *Capparidaceae*, les *Papilionaceae*

et les Moringaceae. Ces dernières, bien qu'elles soient très similaires aux Capparidaceae, forment une famille à part entière comprenant un genre *Moringa* avec 14 espèces dont *Moringa oleifera* (Hedji *et al.*, 2014). Cet arbre tropical, qui possède un énorme potentiel et des propriétés bénéfiques pour l'humanité, a une importance considérable en tant qu'agent flocculant et désinfectant. En effet, contrairement aux autres coagulants naturels, les graines du *Moringa* présentent une activité flocculante naturelle et plus efficace avec une réduction de la turbidité jusqu'à 92-99 % (Ghebremichael *et al.*, 2005).

Il a été prouvé que *Moringa Oleifera* est le meilleur coagulant naturel encore découvert qui peut, en effet, remplacer les flocculant minéraux, tels que le sulfate d'alumine, qui est largement utilisé dans le monde entier (Vilaseca *et al.*, 2014), par la présence de protéines cationiques actives, qui agissent en tant qu'agent adsorbant, coagulant et désinfectant (Moulin *et al.*, 2019). Ceci lui a conféré la propriété de permettre de traiter l'eau de boisson, les eaux usées et les effluents d'usines (Aruna et Srilatha, 2012).

L'objectif global de notre travail est de réaliser l'état de l'art sur les dernières études réalisées à ce propos et cerner les avancements qu'ont marqués les chercheurs avec le souhait de substituer finalement les coagulants chimiques par ce coagulant organique venant de cet arbre miracle. Pour cela ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- Un premier chapitre, où des généralités sur *Moringa oleifera* seront présentées, ses majeures propriétés et ses divers champs d'utilisations.
- Le deuxième chapitre va être consacré aux différents procédés de traitement des eaux avec des graines de *Moringa oleifera*.
- Dans le troisième chapitre, les avancements d'utilisation des graines du *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux usées et la potabilisation des eaux de boisson seront abordés.

Chapitre I

Généralités sur la *Moringa* *oléifera*

Moringa Oleifera est potentiellement l'une des plantes les plus utiles et polyvalentes sur la planète. Il est vénéré comme un arbre miracle ou il était prisé dans les civilisations romaine, Grecque et Egyptienne pour ses propriétés (**Gandji et al., 2018**).

I.1 Origine et répartition géographique de la plante *Moringa Oleifera*

La *Moringa oleifera* (MO) est originaire des piémonts himalayens, et plus particulièrement dans le Nord-ouest de l'Inde, du Chenab vers l'Est jusqu'au Sarda et cultivée dans toutes les plaines de l'Inde. Elle est connue sous le nom d'arbre à pilons, radis de cheval, arbre miracle, meilleur ami de la mère, etc (**kunwar et al., 2022**).

Moringa est cultivée dans tout le Moyen-Orient et s'étend à un environnement diversifié de régions tropicales et subtropicales d'Afrique et d'Amérique (**Lakshmidamma et al., 2021**).



Figure 1. Distribution géographique de *Moringa Oleifera* dans le monde (**Saini et al., 2016**)

I.2 Classification Systématique

Moringa oleifera Lam (synonyme : *M. pterigosperma* Gaertner) appartient à une famille mono-générique d'arbres et arbustes (**Jed et al., 2005 ; Abdul et al., 2014**).

Les Moringacées comprennent treize espèces. Les douze espèces sont bien connues : *M. arborea*, *M. borziana*, *M. concanensis*, *M. drauhardii*, *M. hildebrandtii*, *M. longituba*, *M. ovalifolia*, *M. peregrina*, *M. pygmaea*, *M. rival*, *M. uspoloniana* et *M. stenopetala* (**Hedji et al., 2014**). *Moringa* porte différents noms selon les régions. Par exemple au Sénégal, il est appelé « Nebeday » ; mot dérivé de l'anglais « Neverdie » qui veut dire « ne meurt jamais » (**Fuglie, 2001**). Il porte aussi d'autres noms tels que : benzolive, arbre à baguette, kelor, marango, mlongue, mulangay, saijhan et sajna (**Dhakar et al., 2011**).

Tableau 1. Classification systématique de la plante *Moringa Oleifera* (Bichi, 2013).

Règne	Planta
Sous- règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Dilleniidae
Ordre	Capparales
Famille	Moringaceae
Genre	Moringa
Espèce	<i>Oleifera</i>

I.3 Description botanique

Moringa Oleifera est un arbre pérenne, à croissance rapide qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur (Houndji *et al.*, 2013). Le tronc est généralement droit, mais il est parfois très peu développé. En général, il atteint 1.5 à 2 mètres de hauteur avant de se ramifier, bien qu'il puisse parfois atteindre les 3 mètres (Foidl *et al.*, 2001). Les branches poussent de manière désorganisée et la canopée est en forme de parasol (Louni, 2009). Ses feuilles sont alternées, bi et tri pennées, et croissent surtout au bout des branches (Maevalandy, 2006). Elles mesurent généralement de 2 à 70 cm de long. Les fleurs de *Moringa Oleifera* mesurent 2.5 cm de large et se présentent sous forme de panicules axillaires et tombantes de 10 à 25 cm. Elles se caractérisent généralement par leur abondance et leur odeur agréable. Elles sont blanches ou de couleur crème, avec des points jaunes à la base (Hédji *et al.*, 2014). Le fruit de cet arbre miracle se produit sous forme de gousses représentant des capsules allongées à 3 valves de 10-50 cm de long, à 9 côtes brunes à maturité, et contenant de nombreuses graines (Muhl *et al.*, 2011). Les graines contenues dans ces gousses sont rondes, avec une coque marron semi-perméable. La coque présente trois ailes blanches qui s'étendent de la base au sommet à 120 degrés d'intervalle. 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 (Maevalandy, 2006).

Les racines de l'arbre sont blanches et gonflées, tubéreuses ayant une odeur piquante caractéristique et dotée de racines latérales plutôt clairsemées (Roloff *et al.*, 2009). Le système racinaire est formé d'un pivot central qui peut s'enfoncer dans le sol jusqu'à 1.30 m de profondeur (Rosa, 1993). Les différents constituants de ce plant sont illustrés dans la **figure 2**.



Figure 2 . Différentes parties de *Moringa oleifera*. (a): l'arbre, (b) : les feuilles, (c): les fleurs, (d) les gousses, (e) les graines, (f) : les racines.

I.4 Ecologie et conditions climatiques du *Moringa Oleifera*

Moringa préfère les climats semi-tropicaux humides. Il peut s'accommoder à tout type de sol mais s'adapte mieux dans les collines et les bordures de rivières. Elle résiste bien à la sécheresse grâce à ses racines tubéreuses qui lui permettant d'accumuler de l'eau (Madi *et al.*, 2012). Les limites de conditions écologiques pour *Moringa Oleifera* sont rapportées dans le tableau 2.

Tableau2. Limites écologiques de *Moringa Oleifera* (Louni, 2009)

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

I.5 culture et récolte de *Moringa oleifera*

D'après Louni (2009), le plant peut être cultivé d'une façon extensive pour la production des graines (destinés pour la semence ou bien pour la production d'huile) ou d'une façon intensive irriguée pour une production optimale des feuilles avec une récolte toutes les six semaines.

Les gousses et les graines constituent le deuxième produit à récolter après les feuilles. Un arbre adulte de *Moringa* produit environ 200 à 250 gousses. Ces gousses peuvent être récoltées vertes ou sèches. La récolte de gousses vertes peut intervenir sept mois après la plantation, alors que celle des gousses sèches, quant à elle, peut avoir lieu environ six

semaines après celle des gousses vertes. Elles sont prêtes à être récoltées lorsqu'elles changent d'aspect et deviennent brunes, sèches et s'ouvrent facilement

I.6 Différents domaines d'utilisation et intérêts de *Moringa oleifera*

I.6.1 Utilisation nutritionnelle

Selon **Katherine et al (2004)**, *Moringa oleifera* a été utilisée pour combattre la malnutrition, en particulier chez les nourrissons et les mères allaitantes. Presque toutes les parties de cette plante ont été consommées depuis longtemps par les humains pour leur grande valeur nutritionnelle (**Sujatha et Patel, 2017**).

Les fleurs peuvent être consommées après avoir été blanchies ou crues comme ingrédient d'une salade (**Foidl et al., 2001**). Elles peuvent être utilisées pour préparer un thé de très grande valeur nutritionnelle (**Price, 2007**). Elles sont utilisées sous forme écrasée en une pâte que l'on fait frire.

Les feuilles constituent une bonne source de protéines, de calcium, de fer, de β carotène, des vitamines principalement la vitamine C et E (**Saveur, 2006**). Elles peuvent être utilisées comme des denrées alimentaires pour l'être humain ou bien comme aliment de bétail (**Soliva et al., 2005**). Les gens font souvent bouillir les petites feuilles et les manger comme des épinards (**Stone et al., 2011**).

Les fruits des jeunes gousses sont très gouteux et peuvent être consommées bouillies comme des haricots (**Foidl et al., 2001**). Les graines sèches peuvent être réduites en poudre et utilisées pour assaisonner les sauces (**Foidl et al., 2001**). Elles peuvent être consommées comme des pois, les faire bouillir ou en friture, lorsqu'elles sont encore vertes. L'huile de graines oléagineuses est très utilisée comme huile végétale ou bien pour la production de savon et de produits cosmétiques (**Sánchezmechado et al., 2010**).

Les racines de *Moringa oleifera* sont épaisses et molles. Elles sont généralement utilisées pour fabriquer un condiment semblable au raifort (**Stone et al., 2011**).

I.6.2 Utilisation médicinale

Les fleurs sont conseillées pour soulager certains troubles digestifs (**Atakpama et al., 2014**). Elles sont utilisées également comme un excellent tonique à base de plantes pour faire face à

la faiblesse sexuelle et l'infertilité fonctionnelle. Elles font également l'objet d'un excellent traitement de plusieurs tumeurs.

Les feuilles représentent un bon remède d'asthme, d'hyperglycémie, de la grippe, des brûlures d'estomac, de la syphilis, de la pneumonie, de la diarrhée, des maux de tête, des maladies de la peau et de la bronchite (**Gopalakrishnan et al., 2016**).

Les fruits traitent la diarrhée, les problèmes de foie, de la rate et les douleurs articulaires (**Sujatha et Patel, 2017**). Elles sont utilisées comme antipyrétiques et antidiabétiques (**Amjad et al., 2016**).

Les graines de *Moringa oleifera* sont utilisées pour leurs contenus en antibiotiques et anti-inflammatoires pour traiter l'arthrite, le rhumatisme et les crampes (**Kaput, 2015**). Elles sont utilisées pour traiter les maux d'estomac, faible vision, l'anémie, l'hypertension et les maux de dents (**Leone et al., 2015**).

Les racines sous forme de jus ont une bonne activité anti-inflammatoire, antiépileptiques, tonique cardiaque et tonique cérébrale (**Amjad et al., 2015**).

I.6.3 Utilisation dans la purification de l'eau

Les graines de *Moringa Oleifera* peuvent être utilisées comme un adoucisseur d'eau dure, un désinfectant et pour éliminer les métaux lourds dans le traitement de l'eau potable (**Louni, 2009**). Elles sont également utilisées comme un agent coagulant/floculant pour la clarification de l'eau potable en raison de leur forte teneur en protéine cationique hydrosoluble (**Vilaseca et al., 2014**). Après les processus de coagulation, le résidu des graines peut être utilisé comme fertilisant ou fourrage animal. De la même manière, les gousses et les coques séchées peuvent être pyrolysées en carbone activé (**Sulaiman et al., 2017**).

Il existe d'autres utilisations qui présentent les différentes parties de *Moringa oleifera*. Le **tableau 3** rassemble ces utilisations supplémentaires.

Tableau 3. Autres intérêts de *Moringa oleifera*.

Intérêt agricole **Fuglie** a rapporté que : « L'utilisation du *Moringa* comme engrais vert peut enrichir considérablement les sols agricoles » (**Price, 2007**).

Les boues récoltées après traitement des eaux avec *Moringa oleifera* peuvent également être utilisées comme bio engrais / bio-compost (**Kumar et al., 2012**).

Intérêt économique Les feuilles sont utilisées dans la production de biogaz. Le bois peut être utilisé comme combustible de chauffage et donc servir à la cuisson de la nourriture ; il peut produire 4600 Kcal/kg (**Agroconsult-Haiti, 2016**).

I.7 Composition des graines de *Moringa oleifera*

Les graines de *Moringa oleifera* contiennent des composés photochimiques naturels importants (**Anwar et al., 2007**). Ces composés ne sont pas nécessairement exigés comme aliments essentiels pour l'homme, mais cela peut avoir un effet sur la santé humaine, mais aussi sur la saveur, la texture, l'odeur et la couleur des plantes (**Fahey, 2005**).

Elle constitue une excellente source de compléments alimentaires. Des analyses nutritionnelles ont montré que les graines contiennent des minéraux, des acides aminés essentiels et des acides gras (**Dhakar et Mauraya., 2011 ; Aho et Lagasi., 2012**).

Les minéraux occupent une part importante dans la composition des graines de *M. oleifera*. Des analyses réalisées par (**Abiodu., 2012 ; James., 2017**) ont montré la richesse de cette dernière en sodium, potassium, magnésium et en fer. Elles contiennent également une quantité importante d'huile végétale représentant entre 38 et 40% du poids de la graine, connue sous le nom d'huile "Behen" ou "Ben" (**Abiodun et al., 2012 ; Abd-Rabou et al., 2016 ; Leone, 2016**).

Les graines de *Moringa* contiennent une protéine (poly électrolyte cationique). Les poly électrolytes cationiques sont des polymères dont les motifs répétitifs portent un groupe électrolyte. Les poly cations et les poly anions sont des poly électrolytes cationiques. Ces groupes se dissocient dans des solutions aqueuses synthétiques et montrent une excellente capacité à adsorber les ions de métaux lourds dans une large gamme de pH à partir de solutions aqueuses extrêmement diluées, qui peuvent être utilisées plus tard comme adsorbant pour la purification de l'eau. Toutes les protéines sont des poly ampholytes, car certains acides aminés ont tendance à être acides, tandis que d'autres sont basiques.

Chapitre I Généralités sur la *Moringa oléifera*

Cette protéine a déjà montré son efficacité dans le traitement des eaux, en remplacement du sulfate d'Alumine et d'autres flocculant chimiques (Benali *et al.*, 2016). Le **tableau 4** représente la composition chimique des graines de *Moringa oleifera*.

Le **tableau 5** représente la teneur en vitamines et minéraux des graines de *Moringa oleifera*.

Tableau 4. Composition chimique des graines de *Moringa oleifera* (Boukandoul, 2019).

Composition chimique	Teneurs (g/100g de graines)
Humidité	9.7 - 9.9
Protéines	33.3 - 36.0
Lipides totaux	38.7 - 41.2
Cendres	3.9 - 4.4
Fibres	2.9
Carbohydrates	8.7 - 22.1

Tableau 5. Profils vitaminique et minéral des graines de *Moringa oleifera* (Boukandoul, 2019).

Composant	Teneur (mg/100g de graines)	
Vitamines	Acide ascorbique	4.50
	Niacine	0.20
	Riboflavine	0.06
	Thiamine	0.05
Minéraux	Calcium	83.8 - 751.7
	Fer	5.20
	Magnésium	45.0 - 251.3
	Potassium	36.5 - 75.0
	Phosphore	635.00
	Sodium	22.5
	Zinc	0.05

Chapitre II

Procédés de traitement des eaux

II.1 Introduction

Le traitement des eaux est nécessaire à la préservation de notre environnement souvent altéré par de nombreuses sources de pollution. C'est un ensemble de techniques qui consistent à purifier l'eau soit pour recycler les eaux usées dans le milieu naturel, soit pour transformer les eaux naturelles en eau potable. Il consiste essentiellement à réduire la pollution présente dans l'eau. Cette pollution résulte d'activités humaines et ayant pour objectif principal de préserver l'environnement et les ressources en eau. Les principales techniques mises en œuvre en traitement des eaux sont de nature physique, chimique, physico-chimique, biologique et radiative par exemple : coagulation-floculation, adsorption, oxydation, photo catalyse, décantation, filtration (**Abouzlam, 2014**).

II.2 Procédés physiques

Les traitements physiques utilisent des techniques séparatives pour éliminer les polluants de l'eau à traiter. Ils sont efficaces pour éliminer les solides en suspension, les liquides non miscibles et les polluants organiques dissous (**Ayral, 2009**). Parmi les procédés les plus courants, nous pouvons citer :

II.2.1 Dégrillage

Le dégrillage permet d'éliminer les corps flottants et les gros déchets par l'intermédiaire de grilles placées en travers du canal d'amenée afin de protéger les installations contre les obstructions (**Abouzlam, 2014**).

II.2.2 Dessablage :

Le dessablage consiste en l'élimination des sables présents dans l'effluent brute pour éviter leur dépôt dans les canalisations induisant leur colmatage. Il permet également de réduire la production des boues et d'éviter la perturbation des autres étapes de traitement, en particulier, le réacteur biologique (**Satin et al., 2010**).

II.2.3 Déshuilage et dégraissage

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (**Mimeche, 2014**). C'est généralement le principe de la flottation ou bien la flottaison qui est utilisé pour l'élimination des huiles. Son principe est

Chapitre II Procédés de traitement des eaux

basé sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de déshuilage, permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface. Leur élimination se fait ensuite par raclage à la surface d'eau (**Degrement, 2005**).

II.2.4 Tamisage :

Cette opération constitue un dégrillage fin. Elle est mise en œuvre dans le cas d'eaux résiduairees chargées de matières en suspension de petites taille (**Boursali, 2011**).

Nous pouvons distinguer :

- Le macro-tamisage destiné à tenir certaines matières en suspension, flottantes ou semi-flottantes (débris végétaux ou animaux, insectes, etc...) ;
- Le micro tamisage destiné à tenir les matières en suspension de très petites dimensions contenues dans les eaux de consommation (plancton).

II.2.5 Filtration

Il s'agit du passage d'un liquide-solide à travers un milieu poreux (filtre qui retient les solides et laisse les liquides (filtrat) (**Iwema et al., 2005**).

II.2.6 Flottation

C'est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient (**Vilaginés, 2010**). Ce traitement élimine 50 à 55 % des matières en suspensions et réduit d'environ 30% de la DBO et de la DCO.

II.2.7 Centrifugation

Opération de séparation par action de la force centrifuge, du mélange entraîné dans un mouvement de rotation, pour provoquer la décantation accélérée des particules d'un mélange solide-liquide. Le traitement de l'eau par centrifugation nécessite l'utilisation d'une centrifugeuse. La centrifugeuse est une machine qui permet d'imprimer à l'eau un mouvement de rotation très rapide, et de séparer les particules solides en suspension de l'eau. Le procédé de centrifugation de l'eau est souvent utilisé pour assécher ces boues et en diminuer leur poids, leur volume, et de leur traitement.

II.3 Procédés chimiques

Les procédés chimiques sont très utilisés dans le traitement final des effluents, on peut citer les procédés suivants :

II.3. 1 Oxydation

L'oxydation intervient à différents niveaux dans le traitement des eaux. Dans le but de dégrader des composés soit toxiques (**Murati, 2012 ; Abouzlam, 2014**). Elle se fait par des agents tels que le chlore et l'ozone qui agissent sur les métaux et les matières organiques en détruisant ou inactivant totalement ou partiellement les germes vivants, les virus et les bactéries.

II.3. 2 Échanges d'ions

Procédé au moyen duquel les ions d'une certaine charge (positive ou négative) contenus dans une solution sont éliminés et remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par un solide (échangeur d'ions) (**Osnick, 2009**). Ils sont des procédés de substitution d'ions sur des résines spécifiques.

II.3. 3 Adsorption

Procédé de transfert de matière entre une phase liquide (ou gazeuse) chargée en composés organiques ou inorganiques et une phase solide (adsorbant) (**Osnick, 2009**). L'adsorption est largement utilisée pour la séparation et la purification des fluides, dans des domaines très variés, allant des industries chimiques, aux applications environnementales.

II.3. 4 La photo catalyse

Consiste à utiliser un photo catalyseur sous irradiation pour oxyder les polluants présents dans l'eau potable. La photo catalyse hétérogène est une technique d'oxydation avancée au cours de laquelle un semi-conducteur solide jouant le rôle de photo catalyseur est excité à l'aide d'un rayonnement lumineux. La photo catalyse peut être décrite comme la succession de cinq étapes (**Triquet, 2021**)

➤ Diffusion/transfert des micropolluants (réactifs) de la phase à traiter vers la surface du semi-conducteur ;

- Adsorption des réactifs à la surface du photo catalyseur ;
- Photo-réaction à la surface du semi-conducteur ;
- Désorption des composés produits lors de la réaction (intermédiaires ou finaux) ;
- Diffusion/transfert des nouveaux composés de la surface du catalyseur vers la phase traitée.

II.3. 5 L'électrocoagulation

Procédé de traitement des eaux usées, consiste à générer directement en solution les réactifs nécessaires par une oxydation d'une électrode (anode) dite sacrificielle. Néanmoins, ce procédé présente des limitations liées principalement au coût d'investissement initial élevé par rapport aux autres technologies de traitement, à l'utilisation d'un courant continu et de la durée de vie des électrodes. L'électrocoagulation est un processus complexe impliquant beaucoup de phénomènes chimiques et physiques. L'efficacité de ce processus est contrôlée par l'effet des paramètres électrochimiques, physico-chimiques et hydrodynamiques. Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit, d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in-situ, des ions (Fe^{2+} ou Al^{3+}) (**Figure 3**) (Tiaiba *et al.*, 2021).

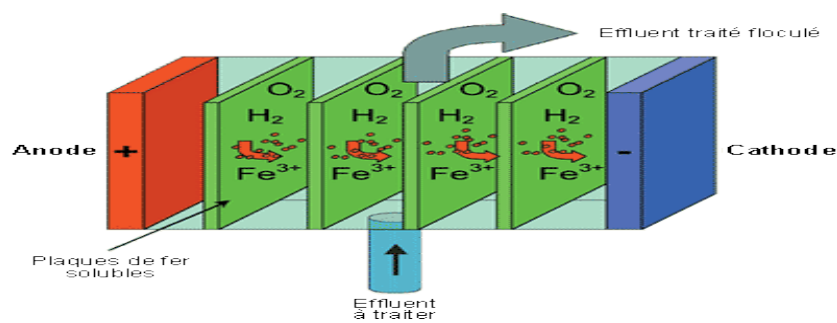


Figure 3. Schéma de fonctionnement d'électrocoagulation

II.3. 6 Techniques membranaires

Techniques de séparation par perméation à travers une membrane sous l'action d'un gradient de pression. Ils regroupent la microfiltration, l'ultrafiltration, la nano filtration et l'osmose inverse (Osnick, 2009), qui est un système permettant de purifier l'eau contenant des matières en solution par un système de filtrage ne laissant passer que les molécules d'eau. Développée

par la NASA pour ses astronautes afin de recycler l'eau consommée, l'osmose inverse est un système de filtrage d'eau ultra-performant. Ce procédé peut être utilisé aussi bien à échelle industrielle que domestique, tout dépend de la quantité d'eau à filtrer.

II.4 Procédés biologiques

Le traitement biologique a pour objectif d'éliminer les matières organiques, basé sur la croissance des microorganismes aux dépens des matières organiques « biodégradables » qui constituent pour eux des nutriments. La méthode naturelle la plus efficace de réduction des teneurs en matières organiques des eaux usées est leur dégradation biologique, Le principe de ce traitement est de mettre en contact la matière organique contenue dans les eaux usées avec une population bactérienne (**Bassompierre, 2007**). Ce traitement biologique est le procédé qui permet la dégradation des polluants grâce à l'action de microorganismes. Ils vont permettre ainsi d'éliminer les polluants solubles biodégradables et une partie de MES. Ce processus existe spontanément dans les milieux naturels tels que les eaux superficielles suffisamment aérées. Une multitude d'organismes est associée à cette dégradation selon différents cycles de transformation. Parmi ces organismes, on trouve généralement des bactéries, des algues, des champignons et des protozoaires. Cette microflore, extrêmement riche, peut s'adapter à divers types de polluants qu'elle consomme sous forme de nourriture. Il est ainsi possible d'utiliser systématiquement cette microflore dans un processus contrôlé pour réaliser l'épuration des eaux résiduaires (**Ouali, 2001**). L'épuration biologique peut s'effectuer par voie aérobie ou anaérobie. Selon les travaux de (**Mimeche, 2014**) les techniques les plus développées au niveau des stations d'épuration urbaines sont des procédés biologiques intensifs. Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et de destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel.

II.4. 1 Disques biologiques

Dans ce procédé, les micro-organismes sont fixés sur des disques à demi immergés et tournant (quelques tours par minute) autour d'un axe horizontal, La biomasse est ainsi alternativement mouillée par les eaux résiduaires et aérée par l'air ambiant (**figure 4**).

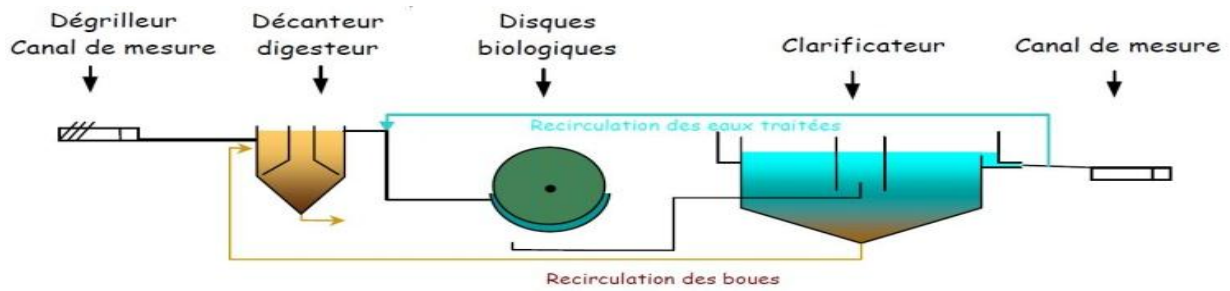


Figure 4. Schéma fonctionnement de disque biologique

II.4. 2 Boue activée

Technique biologique d'épuration des eaux. Représente une alternative efficace et relativement écologique (sans utilisation de produits chimiques) aux techniques d'épuration les plus couramment utilisées. En fait, on peut considérer que le système à boues activées est une extension artificielle des phénomènes d'épuration naturels. Dans un cours d'eau ou une rivière, les phénomènes entrant en jeu sont identiques à ceux présents dans les systèmes à boues activées et varie la concentration en micro-organismes dans le milieu et à fortiori (figure 5), la vitesse de la réaction de dégradation qui élimine les molécules de phosphore, d'azote et de carbone présentes dans les eaux résiduaires (Caid, 1984).

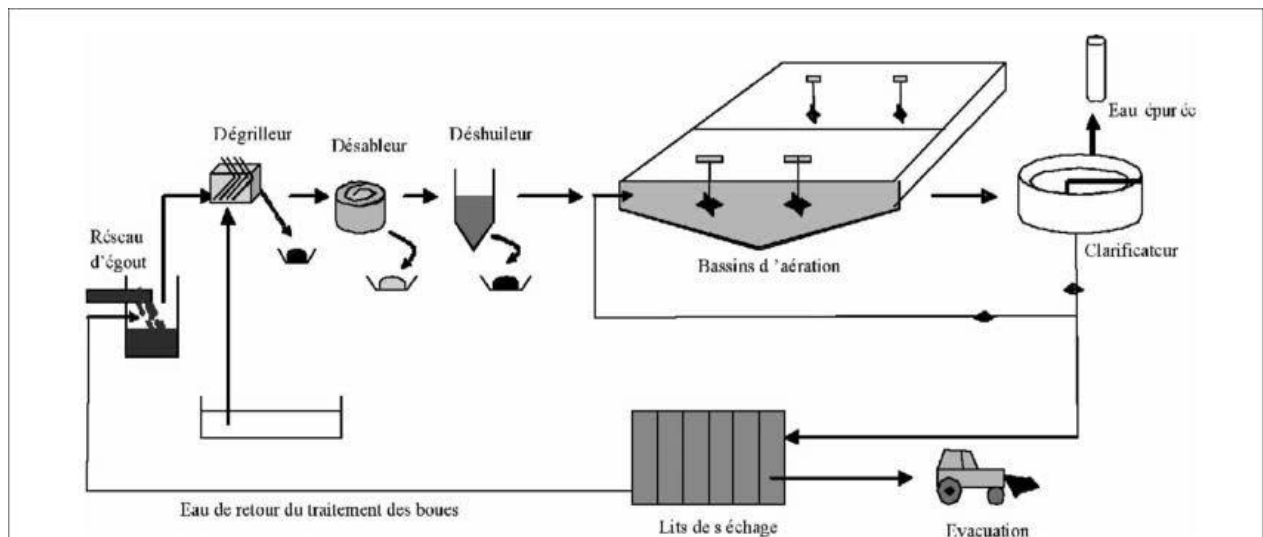


Figure 5. Schéma explique le fonctionnement des boues activées

II.4. 3 Lit Bactérien.

C'est un procédé aérobie de traitement biologique des effluents (eaux à traiter) basé sur le principe de la culture fixée qui peut s'intégrer en amont d'un système de rhizofiltration. Des matériaux servent de support aux micro-organismes épurateurs qui forment un film

biologique. De ce fait, ce système présente un inconvénient majeur, à savoir, qu'il nécessite un dispositif de relevage. La biomasse se développe à la surface du support et lorsqu'elle devient trop importante, la pellicule bactérienne se détache naturellement ; elle doit alors être séparée de l'effluent par décantation (**Pronost et al., 2002**).

II.4.4 Lagunage

Système biologique d'épuration extensive qui consiste à déverser les eaux usées dans plusieurs bassins successifs (bassin anaérobie, bassin facultatif, bassin aérobie de faible profondeur où des phénomènes naturels de dégradation font intervenir la biomasse qui transforme la matière organique (**Mimeche, 2014**). La matière polluante, soustraite aux eaux usées, se retrouve en grande partie dans la végétation et les sédiments accumulés; et en faible partie dans l'atmosphère sous forme de méthane et d'azote gazeux (**Metahri, 2012**).

II.4.5 Phytoépuration

Procédé naturel de filtration ou de dépollution des eaux usées par les plantes. Il s'agit plus précisément d'assainir les eaux usées par les bactéries cachées dans le système racinaire des plantes qui sont dites épuratrices. Le procédé est tout à fait écologique, sans odeurs et peut être très esthétique (**figure 6**).

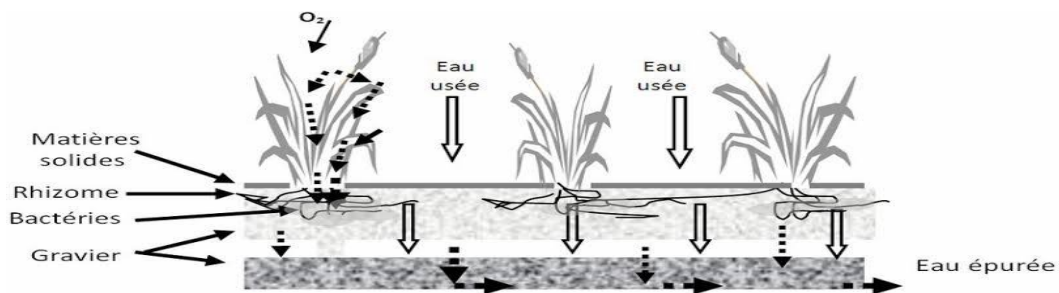


Figure 6. Schéma de fonctionnement de la phytoépuration

II.5 Procédés radiatifs

Ces techniques peuvent être utilisées dans les opérations de décontamination de l'eau.

II.5.1 Ultra-violet

Techniques irradiant les cellules vivantes indésirables. Suivant la qualité d'énergie UV reçue, elles sont soit stérilisées (effet bactériostatique) soit détruites (effet bactéricide) (**Hedji-sadok, 1999**).

II.5.2 Bombardement électronique

C'est un dispositif basé sur l'exposition brève des eaux polluées à un fort flux d'électrons. La structure des éléments complexes est décomposée sous l'action des ions qui cassent leurs liaisons chimiques. La décontamination bactériologique est réalisée par destruction des bactéries et des virus.

II.6 Procédés complémentaires

Ces techniques visent l'élimination de la pollution azotée et phosphatée, ainsi que la pollution biologique des eaux usées, ayant déjà subi des traitements primaires et secondaires, afin d'améliorer la qualité générale de l'eau. Les traitements tertiaires s'imposent et deviennent plus que nécessaires pour assurer une protection complémentaire de l'environnement récepteur ou une réutilisation de l'effluent en agriculture ou en industrie (**Metahri, 2012**).

II.6.1 L'élimination de l'azote

Les stations d'épuration prévues pour éliminer les matières carbonées n'éliminent qu'environ 20 % de l'azote présent dans les eaux usées par les traitements de nitrification – dénitrification. Pour satisfaire aux normes de rejet en zones sensibles, des procédés physiques et physico-chimiques complémentaires permettent l'élimination de l'azote par : électrodialyse, résines échangeuses d'ions (**Franck, 2002**). La nitrification est le processus biologique résultant de l'activité de micro-organismes qui oxydent séquentiellement l'azote ammoniacal (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-) puis en nitrates (NO_3^-).

II.6.2 L'élimination du phosphore

L'élimination du phosphore, ou « déphosphoration », peut être réalisée par des voies physico-chimiques ou biologiques. En ce qui concerne les traitements physico-chimiques, l'adjonction de réactifs, comme des sels de fer ou d'aluminium, permet d'obtenir une précipitation de

phosphates insolubles et leur élimination par décantation. Ces techniques, les plus utilisées actuellement, éliminent entre 80 et 90 % du phosphore, mais engendrent une importante production de boues (**Prescott et al., 2007**).

II.6.3 La désinfection

Traitement qui vise à éliminer les microorganismes pathogènes, bactérie, virus et parasite ainsi que la majorité des germes moins résistants (**Hernandez De Leon, 2006**). Le principe de la désinfection est de mettre en contact un désinfectant à une certaine concentration pendant un certain temps avec une eau supposée contaminée.

II.7 Procédés physico-chimiques

Procédés utilisés en général comme moyens de traitement complémentaires combinent les principes de la chimie et de la physique. Certaines substances comme les colloïdes sont particulièrement stables en suspension et leur durée de décantation peut être trop longue. Afin de favoriser leur décantation, le décanteur est probablement conditionné avec les réactifs chimiques qui facilitent l'agglomération des particules (**Berland et al., 2001**). Deux techniques sont utilisées :

II.7.1 La coagulation –floculation

Est un processus physico-chimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en suspension fines sont transformés en espèces plus visibles et séparables par déstabilisation puis formation de floes (**figure 7**) (**Kabore, 2015**).

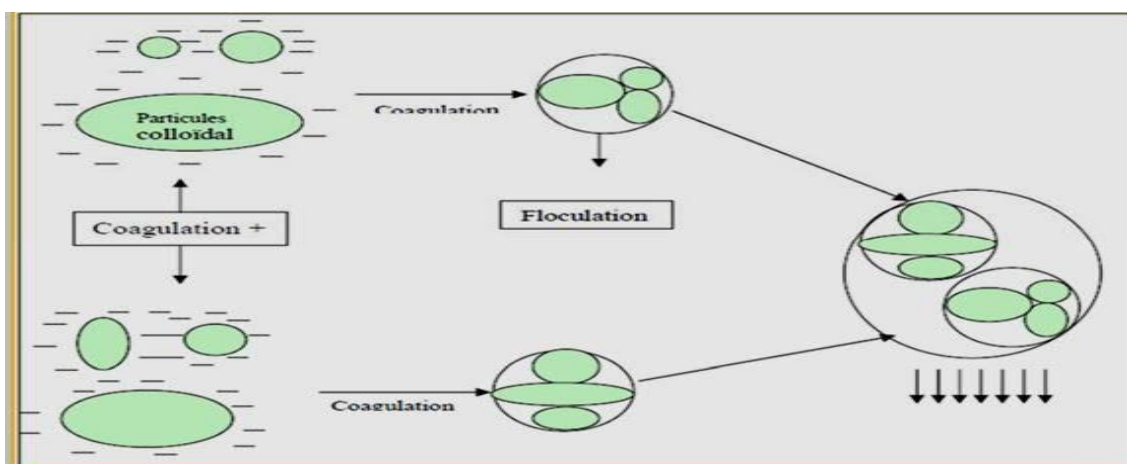


Figure 7. Schéma de coagulation-floculation

II.7.2 Rôle de la coagulation -floculation

La coagulation-floculation facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) 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 inertes ou vivantes, les fractions floculables des matières organiques et de certains métaux lourds, les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales (Adamczyk, 2003).

II.7.3 But de la coagulation-floculation

L'opération de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules, qui sont essentiellement colloïdales, par déstabilisation des particules en suspension puis formation de floccs par absorption et agrégation. Les floccs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite.

II.7.4 Principe de la coagulation-floculation

La méthode utilise deux principes qui constituent deux étapes successives qui sont le plus souvent obtenues en utilisant des sels minéraux (sulfate d'alumine $Al_2(SO_4)_3$, chlorure d'aluminium $AlCl_3$, chlorure ferrique $FeCl_3$, chlorosulfate ferrique $FeClSO_4$ aussi appelé clair tan, etc.) qui jouent successivement les deux rôles coagulant et floculant.

II.7.5 Particules mises en jeu

II.7.5.1 Matières en suspension

Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques ou fulviques par exemple). A ces composés s'ajoutent les micros - organismes tels que bactéries, plancton, algues et virus.

II.7.5.2 Matières dissoutes (moins de quelques nanomètres)

Ce sont généralement des cations ou des anions. Une partie de la matière organique est également sous forme dissoute. On trouve aussi des gaz (O_2 , CO_2 , H_2S , ...).

II.7.5.3 Particules colloïdes

Les particules colloïdales sont des matières inertes ou vivantes (argiles, hydroxydes métalliques, micro-organisme, fibres, pulpes, protéines, etc....) qui ont une taille très petite comprise entre 1nm et 1µm (**Boursali, 2011**). Pour leur étude, les colloïdes sont classés, arbitrairement, en deux groupes principaux :

→ Colloïdes hydrophiles

Ils proviennent de substances solubles présentant une affinité pour l'eau, et qui adsorbent une couche d'eau liée, protectrice. Dans ce groupe se trouvent les protéines, les carbohydrates et, d'une façon générale, les produits organiques.

→ Colloïdes hydrophobes

Généralement plus gros et n'ont pas de couche protectrice. Ils proviennent de substances peu ou pas soluble tels que les métaux, leurs oxydes et/ou leurs hydroxydes. Plus généralement, ce sont des produits minéraux.

II.7.5.4 Modes de déstabilisation des particules colloïdales

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

- Compression de la double couche.
- Adsorption et neutralisation des charges.
- Emprisonnement des particules dans un précipité.
- Adsorption et pontage.

II.7.6 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. Diverses théories expliquent ce phénomène (**Buffle et al., 1998**).

- **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** : elle combine les deux théories précédentes et considère la formation d'une double couche : la première formée d'ions du liquide mais adhérente au colloïde et la seconde diffuse dans le liquide environnant.

II.7.7 Phénomène de coagulation

La coagulation annule les charges électriques des particules en suspension par l'ajout de réactifs minéraux.

- **Principe du phénomène :**

Le mot coagulation vient du latin "coagulare" qui signifie « agglomérer ». Le but principal de la coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération. Cette agglomération est, généralement, caractérisée par l'injection et la dispersion rapide de réactifs chimiques et permet d'augmenter substantiellement l'efficacité des traitements ultérieurs (décantation et/ou filtration) (Desjardins, 1997 ; Bessedik, 2014).

- **Coagulant**

C'est une substance chimique qui cause l'agglomération des particules fines par compensation des charges des substances par apport à des charges opposées positives de cations trivalents et permet de former ainsi un précipité gélatineux dans l'eau pouvant ensuite être filtré (Lafleur et Fortier, 2008). Les Coagulants utilisés sont de type sels métalliques comme l'Alun utilisé pour traiter des eaux usées industrielles et domestiques Il existe également le type naturel comme *Moringa oleifera*. Les graines de *Moringa* contiennent 30 à 42 % d'huile, et le tourteau obtenu comme sous-produit lors de l'extraction de l'huile est très riche en protéines. Certaines de ces protéines (environ 1 %) sont des poly électrolytes cationiques actifs d'un poids moléculaire de 7-17 kDalton. Les cationiques neutralisent 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.

- **Facteurs influençant la coagulation**

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables en interrelations, comme le pH, les sels dissous, la température de l'eau, le coagulant utilisé, les conditions de mélange, la turbidité et la couleur. Ces interrelations complexes interdisent actuellement toute approche théorique permettant de prédire quelles sont les concentrations optimales de coagulants (Kherifi, 2009).

II.7.8 Phénomène de floculation

La floculation provoque l'agglomération des particules déchargées par les coagulants. La fraction des floes peut être améliorée ainsi.

- **Principe de phénomène**

La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules, lesquels sont provoqués par la différence de vitesse entre ces particules (Desjardins, 1997 ; Bessedik, 2014).

Deux phénomènes de transport régissent la floculation. Ils sont la floculation périe cinétique et ortho cinétique.

- **Floculant**

C'est un polymère qui emprisonne les matières colloïdales agglomérées et forme ainsi des flocons volumineux qui se déposent par gravité. Il est ajouté après la coagulation pour augmenter davantage la taille et la cohésion des floes (Lafleur et Fortier, 2008). On distingue plusieurs types de floes (minéraux, organiques, de synthèse...etc.)

II.8 Traitement des eaux avec *Moringa oleifera*

Les eaux peuvent contenir de nombreuses substances toxiques et de nombreux micro-organismes pathogènes qui menacent l'environnement et la santé humaine. Le traitement est donc essentiel. Les graines de *M. oleifera* représentent un floculant naturel très efficace dans le traitement de l'eau. Cette efficacité se résume à la présence de protéines cationiques actives

Chapitre II Procédés de traitement des eaux

Agissant comme adsorbant, coagulant et désinfectant (**Frah et Bouzad, 2018**). Les éléments composants protéiques ont été étudiés, à savoir la protéine floculant et antibactérienne MO2.1 et protéine antifongique Mo-CBP3. Ceux-ci représentent des protéines hydrosolubles et résistantes à la chaleur et elles sont situées dans des vacuoles (**Gifoni et al., 2012**).

La protéine MO2.1 est un humidimètre de bas poids moléculaire avec activité floculant naturelle très efficace. La protéine est composée de 68 de ces régions sont des résidus d'acides aminés chargés positivement. Sa structure secondaire est principalement composée d'hélices alpha (**kwaambwa et al., 2008**). En plus d'être utilisé comme floculant, MO2.1 est également actif sur le plan microbiologique et agit comme un antibactérien. Cette activité a été démontrée par Cryo-TEM contre les cellules *Escherichia coli* qui provoque des dommages aux membranes cellulaires bactériennes révélés par la fusion membranes interne et externe et fusion des vésicules (**Pavankumar et al., 2014**).

Une autre protéine antifongique nommée Mo-CBP3 a été rapportée. Cette protéine est capable d'inhiber la germination des spores et la croissance mycélienne du champignon. Elle a 4 iso formes, mais seules les protéines Mo-CBP3-1 et Mo-CBP3-4 ont des structures cristallines disponibles. Celles-ci sont disposées dans une approche clé pour les rendre stables et thermo et protéolytiques (**Moulin et al., 2019**).

Les graines séchées au soleil sont d'abord désaillées puis broyées pour obtenir une poudre mélangée à de l'eau. Remuez le mélange pendant cinq minutes, puis Laisser reposer pendant une heure, puis filtrer à travers un chiffon pour obtenir l'humidité pur. Une autre méthode consiste à suspendre un sac en tissu dans de l'eau, qui contient la farine de graines, généralement pendant la nuit, pour coaguler les impuretés. Le sac de poudre est ensuite retiré et l'eau purifiée est versée pour laisser derrière les granulés Congelé au fond du récipient, jusqu'à 99 % de la matière colloïdale peut ainsi être éliminée. Il suffit d'une graine pour purifier un litre d'eau peu polluée et deux pour un litre d'eau très sale (**Foidl et al., 2001**).

Chapitre III

Les dernières recherches de traitement des eaux avec *Moringa oleifera*

III. 1 Introduction

Vu l'importance de la plante *Moringa oleifera* et son efficacité dans le traitement des eaux potables et des eaux usées, les recherches sont toujours en cours, car il y a toujours une évolution et des progrès. Voici quelques avancements de recherche dans le domaine du traitement des eaux avec *Moringa oleifera*.

III.2 Dans le traitement des eaux potables

III.2.1 Etude menée par Reck et ses collaborateurs en 2020

- Selon **Reck *et al* (2020)**, les colorants synthétiques adhèrent facilement aux fibres dans la teinture des textiles et dans la production d'aliments colorés artificiellement. Ces colorants sont facilement identifiables lorsqu'ils sont déversés dans des plans d'eau. En raison des eaux colorées qui en résultent, esthétiquement inacceptables, elles peuvent modifier la gamme de rayonnement lumineux, influençant la photosynthèse et la croissance des plantes aquatiques. Par conséquent, le développement de technologies visant un traitement viable des effluents est devenu nécessaire.

Comme indiqué précédemment, les colorants synthétiques ont des structures chimiques stables et sont très solubles, ce qui rend très difficile leur élimination avec des procédés conventionnels à faible coût. Ces processus comprennent des techniques de décoloration physique, chimique et biologique qui sont les plus économiquement non viables. D'autre part, l'optimisation coagulant/floculant est une méthode économique et pratique. Les coagulants/floculant traditionnels comprennent les coagulants à base de métaux inorganiques et les floculants à base de polymères synthétiques.

Chacun de ces processus a des limites, dans un processus d'adsorption ont appliqués des nanoparticules de fer fonctionnalisées pour l'élimination des herbicides et ont conclu que cette méthode était rapide, écologique et peu coûteuse. Une autre utilisation des nanoparticules de fer issues de la synthèse verte est l'élimination du propranolol des solutions aqueuses par adsorption. Le propranolol est un médicament très important, mais il crée plusieurs effets secondaires et problèmes pour les personnes en bonne santé s'il est présent en tant que contaminant de l'eau.

Sur la base de ce qui précède, la présente étude visait à utiliser la nanotechnologie dans le développement d'un nouveau coagulant naturel. Ce coagulant a été synthétisé à partir de la protéine fractionnée des graines de *Moringa oleifera* et fonctionnalisé avec des nanoparticules d'oxyde de fer. Les protéines présentes dans les graines de *Moringa* ont une capacité de clarification élevée grâce à des composants actifs dotés d'excellentes propriétés de coagulation. Cette capacité coagulante est attribuée à une protéine soluble qui agit comme un poly-électrolyte cationique naturel. Cette charge positive participe au mécanisme de déstabilisation et de neutralisation de la charge.

Selon **Reck et al (2020)**, la fonctionnalisation de la protéine de *Moringa* avec des nanoparticules d'oxyde de fer vise à faciliter et à accélérer le processus de sédimentation des particules de colorant flocculées qui présentent des difficultés à sédimenter en raison de leur masse moléculaire et de leur solubilité élevée. Le processus de séparation est accéléré par un champ magnétique permettant à l'eau d'être traitée par un processus de coagulation, qui est connu pour être la méthode la plus viable et la plus utilisée dans les stations d'épuration. Cependant, il présente toujours des difficultés pour éliminer les colorants synthétiques.

Afin d'améliorer le processus de coagulation, la présente étude a proposé l'utilisation de nanoparticules d'oxyde de fer synthétisées par la méthode sol-gel : une méthode rapide, simple et facile qui n'a pas encore été évaluée en utilisant la fraction protéique des graines de *Moringa oleifera* avec les colorants en question.

Par conséquent, cette étude vise à éliminer quatre colorants synthétiques anioniques (noir réactif 5, bleu brillant, amarante et jaune coucher de soleil) des solutions aqueuses par un processus de coagulation avec un coagulant magnétique naturel.

Selon **Reck et al (2020)**, le fractionnement des protéines des grains de *Moringa* a été effectué pour extraire la fraction protéique soluble, l'albumine. Pour obtenir la fraction protéique, il a été adopté le critère de solubilité dans différents systèmes d'extraction proposés par Osborne en 1878. Une lyophilisation a été réalisée pour obtenir la fraction protéique albumine selon **Reck et al (2020)**. La quantité de protéines extraites dans la fraction protéique lyophilisée a été calculée sur la base des protéines totales. L'albumine lyophilisée à action coagulante s'appelait ProtAlb. Il a été préparé avec l'eau distillée à une concentration de 1%.

Les caractérisations du coagulant magnétique ont été réalisées et analysées par **Reck et al (2020)**. Pour prouver la présence de fer dans les nanoparticules, leurs propriétés magnétiques,

ainsi que des composés organiques dans les graines, certains points seront à nouveau abordés. Le potentiel zêta du coagulant et des colorants a été analysé à l'aide de l'équipement de potentiel Zeta Beckman Coulter Delsa (TM).

ils ont démontré que la méthodologie de synthèse de nanoparticules magnétiques, sa fonctionnalisation avec la protéine albumine extraite des graines de *Moringa*, et sa réutilisation ultérieure sont des alternatives intéressantes et efficaces pour le traitement de l'eau contenant des colorants anioniques synthétiques, notamment en raison des temps de sédimentation courts obtenus grâce à l'utilisation de la sédimentation magnétique (**Reck et al., 2020**).

Les résultats indiquent que ce nouveau coagulant magnétique naturel est efficace pour éliminer les colorants synthétiques anioniques des solutions aqueuses. A partir de ce nouveau coagulant (ProtAlbFe), il a été possible d'appliquer un champ magnétique lors du processus de sédimentation. Le temps de sédimentation est passé de 30 à 5 min avec la sédimentation magnétique, prouvant qu'il est possible d'appliquer des nanoparticules pour accélérer le processus de coagulation conventionnel dans le traitement des polluants. De plus, des nanoparticules magnétiques ont été récupérées des boues résiduelles et réappliquées dans des cycles de coagulation/floculation sans perdre leur efficacité, rendant le processus écologiquement viable.

III.2.2 Etude menée par Teo et ses collaborateurs en 2022

- Selon **Teo et al (2022)**, ces dernières années, *Moringa oleifera* est apparu comme un biosorbant vert et à bas prix pour le traitement des eaux contaminées par des métaux lourds et des colorants, et compte tenu de sa disponibilité, nous pouvons créer une autre génération de biosorbants efficaces basés sur différentes parties de cette plante. Dans cet article de synthèse, nous avons présenté l'application de MO en tant que biosorbant miraculeux pour la purification de l'eau. De plus, Il a été constaté que MO a une disponibilité abondante dans les régions où il est cultivé, et des traitements chimiques simples augmentent l'efficacité de cette plante dans le traitement de certains contaminants toxiques.

De nombreuses études simples et captivantes se sont concentrées sur le développement de bioprocédés efficaces reposant sur des biomatériaux, dont le *Moringa*, pour la récupération/décontamination des contaminants métalliques organiques et inorganiques des effluents industriels par biosorption, sans oublier qu'il existe d'autres types de traitement efficace pour le traitement des eaux, comme le photo catalyseur. Le coût de traitement de l'élimination des métaux lourds toxiques ou des colorants de l'eau potable et des solutions aqueuses synthétiques est très élevé. La gestion de ce coût est liée au type de traitement appliqué pour purifier l'eau mais dans le cas de la biosorption est essentiellement liée au type de biosorbant. Le coût de traitement du procédé de biosorption dans l'élimination des polluants peut être maîtrisé efficacement, surtout lorsque le biosorbant est disponible à un prix attractif. Ainsi, la biosorption est un processus physico-chimique dans lequel l'absorption d'une substance à partir d'une solution a lieu par fixation à un biomatériau en phase solide. La biosorption a été efficacement utile dans la décontamination et la récupération des ions de métaux lourds en phase aqueuse et des colorants.

Plusieurs chercheurs ont utilisé des matériaux efficaces pour traiter plusieurs polluants toxiques dans les eaux potables, comme le cérium(III), le plomb(III), cuivre (II) et phosphate, césium, sélénium(IV) (**Islam et al. , 2021 ; Teo et al. , 2022**).

L'utilisation de MO comme biosorbant dans les procédés écologiques verts pour traiter l'eau et les effluents industriels est devenue de plus en plus populaire car il s'agit d'un biomatériau naturel innovant et respectueux de l'environnement. Le processus de biosorption impliquant l'adsorption de MO peut offrir de nombreux avantages tels que la réduction des coûts, la réduction de la production de sous-produits car le gâteau généré lors de l'extraction de l'huile sera utilisé et augmentera la biodégradabilité par rapport à d'autres processus de décontamination ainsi que l'efficacité par rapport à d'autres procédés équivalents qui utilisent des produits organiques coûteux synthétisés.

Outre la biosorption, qui est l'objectif de cette étude, pour éliminer le danger des contaminants toxiques de l'eau et des eaux usées, de nombreuses technologies de traitement ont été utilisées et développées dans la décontamination/récupération des polluants au cours des dernières années. Par exemple, échange d'ions, traitement biologique, coagulation.

Les résultats obtenus par **Teo *et al* (2022)** indiquent que la structure du biosorbant joue un rôle important dans le processus de biosorption. Plus la taille des pores est petite, plus la surface de contact du biosorbant est grande. Il est donc réaliste d'utiliser un biosorbant majoritairement microporeux pour obtenir une bonne capacité d'adsorption comme c'est le cas avec le MO. La fabrication de bioadsorbants à base des différentes parties de MO variait de la simplicité (méthode de modification simple) à la synthèse de biosorbants par la méthode complexe (plusieurs réactions en cascade, pour mélanger les propriétés de plusieurs matériaux).

III.2.3 Etude menée par Adewole et ses collaborateurs en 2020

- Selon **Adewole *et al* (2020)**, les déchets agricoles sont un sous-produit de la biomasse qui résulte des processus agricoles qui peuvent inclure des tiges, des feuilles, des graines, des coquilles, des cosses et des pailles. Les déchets constituent toujours une pollution pour l'environnement. À l'heure actuelle, les chercheurs étudient déjà les moyens de transformer durablement ces déchets en ressources précieuses.

Des études ont montré que les déchets agricoles peuvent être utilisés dans la génération de produits qui peuvent servir d'alternatives à ceux disponibles dans le commerce. Par exemple, des produits tels que le biochar et le charbon actif/biochar ont été produits à partir de différents déchets agricoles et trouvent des applications pour différentes utilisations telles que le traitement de l'eau potable, devenant ainsi une autre ressource économique pour les agriculteurs. L'espèce *M. oleifera* est cultivée dans le monde entier en raison de sa valeur médicinale et nutritionnelle.

L'eau potable devient une denrée rare et le traitement de l'eau disponible avec un désinfectant pour l'approvisionnement en eau domestique laisse parfois des sous-produits désinfectants, tels que les THM. Les trihalométhanes (THM) se forment lorsque l'excès de chlore lors de la chloration de l'eau réagit avec les matières organiques présentes dans l'eau. Ils ont des propriétés mutagènes et cancérigènes. *Moringa oleifera* (MO) a trouvé une large acceptation par de nombreuses personnes au monde qui l'ont utilisé pour la nourriture des humains et de la faune, à des fins de santé et comme coagulant pour le traitement de l'eau. Cependant, les coques de graines sont actuellement jetées en tant que déchets et elles n'ont pas été utilisées comme adsorbant pour éliminer les THM de l'eau (**Adewole *et al.*, 2020**).

Les propriétés physicochimiques de l'eau de surface traitée et brute ont été déterminées à l'aide de méthodes standard, et la concentration de THM a été déterminée à partir de l'usine de traitement de l'eau à différentes étapes de traitement à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme (GC-FID).

Des expériences de récupération ont été réalisées pour valider la procédure. Les efficacités du charbon actif de *Moringa oleifera*, l'adsorbant d'enveloppe de graine (MOSH) pour l'élimination des THM dans l'eau et comme coagulant pour le traitement de l'eau, ont également été évalués. Des expériences d'adsorption discontinues ont été réalisées et différents paramètres tels que le pH (5.7 et 9), le dosage de l'adsorbant (0.2, 0.4 et 0.8 g), le temps de contact (30, 60 et 90 minutes) et la concentration initiale (0.2, 0.4 et 0.6 mg/l) ont été optimisés pour l'élimination du trichlorométhane et du tribromométhane à l'aide du charbon actif MOSH. Les données expérimentales d'adsorption de différentes concentrations initiales de trichlorométhane et de tribromométhane ont été utilisées pour tester la conformité avec les isothermes d'adsorption de Langmuir et Freundlich. Le pourcentage de récupération de nos procédures variait de 96.0 ± 1.41 à 100.0 ± 0.00 pour le trichlorométhane tandis que pour le tribromométhane, la plage était de 60 ± 2.82 à 100.0 ± 0.00 . Les rendements moyens d'adsorption en pourcentage pour l'expérience de simulation variaient de 34.365 ± 1.41 à 93.135 ± 0.57 et de 41.870 ± 0.27 à 94.655 ± 0.41 pour le trichlorométhane et le tribromométhane, respectivement. Les conditions optimales pour le trichlorométhane et le tribromométhane étaient un pH de 9, une dose d'adsorbant de 0.8 g, un temps de contact de 60 minutes et une concentration initiale de 0.6 mg/l. Les valeurs optimales de ces paramètres utilisées pour l'adsorption des deux THM dans l'eau de surface desservant la station d'épuration ont donné une efficacité de 100.00 ± 0.00 %.

Les valeurs de turbidité pour l'expérience de coagulation sont passées de $9,76 \pm 0,03$ NTU dans l'eau brute avant coagulation à 5.92 ± 0.13 NTU après coagulation tandis que tous les autres paramètres physicochimiques de l'eau de surface ont diminué en valeur sauf la conductivité et le total des solides dissous qui ont augmenté de 104.5 ± 3 et 63.00 ± 11.31 à 83.0 ± 8.49 mg/l, respectivement. Les données expérimentales correspondent mieux à l'isotherme d'adsorption de Langmuir qu'à Freundlich.

L'étude a conclu que le charbon actif MOSH pourrait servir d'adsorbant pour l'élimination des THM, du calcium et du soufre des échantillons d'eau.

Les résultats obtenus selon les travaux d'**Adewole et al (2020)** qui ont travaillé sur l'efficacité des protéines coagulantes naturelles des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement de l'eau a montré une activité de biocoagulation qui est une propriété exploitable, puisque les paramètres de qualité de l'eau traitée avec la protéine ont satisfait à la plupart des normes pour la qualité de l'eau potable.

III.2.4 Etude menée par Bezzara et ses collaborateurs (2020)

- Selon **Bezzara et al (2020)**, divers chercheurs ont cité les apports de la modification chimique même s'il s'agissait d'un simple traitement chimique et leur effet positif sur la structure du MO.

Dans les travaux de **Bezarra et al (2020)** pour l'élimination du diuron, un herbicide de l'eau contaminé, la poudre d'enveloppe de MO (MOH), a été traitée chimiquement avec deux acides. Après ce traitement chimique, un traitement thermique a été effectué dans un deuxième temps pour éliminer certaines matières inorganiques ou organiques de la surface MO. Ces matières sont considérées comme des impuretés, qui interfèrent dans l'interaction du contaminant avec la surface du biosorbant et augmentent la surface.

Ils ont exploré la modification chimique des enveloppes de graines de MO. La modification chimique (par 0.1 M de CH₃OH pendant 4 h dans un rapport m/v de 1:5 et 0.1 M de HNO₃ pendant 1 h). La poudre de MO modifiée chimiquement a ensuite été utilisée pour l'élimination de l'atrazine. Son efficacité a été prouvée en démontrant un Q_{max} de 10.321 mg/g dans les conditions suivantes : température de 318 K, pH de 5 et masse de 0.04 g. L'équilibre a été atteint à 1200 min.

Les résultats ont confirmé que le processus de biosorption se produit par un mécanisme de chimisorption et de physisorption ensemble (**Bezzara et al ., 2020**).

III.2.5 Etude menée par Gautam et ses collaborateurs en 2020

- Dans les travaux de **Gautam et al (2020)**, les chercheurs ont réalisé de nouvelles nanoparticules magnétiques à base de MO, qui sont efficaces pour la biosorption des ions plomb.

Pour améliorer la chélation des ions de métaux lourds tels que Pb (II), Cd (II), Cu (II) et Ni (II) à partir d'études de systèmes aqueux dans des systèmes discontinus, il a été constaté que

la modification de l'acide citrique et du NaOH de MO améliore l'absorption de ces ions métalliques.

Les chercheurs ont testé l'efficacité des graines MO (naturelles, tailles de particules de 75 à 500 μm) vis-à-vis de Ag(I), Cd(II), Co(II), Cu(II) et Pb(II) à une concentration de 5.0 mg L⁻¹, 2 g d'adsorbant, temps de contact de 20 min, une température de 25 °C et un pH de 6.5.

La meilleure efficacité a été obtenue pour Ag(I), et l'efficacité varie de 28 pour Co(II) à 100% d'Ag(I) et démontre dans l'ordre : Ag(I) > Pb(II) > Cu(II) > Cd(II) > Co(II). Dans ce travail, les graines ont été séchées à 65 °C pendant 24 h et utilisées directement sans autre traitement (**Gautam et al., 2020**).

Gautam et al (2020) ont adopté une procédure de détermination de la teneur phénolique totale du MO en préparant des extraits de ses feuilles. Dans la première étape, 10 g de poudre de feuilles fines séchées ont été mélangés avec 200 ml d'éthanol dans une fiole jaugée pendant 24 h à température ambiante. La solution résultante a été filtrée à l'aide d'un papier filtre et le surnageant a été séché sous vide à 40°C à l'aide d'un évaporateur rotatif. La deuxième étape est le mélange de 0.5 ml d'extrait de plante synthétisé dans 2.5 ml de réactif de Folin-Ciocalteu à 10 % et 2.5 ml de NaHCO₃ à 7.5 % et conservé pour incubation à 45 °C pendant 1 h. Le blanc a également été préparé de la même manière.

Une étude cinétique de **Gautam et al (2020)** ont déchiffré que l'adsorption à l'équilibre pour l'élimination du Pb(II) par MO correspond davantage au modèle de pseudo-second ordre qu'au modèle de premier ordre. La constante de vitesse de premier ordre k₁ était de -0.0682 min⁻¹, tandis que la constante de vitesse de second ordre calculée k₂ était de 3.75 × 10⁻³ g mg⁻¹min⁻¹.

Les résultats obtenus ont montrés que l'absorbance (λ_{max}) de l'échantillon a été déterminée à 760 nm. La concentration de l'échantillon a été déterminée à partir du profil de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique en utilisant une concentration d'acide gallique de 0.01 à 0.12 mg/L (**Gautam et al., 2020**).

III.2.6 Etude menée par Islam et ses collaborateurs en 2021

- Selon **Islam et al (2021)**, la présente étude vise à optimiser les conditions opératoires dans l'étape de coagulation/floculation et de sédimentation des eaux de surface, en plus d'évaluer l'association entre les graines de *Moringa oleifera* et le sulfate d'aluminium coagulant synthétique pour le traitement des eaux de surface. Les tests ont été effectués dans un Jar Test

en utilisant de l'eau de surface du bassin de la rivière. Il a été observé que les conditions opératoires affectent l'efficacité des processus de coagulation/floculation et de sédimentation.

Islam et al (2021) indiquent que les conditions opératoires affectent l'efficacité du processus de coagulation/floculation et de sédimentation. Le sulfate d'aluminium coagulant, appliqué en association avec des graines de *M. oleifera*, permet d'améliorer le temps de sédimentation de l'ensemble du procédé, de sorte que 15 min suffisent. Les conditions de fonctionnement optimales pour l'association des coagulants sont les suivantes : RMV de 105 tr/min, RMT de 1 min, SMV de 30 tr/min et SMT de 15 min.

Pour la gamme de pH de l'eau entre 7 et 9, l'association de coagulants naturels et synthétiques à des dosages supérieurs à 17.5 mg·L⁻¹ sulfate d'aluminium/15 mg·L⁻¹ graines de *M. oleifera* présente des caractéristiques synergiques, et une efficacité d'élimination d'environ 75.0 % pour la couleur et la turbidité et de 70.0 % pour les composés avec absorption UV_{254 nm} sont obtenus.

L'utilisation de graines de *M. oleifera* contribue à réduire jusqu'à 30 % la demande requise en sulfate d'aluminium, sans affecter l'efficacité du processus de coagulation/floculation et de sédimentation, en plus d'être une option environnementale intéressante de nos jours.

III.2.7 Etude menée par Akshay murali et ses collaborateurs en 2022

- Selon **Akshay murali et al (2022)**, l'étude a exploré la pertinence des extraits non fractionnés des graines de l'arbre *Moringa oleifera* comme coagulant pour le traitement de l'eau. Le coagulant a été obtenu en trempant les graines broyées et tamisées dans une solution aqueuse à faible salinité : une alternative simple et peu coûteuse aux coagulants conventionnels dans les milieux où l'expertise et l'équipement spécialisés font défaut.

La performance des coagulants dérivés de *M. oleifera* a été quantifiée en termes d'élimination de la turbidité, de clairance des bactériophages, de concentration de matières organiques résiduelles, ainsi que de méta-paramètres tels que la taille des floccs et la dimension fractale.

L'élimination de la turbidité à la dose optimale de coagulant (14.7 mg (DOC)/L) était > 94 %, similaire à celle enregistrée dans les tests de référence avec l'alun. La distribution de la taille des floccs s'est déplacée vers des tailles plus grandes uniquement pendant les 10 premières minutes de floculation, tandis que la dimension fractale des floccs a continué d'augmenter jusqu'à la plage 2.1 à 2.2, suggérant que le mécanisme de floculation était une agrégation limitée par la réaction.

La floculation pendant une période plus longue (> 10 min) a été utile car elle a conduit à des floccs avec de meilleures caractéristiques de décantation. Les gros floccs de dimension fractale inférieure qui ne se sont pas déposés doivent être facilement éliminés par filtration en aval.

Les résultats obtenus par **Akshay murali *et al* (2022)** dans les tests d'élimination des virus, la coagulation avec *M. oleifera* a diminué le titre MS2 viable d'environ 1.3 log, supérieur à la valeur d'élimination du log de turbidité dans ces expériences (~ 1 log). Il est important de noter que la procédure d'extraction a permis > 78 % du COD extrait dans l'eau traitée, avec des doses plus élevées de coagulant conduisant à des résidus de COD inférieurs en pourcentage du COD ajouté.

Conformément à cette observation, les matières organiques résiduelles se sont avérées inactives pour la coagulation.

Le COD résiduel est une préoccupation majeure car il peut faciliter la repousse microbienne, interférer avec la désinfection et entraîner la formation de sous-produits de désinfection. La combinaison des coagulants avec d'autres processus de traitement tels que la filtration et l'adsorption en aval, l'utilisation d'une désinfection physique (par exemple UV ou solaire) ou la limitation des applications à une utilisation non potable peut atténuer ces préoccupations. Filtration lente sur sable et adsorption par charbon, bois ou l'écorce et les feuilles de *M. oleifera* méritent particulièrement d'être explorées (**Akshay murali *et al.*, 2022**).

III.2.8 Etude menée par Moulin et ses collaborateurs en 2020

- Coagulation/floculation est le processus le plus étudié impliquant l'utilisation de graines de MO. Cependant, ces dernières années, les études se sont de plus en plus intensifiées pour comprendre principalement comment se produit le mécanisme de coagulation, identifier les protéines qui sont des agents coagulants et les techniques d'isolement.

De plus, de nouvelles méthodes ont été évaluées par **Moulin *et al* (2020)** pour améliorer l'élimination des contaminants dans la coagulation/floculation, telles que la fonctionnalisation avec des nanoparticules.

En raison de la large application des graines MO pour le processus ci-dessus, les autres parties peuvent être considérées comme des déchets éliminés dans des décharges. En ce sens, certaines études rapportent l'utilisation de ces matériaux pour d'autres types de traitements de

l'eau, comme l'adsorption, qui rapportent leur utilisation *dans la nature* et modifiées chimiquement ou thermiquement pour éliminer les polluants émergents, parmi lesquels : les métaux lourds, les colorants, les pesticides, les médicaments. Entre autres, ont présenté une bonne élimination de ces polluants, faisant du MO un précurseur intéressant pour le développement d'une technologie absorbante. Des études impliquant d'autres techniques de traitement de l'eau rapportent l'utilisation de MO, comme, par exemple, la modification de la surface de membranes commerciales, afin d'améliorer le matériau de la membrane. Enfin, afin de rendre possible son application dans des systèmes réels, des traitements hybrides ont également été étudiés, utilisant différentes opérations unitaires et tirant parti du potentiel de MO à la fois pour augmenter l'efficacité du processus et pour augmenter la durée de vie utile de l'équipement utilisé. .

L'étape essentielle dans les usines conventionnelles de traitement de l'eau est l'agrégation des matières particulaires, suivie d'une séparation gravitationnelle et d'un filtrage. Cette étape est très importante car elle élimine une grande partie des solides ainsi que divers types d'impuretés, réduisant ainsi la turbidité de l'eau (**Moulin *et al.*, 2020**).

Les usines de traitement de l'eau utilisent des coagulants chimiques inorganiques tels que des sels d'aluminium et ferriques et d'autres polymères organiques chargés.

En plus de l'utilisation rapportée des graines MO comme coagulant-floculant, aide coagulant, adsorption et dans des procédés hybrides, d'autres études ont rapporté différentes applications et procédés de traitement utilisant des graines MO afin d'obtenir de l'eau potable.

Les résultats obtenus ont montré qu'il s'agit d'un coagulant naturel à haute efficacité, à faible coût et respectueux de l'environnement (**Moulin *et al.*, 2020**).

III.3 Dans le traitement des eaux usées

L'arbre *Moringa Oleifera* est actuellement promu dans plusieurs pays en développement. Les graines de cet arbre tropical contiennent des protéines hydrosolubles chargées positivement qui agissent comme un coagulant naturel efficace pour le traitement des eaux usées (**Rifi *et al.*, 2022**)

III.3.1 Traitement avec *Moringa oleifera* seule

Le traitement des eaux usées à l'aide des graines de *MO* est basé sur le processus de coagulation-floculation dans lequel l'élimination des polluants est obtenue grâce à la présence de protéines cationiques dans les graines de biomasse de *MO*, formant ainsi de petits floccs avec les particules en suspension et les matières organiques dans les eaux usées qui peuvent se déposer ou sédimenter pendant des temps de contact variables (Adelodun *et al.*, 2020)

III.3.1.1 Etude menée par Adelodun et ses collaborateurs en 2020

- Selon Adelodun *et al* (2020), la biomasse de graines de *MO* est un coagulant efficace pour réduire la charge polluante des eaux usées. Cette étude a examiné le potentiel de la biomasse de graines de *MO* comme coagulant pour l'élimination de la turbidité, de la demande biochimique en oxygène (DBO), et de la demande chimique en oxygène (DCO) des eaux usées municipales. Des expériences ont été réalisées en utilisant le coagulant *MO* à des doses de traitement variables de 50, 100, 150, 200 mg/L, ainsi qu'un traitement témoin (0 mg/L) pendant une période de décantation de 250 min à l'air libre (température ambiante). La cinétique et les variables de prédiction du cumul de la turbidité, de la DBO et de la DCO ont été estimés à l'aide de modèles simplifiés de premier ordre et de Gompertz modifiés.

Les résultats ont montré que l'élimination de la turbidité, de la DBO et de la DCO était maximale. Elle était de l'ordre de 94.44%, 68.72%, et 57.61 %, respectivement, en utilisant une dose de *MO* de 150 mg/L. Divers paramètres cinétiques, tels que la constante de vitesse, l'élimination cumulée mesurée (RE_m) par rapport à l'élimination cumulée prédite (RE_p) et le taux d'élimination spécifique des polluants (μ m) étaient également maximaux lorsqu'une dose de *MO* de 150 mg/L était ajoutée, l'erreur standard étant inférieure à 5 %. Les modèles développés ont été validés avec succès sur de multiples observations.

Les résultats ont révélé qu'une réduction significative ($p < 0.05$) des paramètres sélectionnés des eaux usées, à savoir la turbidité, la DBO et la DCO. La modélisation cinétique du système de réacteur utilisant le modèle de premier ordre et le modèle de Gompertz modifié a permis d'améliorer le processus d'élimination de la turbidité, de la DBO et de la DCO. *MO* (0-200 mg/L), l'élimination maximale mesurée (RE_m) et prédite (RE_p) de la turbidité RE_m : 94.44 et RE_p : 94.44 a été atteinte, RE_m : 94.44 et RE_p : 96.97 ; (DBO) : RE_m : 68.72 et RE_p : 68.15 ; et (DCO) : RE_m : 57.64 et RE_p : 58.05 ont été atteints en utilisant une dose de *MO* de 150 mg/L après 250 min de rétention par décantation, respectivement.

Cependant, les modèles doivent être testés pour le traitement d'autres eaux usées car les variables peuvent varier selon la qualité de l'eau.

III.3.1.2 Etude menée par Sané et ses collaborateurs en 2022

- Selon Sané *et al* (2022), un prototype d'usine de traitement des eaux usées couplé au traitement des graines de *Moringa Oleifera* a été développé afin d'évaluer leur efficacité pour la réduction des bactéries indicatrices fécales Dans les eaux usées domestiques.

Nous avons mis en contact des eaux usées avec des MO sur la base d'un protocole préétabli par Abdallah en 2016. Des essais de 250 ml d'eaux usées F0, F1 et F2 ont été préparés dans des bouteilles en verre. De la poudre de MO a été ajoutée dans chaque essai à une concentration finale de 300, 50 et 50 mg/L pour F₀MOS, F₁MOSet F₂MOS, respectivement. L'incubation a été réglée en 3 temps : agitation rapide pendant 90 secondes pour déstabiliser les colloïdes, agitation lente pendant 5 minutes pour fabriquer des micro-flocs, décantation pendant 2 heures 53 minutes et 30 secondes sur un agitateur magnétique multi-position. Le surnageant a été centrifugé à 4000 Rpm pendant 10 minutes pour les applications en aval.

Les résultats des abattements obtenus par Sané *et al* (2022) après traitement avec MO dans les eaux usées varient significativement selon les échantillons et le type des bactéries (ANOVA, $p < 0.01$). Les abattements varient de 36.6% à 78.8% pour *E. coli*, de 28.3 % à 84.6 % pour les coliformes fécaux, de 35.3 % à 95.6 % pour *Vibrio cholerae*, et de 32.1 % à 92.4 % pour la flore hétérotrophe totale. Les taux d'abattement les plus élevés ont été obtenus dans les échantillons F1 (à l'entrée du filtre bactérien) pour *E. coli*, *Vibrio cholerae* et la flore totale. Tandis que pour les coliformes fécaux, il a été obtenu dans F2.

Les résultats indiquent que le système prototype réalisé par Sané *et al* (2022) présente une grande capacité de réduction des bactéries avec des abattements allant jusqu'à 99.34%. De fortes réductions de la charge bactérienne ont été obtenues après l'addition de graines de *Moringa Oleifera* dans les eaux. Ces réductions varient entre 36.6 et 78.8% pour *E. coli*, 28.3 et 84.6% pour les coliformes fécaux, 35.3 et 95.6% pour *Vibrio cholerae* et 32.1 et 92.4% pour la flore totale. Les mêmes effets des graines de *Moringa Oleifera* ont été observés pour la réduction des bactéries résistantes aux antibiotiques, Bêta-lactamases à spectre étendu et *Enterobacteriaceae* résistantes aux carbapénèmes avec des abattements allant jusqu'à 98% pour *E. coli* et les coliformes fécaux, 100% pour *Vibrio cholerae* et 91.96% pour la flore totale.

Les résultats obtenus par **Sané et al (2022)** ont soutenu la haute capacité des graines de *Moringa Oleifera* comme une excellente alternative pour la réduction voir même l'élimination à titre purificateur des pathogènes et des bactéries résistantes aux antibiotiques persistantes habituellement dans eaux usées domestiques.

III.3.1.3 Etude menée par Rai et ses collaborateurs (2022)

- **Rai et ses collaborateurs (2022)** de leur part ont considéré que les procédés classiques de traitement des eaux usées posent de grandes difficultés pour éliminer les contaminants. L'utilisation d'agents chimiques dans le traitement des eaux usées, tels que le sulfate d'aluminium, le chlore, le permanganate de potassium, qui entraîne par inadvertance divers problèmes de santé majeurs lorsqu'ils sont utilisés sur de longues périodes. En conséquence, les procédures de traitement existantes sont à la fois coûteuses et inadéquates pour répondre aux normes de conformité requises. Il faut donc créer des méthodes innovantes qui intègrent les aspects environnementaux et socio-économiques du développement durable tout en réduisant les sous-produits, en améliorant les caractéristiques physico-chimiques et en utilisant moins de ressources. Dans ce scénario, les extraits/poudres de graines d'un arbre tropical à usages multiples, le MO sont utilisées dans plusieurs pays pour purifier l'eau potable ou traiter les eaux usées (**Rai et al., 2022**).

Selon **Rai et al (2022)**, la présente recherche a examiné l'utilisation du coagulant de graines de MO dans le traitement des eaux usées du FETP (Final Effluent Treatment Plant). Les graines de MO se sont avérées efficaces pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques de la qualité de l'eau des eaux usées, comme en témoignent les résultats.

Les résultats de l'application des graines de MO sont résumés dans le **tableau 6**.

Tableau 6 caractéristiques physicochimiques des eaux usées après la coagulation/floculation (C/F) à l'aide de MO et d'ultrafiltration (UF) (**Rai et al., 2022**).

Parameters	Unit	WW after C/F	% removal	WW after	Total removal
pH	—	6.8	—	6.9	—
Turbidity	NTU	10.08	64	1.1	96.85
Chemical oxygen demand (COD)	mg/l	363.11	38	212	63.80
Biochemical oxygen demand	mg/l	118.72	58	29	89.74
Ammoniacal nitrogen	mg/l	19	9.52	15	28.57
Alkalinity	mg/l	1020	49	189	91.50
Total hardness	mg/l	927	49.19	170	90.68
Zeta potential	—	0.19	—	0.21	—

Le pH de l'échantillon était compris entre 6.5 et 8.5. Cela démontre que les graines de MO n'ont pas eu d'influence sur le pH de l'échantillon et qu'aucune étape ultérieure n'est nécessaire pour corriger les valeurs de pH, et aussi que le coagulant est efficace pour traiter les eaux usées du FETP. Une réduction de 64% de la turbidité a été observée après l'étape de coagulation/floculation en utilisant les graines de MO. La MO peut être utilisée comme coagulant dans le traitement des eaux à l'échelle domestique et industrielle. Étant donné que la MO est beaucoup plus efficace à des niveaux élevés de turbidité, son utilisation généralisée pourrait être particulièrement avantageuse même pendant la mousson, lorsque la turbidité de l'eau est maximale et que les stations d'épuration sont temporairement fermées.

Les niveaux élevés de DCO (585.66mg/L) et de DBO (282.66mg/L) dans les eaux usées marquent la présence d'une charge plus importante de matière inorganique et organique. Les graines de MO se sont avérées efficaces pour réduire les niveaux de DCO et de DBO de l'échantillon de 38% et 58%, respectivement. Cependant, une réduction spectaculaire de la DBO a été observée au cours du processus. L'adsorption et la neutralisation de la charge sont les mécanismes les plus probables par lesquels les polluants des échantillons d'eaux usées ont été éliminés par la MO. L'ammoniac n'a pas été éliminé efficacement par les graines de MO au cours du processus, ce qui peut être attribué au fait que la MO est un coagulant cationique et ne peut pas attirer la charge positive de l'ammonium. Une diminution de l'alcalinité de 2000 à 1020 (mg/L) et de la dureté totale de 1824.66 à 927 (mg/L) a été observée. Les protéines hydrosolubles et chargées positivement présentes dans les graines de MO pourraient être

responsables de l'adsorption de l'alcalinité et de la dureté totale de l'échantillon. Les valeurs du potentiel zêta ont montré une augmentation significative pendant le processus de coagulation-floculation, et qui a gardé la même valeur pendant presque toute l'étude. Après la coagulation/floculation, des réactions de répulsion électrostatique se sont produites au cours de la sédimentation et ont modifié la stabilité de la suspension, entraînant l'augmentation des valeurs zêta et démontrant la neutralisation de la charge, puisque les valeurs sont restées proches de zéro. Ces résultats indiquent que le mécanisme impliqué dans cette étape est la neutralisation de la charge.

Rai et ses collaborateurs (2022) ont conclu que la MO représente un excellent coagulant naturel pour le traitement des eaux usées. La coagulation de la MO n'a pas modifié de manière significative le pH de l'eau. Cela semble être un avantage supplémentaire par rapport à la coagulation chimique car cela évite la nécessité d'ajuster le pH après le traitement. En bref, cette technologie s'est avérée rentable, sûre pour l'environnement et durable, ce qui lui permet d'être employée dans l'industrie ainsi que dans de nombreuses autres activités qui nécessitent une eau de meilleure qualité.

III.3.1.4 Etude menée par **Desta et pote** en 2021

- L'expérience **Desta et pote (2021)** a été réalisée sur la base d'une charge de conception aléatoire de 0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 et 0.6 (g/500ml) de poudre extraite des graines de *Moringa*. La DCO, la couleur et la turbidité ont été déterminées pour les caractéristiques acides et basiques des eaux usées. L'étude a prouvé que l'utilisation de la poudre de graines de *Moringa* dans la réduction de la couleur, de la turbidité et de la DCO est très efficace. L'élimination maximale de la couleur et de la turbidité a été atteinte avec 0.4 g par 500 ml d'échantillon d'eau usée, mais une augmentation supplémentaire du dosage de la poudre de graines de *Moringa* au-dessus de 0.4 g a conduit à une diminution de la turbidité et de la couleur en raison de la rentabilisation du floc. Dans le cas de la DCO, des expériences supplémentaires sont nécessaires en augmentant le dosage de la poudre de graines de *Moringa*. L'étude a également montré que la poudre de graines de *Moringa* a une efficacité élevée d'élimination de la turbidité et de la couleur plutôt que de la DCO. La réduction maximale de la turbidité, de la couleur et de la DCO de *Moringa oleifera* dans les eaux usées acides était de 98 %, 90.76 % et 65.8 %, respectivement. Tandis que la réduction maximale de la turbidité, de la couleur et de la DCO dans les eaux usées basiques était de 99.5 %, 97.7 % et 65.82 %, respectivement (**Desta et pote, 2021**).

L'application de la méthodologie de surface de réponse (RSM) (response surface methodology) pour optimiser le processus de coagulation pour le traitement des eaux usées en utilisant la poudre de *Moringa* a été étudiée. Les résultats ont montré que RSM était une méthode efficace pour optimiser les paramètres expérimentaux dans le traitement des eaux usées. L'efficacité d'élimination de la poudre de graines de *Moringa* dépend de la valeur du pH. La poudre de graines de *Moringa* fonctionne mieux avec une gamme de pH de 7-9. L'étude a également montré que le meilleur équilibre d'adsorption a été observé en utilisant 0.1 g de poudre de graines de *Moringa oleifera*. L'équilibre d'adsorption de la couleur, de la turbidité et de la capacité d'absorption de la DCO a été trouvé pour diminuer avec un dosage accru de l'adsorbant et le meilleur lorsque l'on utilise 0.1 g de poudre de graines de *Moringa oleifera* (Desta et pote, 2021).

III.3.1.5 Etude menée par Benettayeb et ses collaborateurs en 2022

- Les propriétés de sorption de toutes les parties (graines, feuilles, écorces et cosses) de *Moringa oleifera* ont été proposées par de nombreux groupes de recherche pour la séquestration des ions de métaux lourds dangereux et toxiques (par ex, Cu(II), Ni(II), Pb(II), Cd(II), Hg(II)) dans les eaux usées. Les ions métalliques ont été déclarés comme polluants prioritaires par de nombreux pays.

Afin d'assurer la durabilité environnementale des ressources en eau douce, les chercheurs en environnement s'intéressent constamment aux biomatériaux bon marché et disponibles localement comme le *Moringa*, qui sont non seulement efficaces pour le traitement de l'eau mais aussi résistants à l'utilisation dans différentes conditions de traitement des eaux usées. Jusqu'à présent, les chercheurs ont essayé de trouver de nouveaux biosorbants à base de *MO* pour améliorer leur capacité d'élimination/récupération des polluants ainsi que leur sélectivité vis-à-vis de certains polluants toxiques. Benettayeb et al (2022) ont pris l'initiative de positionner les recherches mettant en œuvre *Moringa oleifera* comme adsorbant des métaux lourds durant la période allant de 2016 à 2021. Les données utilisées pour créer la figure 1 ont été collectées à partir de Scopus en utilisant les mots-clés d'adsorption du *Moringa* ou d'élimination des polluants par le *Moringa* et de *Moringa* comme adsorbants potentiels pour les métaux et les colorants. Au cours de la période 2016 à 2021, la base de données Scopus a donné 819 articles qui ont étudié le potentiel du *Moringa* comme adsorbant pour l'élimination des métaux lourds et des colorants organiques. La figure 8 démontre que l'utilisation du *Moringa* comme adsorbant est en augmentation, d'autant plus que le nombre d'études

publiées en 2021 est de 347 par rapport à l'année 2016 avec 60 articles. La figure 8b montre qu'il est surtout appliqué pour la décontamination des colorants (BG, CV) suivi par les ions Cu(II) et après les ions Cd(II). Ces données montrent que cette plante est très importante dans les domaines de l'adsorption, et peut être utilisée pour créer une autre génération de bioadsorbants .

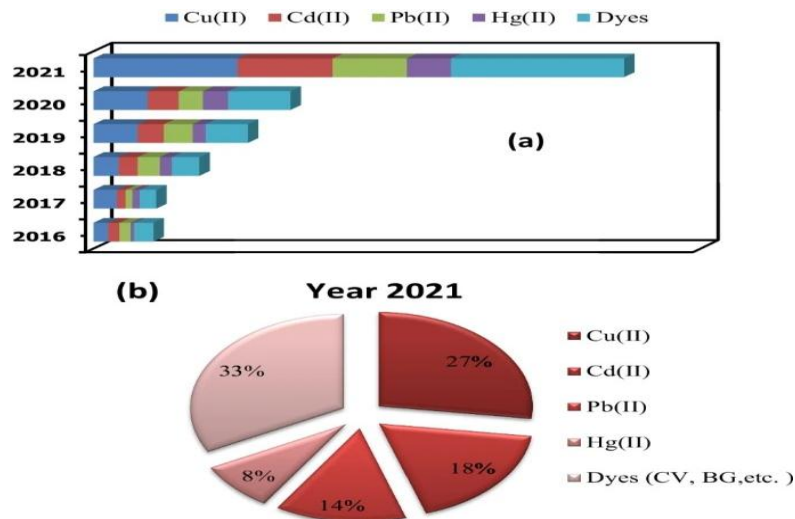


Figure 8 (a) Répartition des études passées de 2016 à 2021 sur l'adsorption de MO pour l'élimination des métaux lourds et des colorants organiques, **(b)** nombre d'études sur l'adsorption de MO publiées en 2021 sur l'élimination des métaux lourds et des colorants (Benettayeb *et al.*, 2022).

Selon Benettayeb *et al* (2022), la MO est connue pour ses propriétés intéressantes dans le traitement des eaux usées par coagulation, floculation et biosorption ; ce concept réduira l'impact environnemental des produits chimiques dangereux utilisés pour la purification de l'eau contaminée. Par conséquent, il pourrait être une solution corrective dans les zones rurales confrontées à la pénurie d'eau où il n'y a pas de ressources pour obtenir des techniques et des matériaux conventionnels coûteux. Ils ont rapporté que la farine de *Moringa* a montré une meilleure performance coagulante comparée à la MO dans l'élimination de Pb(II) à pH 10.0, à une dose de 15 g/L et à 100 °C. Cependant, ils ont obtenu une efficacité d'élimination de 95 % du Pb(II) dans une eau ayant un pH de 2.0, une dose de coagulant de 5 g/L et une température de 22 °C en utilisant la farine de graines de MO. Une autre recherche a étudié l'élimination des ions Cd(II), Pb(II), et Cu(II) des effluents industriels en utilisant la poudre de graines de *Moringa* sous sa forme naturelle. La capacité maximale d'adsorption de Langmuir (Q_{max}) s'est avérée être de 233.16.1, et 10.2 mg g⁻¹ pour Cd(II), Pb(II), et Cu(II), respectivement. Les efficacités d'adsorption rapportée de tous les polluants étaient dans la

gamme de 99-100% à partir des eaux usées synthétiques. Les efficacités d'élimination dans les eaux usées complexes comparant les effluents industriels étaient approximativement de 92-95%.

L'effet de la modification de MO sur certains polluants toxiques célèbres, selon **Benettayeb et al (2022)**, la structure du biosorbant joue un rôle important dans le processus de biosorption. Plus la taille des pores est petite, plus la surface de contact du biosorbant est grande. Il est donc réaliste d'utiliser un biosorbant majoritairement microporeux pour obtenir une bonne capacité d'adsorption comme c'est le cas pour le MO. La modification des biosorbants à base de MO a été effectuée pour améliorer leur affinité envers les polluants cibles et leur taux d'absorption, ainsi que pour améliorer leur sélectivité et optimiser, par exemple, la surface, la capacité d'adsorption ou étendre, par exemple, la composition des groupes fonctionnels de surface pour éliminer les ions métalliques qui sont moins ou pas adsorbés par la MO vierge. La nature et les caractéristiques intrinsèques des feuilles, graines et coques de MO ont un effet sur la biosorption. Habituellement, les chercheurs appliquent des processus de prétraitement pour modifier ou affecter certaines de leurs propriétés inhérentes aux biomatériaux afin de promouvoir le processus de biosorption.

Selon **Benettayeb et al (2022)**, les auteurs ont fabriqué de nouvelles nanoparticules magnétiques à base de MO, qui se sont avérées efficaces pour la biosorption des ions plomb. Les résultats ont obéi à l'adsorption isotherme de Freundlich avec une capacité maximale de 64.97 mg/g (avec une efficacité de 94.08%) à une température de 50 °C, un pH de 5.0 et un temps de 60 min (**Gautam et al., 2020**). Pour améliorer la chélation des ions de métaux lourds tels que Pb(II), Cd(II), Cu(II), et Ni(II) à partir de systèmes aqueux en batch, il a été constaté que la modification de la MO par l'acide citrique et le NaOH améliore l'absorption de ces ions métalliques.

III.3.1.6 Etude menée par Smahi et ses collaborateurs (2020)

- Selon **Smahi et al (2020)**, l'utilisation des eaux usées est permise dans différents secteurs d'activité et la pollution est aujourd'hui en augmentation, notre étude est basée sur l'introduction de procédés microbiologique et physico-chimique pour traiter les eaux usées par l'incorporation de graines de *Moringa oleifera*.

Hebdomadairement, de février à mi-avril 2018, de nombreux échantillons d'eaux usées ont été prélevés dans l'égout principal de l'Oued de Bechar dans le Sud-ouest de l'Algérie. Les

systèmes de filtration suggérés dans notre étude comprennent l'utilisation de couches de gravier de différents diamètres, de sable et de 1 % de poudre de graines dégraissée et non dégraissée de *Moringa oleifera* mélangées à du sable. L'eau filtrée est analysée et testée pour la flore mésophile totale, les coliformes fécaux, les coliformes totaux, *Streptocoques D*, *Salmonella*, *Clostridium*, *Vibrio cholera*, *Staphylococcus aureus*, et pour les paramètres physico-chimiques tels que le pH, l'humidité et la température.

Nous avons constaté une meilleure efficacité de l'élimination sur les deux germes de contamination dont *Clostridium* et les *Streptocoques D* avec 96% et 81%, respectivement dans l'eau traitée par les graines dégraissées, et 81%, 97% dans le filtre à base de graines non dégraissées, respectivement, pour *Clostridium et Streptocoques*, en plus d'un abattement meilleur que celui obtenu lors de la filtration par le sable, grâce à l'effet antibactérien des graines sur les germes, y compris les bactéries Gram négatif et Positive telles que *Salmonella* et *Staphylococcus aureus* dans la colonne des Pathogènes existants dans les eaux usées. Pour les coliformes et la flore aérobie mésophile totale, la diminution a été très minime et reste quelque peu hors de proportion avec les normes limitées pour les eaux usées traitées, tant pour l'irrigation et l'aquaculture et cela peut être dû au faible pourcentage de graines incorporées dans nos filtres. L'effet éliminatoire des graines de *M. oleifera* apparaît également dans l'éradication des métaux lourds, à savoir le cadmium qui a été complètement éliminé dans le filtre de graines dégraissées (Smahi *et al.*, 2020)

III.3.2 *Moringa* et autres coagulant

III.3.2.1 Etude menée par Tong et ses collaborateurs (2022)

- Selon Tong *et al* (2022), l'extrait de graines de *Moringa oleifera* et le chitosane, ces deux bio-coagulants disponibles en abondance en Malaisie, ont été étudiés pour leur efficacité de coagulation-floculation dans le traitement des eaux usées de pisciculture collectées.

Les interactions entre les paramètres de fonctionnement tels que le pH, le dosage du coagulant, le temps de mélange et le temps de sédimentation ont toutes été méticuleusement étudiées, examinées et validées à l'aide de tests en pots.

L'objectif souhaité pour les deux facteurs, le dosage de coagulant (A) et le temps de décantation (D) ont été fixés au minimum pour obtenir une condition rentable avec la plus haute performance tandis que le temps de mélange et la valeur du pH ont été définis pour le

mélange. La valeur du pH a été défini pour être dans la gamme des niveaux étudiés afin d'obtenir la plus haute performance. Le tableau 7 montre les solutions générées par le logiciel en fonction de la désirabilité. Les échantillons d'eaux usées ont été traités en utilisant la condition optimisée obtenue par le logiciel pour être comparés avec l'échantillon de contrôle ayant les mêmes conditions de fonctionnement (**Tableau 7**).

Tableau 7. Solutions générées par design-expert sur la base de la désirabilité pour (a) l'extrait de graines de *Moringa oleifera* et (b) le chitosane (**Tong et al., 2022**).

(a)

No.	Coagulant dosage	pH	Mixing time	Settling time	Turbidity	Desirability
1	400	10	15.38 (15)	10	128.854	0.903 Selected
2	400.02	10	15.42	10	128.853	0.903
3	400.14	10	15.07	10	128.856	0.903
4	400	10	13.9	10	128.858	0.903
5	400	10	13.77	10	128.872	0.903

(b)

No.	Coagulant dosage	pH	Mixing time	Settling time	Turbidity	Desirability
1	100 5.6 (6) 15	10.16 (10)	73.0963	0.861	Selected	
2	100 5.6 15	25.84	73.0963	0.861		
3	100 5.6 15	29.14	73.0964	0.861		
4	100 5.6 15	17.50	73.0964	0.861		
5	100 5.6 15	16.24	73.0962	0.861		

Le résultat obtenu montre que 84% d'élimination de la turbidité a été observée pour les échantillons d'eau traités avec le Chitosane à la condition optimisée de 100 mg/L de dosage de coagulant, pH 6, 15 min de temps de mélange et 10 min de temps de décantation.

Et 47% d'élimination de la turbidité pour l'extrait de graines de *M. oleifera* à la condition optimisée de 400 mg/L de dosage de coagulant, pH 10, temps de mélange de 15 min et temps de décantation de 10 min.

Comparé à l'extrait de graines de *M. oleifera*, une performance d'élimination satisfaisante (> 64%) a été atteinte par le Chitosane lorsqu'il a été testé contre la demande chimique en oxygène, les solides totaux en suspension, les solides volatils totaux et la teneur en phosphate.

Tong et al (2022) conclu que le traitement des eaux usées des piscicultures par l'extrait de graines de *M. oleifera* était de 400 mg/L, pH 10, temps de mélange de 15 minutes et temps de décantation de 10 minutes. Tandis que pour le Chitosane était à 100 mg/L, pH 6, 15 min de mélange et 10 min de décantation. Dans le cadre de l'optimisation des paramètres de processus pertinents, les résultats de turbidité correspondaient bien pour l'extrait de graines de *M. oleifera* avec seulement 0.66% d'erreur mais ne correspondaient pas à l'échantillon de chitosane qui a enregistré une erreur de 49.79%. Dans l'ensemble, le Chitosane a montré une plus grande réduction de l'ammoniac (25%), DCO (64%), TSS (70%), TVS (64%) et du phosphate (80%) que celle de l'extrait de graines de *M. oleifera* quia seulement révélé une élimination de l'ammoniac comparativement plus élevée (32%). Cette analyse a impliqué avec succès que le Chitosane possède une capacité prometteuse pour rendre raisonnablement efficace le traitement des eaux usées de la pisciculture. De futures études à l'échelle pilotées utilisant le chitosane comme bio-coagulant pourraient être pratiquées pour clarifier les eaux usées de la pisciculture. De plus, la modification du Chitosane via une dérivatisation chimique pourrait être ciblée pour l'amélioration de l'efficacité du traitement afin de répondre à la limite de décharge stipulée par les législations environnementales (**Tong et al., 2022**).

Conclusion générale

Le présent travail porte sur les dernières recherches dans le traitement des eaux de surface et des eaux usées avec les graines de *Moringa Oleifera*.

L'eau potable est un enjeu sanitaire majeur pour les populations, en particulier dans les pays en voie de développement. Les méthodes simples et peu coûteuses de traitement des eaux sont un critère essentiel de la durabilité des processus dans ces pays (France, Canada, États-Unis, Koweït, Israël et Singapour). C'est ce qui fait la force du *Moringa Oleifera*, un arbre qui pousse en Asie et en Afrique dont les graines sont utilisées pour la première étape du traitement des eaux.

La production d'eau potable suffisamment clarifiée nécessite l'utilisation des produits chimiques parfois dangereux pour la santé humaine. De ce fait des alternatives naturelles aux coagulants et aux désinfectants ont été envisagées, y compris les plantes cultivées dont *Moringa Oleifera*. Cet arbre tropical à usage multiple est passé d'un arbre marginal, voire inconnue à celui de nouvelle ressource alimentaire ; dans des projets de lutte contre la malnutrition, médicinale ; comme la diminution du taux de glycémie et de cholestérol, et économique ; comme un accélérateur de croissance végétale et dans la dépollution des eaux usées.

Moringa Oleifera est toujours considéré comme un élément de coagulation très intéressant, dans ces derniers temps les auteurs sont toujours évolués dans la recherche de domaine des traitements des eaux avec *Moringa*, ils ont trouvés que les graines du *Moringa*, une fois transformées en poudre, deviennent un flocculant naturel très efficace pour le traitement de l'eau.

Cette efficacité revient à la présence de protéines cationiques actives qui agissent en tant qu'agent adsorbant, coagulant et désinfectant. En effet ces derniers neutralisent les matières colloïdales et provoquent la sédimentation des particules minérales et organiques, ces protéines ont une capacité de clarification élevée grâce à des composants actifs dotés d'excellentes propriétés de coagulation.

Ces dernières années, *Moringa Oleifera* est apparu comme un biosorbant vert à bas prix pour le traitement des eaux contaminées par des métaux lourds et des colorants, et compte tenu de sa disponibilité et sa haute capacité comme une excellente alternative pour la réduction voire même l'élimination à titre purificateur des pathogènes et des bactéries résistantes aux

antibiotiques persistantes habituellement dans eaux usées domestiques, nous pouvons créer une autre génération de biosorbants efficaces basés sur différentes partie de cette plante.

Les principaux résultats du traitement des eaux synthétisées rapportées à partir de la bibliographie que nous avons consultée.

→ La poudre de graines de *Moringa* a une efficacité élevée d'élimination de la turbidité et de la couleur plutôt que de la DCO. La réduction maximale de la turbidité, de la couleur et de la DCO de *Moringa oleifera* dans les eaux usées acides était de 98 %, 90.76 % et 65.8 %, respectivement, Tandis que la réduction maximale de la turbidité, de la couleur et de la DCO dans les eaux usées basiques était de 99.5 %, 97.7 % et 65.82 %, respectivement (**Desta et pote, 2021**).

→ L'étude a conclu que le charbon actif MOSH pourrait servir d'adsorbant pour l'élimination des THM, du calcium et du soufre des échantillons d'eau et que *Moringa oleifera* a montré une activité de biocoagulation qui est une propriété exploitable, puisque les paramètres de qualité de l'eau traitée avec la protéine ont satisfait à la plupart des normes pour la qualité de l'eau potable (**Adewole et al., 2020**).

→ La poudre de MO modifiée chimiquement a ensuite été utilisée pour l'élimination de l'atrazine. Son efficacité a été prouvée en démontrant un Q_{max} de 10.321 mg/g dans les conditions suivantes : température de 318 K, pH de 5 et masse de 0.04 g. L'équilibre a été atteint à 1200 min. Les résultats ont confirmé que le processus de biosorption se produit par un mécanisme de chimisorption et de physisorption ensemble (**Bezerra et al., 2020**).

→ Le sulfate d'aluminium coagulant, appliqué en association avec des graines de *M. oleifera*, permet d'améliorer le temps de sédimentation de l'ensemble du procédé, de sorte que 15 min suffisent, L'utilisation de graines de *M. oleifera* contribue à réduire jusqu'à 30 % la demande requise en sulfate d'aluminium, sans affecter l'efficacité du processus de coagulation/floculation et de sédimentation, en plus d'être une option environnementale intéressante de nos jours (**Islam et al.,2021**).

Ce travail reste à approfondir pour connaître l'efficacité de cette plante pour l'épuration des eaux usées à travers des analyses complémentaires afin de mieux valoriser cette technique de traitement à base des graines de *Moringa Oleifera* dans l'épuration des eaux.

Références bibliographiques

A

- Abdull, R., Ahmad, F., Ibrahim, M. D., Kntayya, S., B., (2014)**, Health benefits of *Moringa oleifera*, *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 15 (20), 8571-8576.
- Abiodun, O.A.; Adegbite, J.A et Omolola, A.O. (2012)**, Chemical and Physicochemical Properties of *Moringa Flours and Oil*. *Global Journal of Science Frontier Research Biological Sciences*, pp 12-18, V 12, N 5 version 1.0.ISSN: 0975-5896.
- Abouzlam M., (2014)**, *Optimisation d'un procédé de traitement des eaux par ozonation catalytique*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 143 p.
- Adamczyk, Z., (2003)**, *Particle adsorption and deposition, role of electrostatic interactions*, *Advances in Colloid and Interface Science*.
- Adelodun, B., Ogunshina, M. S., Ajibade, F. O., Abdulkadir, T. S., Bakare, H. O., & Choi, K. S. (2020)**, *Kinetic and prediction modeling studies of organic pollutants removal from municipal wastewater using Moringa oleifera biomass as a coagulant*. *Water*, 12(7), 2052.
- Adewole, ST., Kuku , A., Okoya, A.(2020)**, "Efficacité d'une protéine coagulante naturelle de l'enveloppe de graines de *Moringa oleifera* (Lam) dans le traitement de l'eau du réservoir d'Opa, Ile-Ife, Nigéria", *Heliyon*, vol. 6, non. 1, article ID e03335.
- Agroconsult Haitis S.A., (2016)**, *Analyse des Potentialités de l'Exploitation du Moringa en Haïti*. Ministère de l'agriculture, des ressources naturelles et du développement rural (Marndr), 168 p.
- Alexandre O., Boutin C., Duchène Ph., Lagrange C., Lakel A., Liénard A., Orditz D., (1998)**. Filière d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation. *Techniques de documentation Lavoisier* (FNDAE N22), Paris, France.
- Amjad M.S., Qureshi H., Arshad M., Chaudhari S.K. et Masood M.,(2015)**, The incredible queen of green: Nutritive value and therapeutic potential of *Moringa oleifera* Lam. *Journal of Coastal Life Medicine*, 3(9): 744-751.

-Anwar, F. & Rashid,U.(2007), Physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seeds and seeds oil from a wild provenance of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), 1443–1453.

-Atakpama W., Kponor. G. E., Kanda M., Dourm M., Nare ARE M., Batawila K. et Akpagana K.,(2014), *Moringa oleifera lamarck (moringaceae):* une ressource phylogénétique à usage multiple. REV. CAMES -VOL. 02, 12 p.

-Ayrat C., (2009), *Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif*, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 166p.

B

-Bassompierre, C. (2007), Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers: de la conception d'un pilote à la validation de modèles (*Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG*).

-Benali, A., Madjene F., Chergui A. (2016), *Récupération des métaux lourds par Moringa oleifera et Photocatalyse Cuivre et Nickel*, Editions universitaires européennes, P 68.

-Benettayeb, A., Usman, M., Tinashe, C. C., Adam, T., &Haddou, B. (2022), *A critical review with emphasis on recent pieces of evidence of Moringa oleifera biosorption in water and waste water treatment*. Environmental Science and Pollution Research, 1-25.

-Berland JM, Boutin C, Cooper P. (2001), Procédés extensifs d'épuration des eaux usées. Office des publications de communauté européenne, Luxembourg.

-Bezerra CO, Cusioli LF, Quesada HB et al (2020), Évaluation de l'utilisation des enveloppes de graines de *Moringa oleifera* pour l'élimination du pesticide diuron de l'eau contaminée. *Environ Technol (Royaume-Uni)* 41:191–201.

-Bichi M.H., Agunwamba J.G., Muyibi S.H. et Abdulkarim M.I., (2013), Effect of Extraction Method on the Antimicrobial Activity of Moringa Oleifera Seeds Extract. *Journal of American Science*, 8(9): 450 -457.

-Boukandoul, S., Casal, S.&Zaidi,F.(2019), *Moringa oleifera* seed oil: Production, uses and health benefits. In:Hong,N.Kh.D.(Ed.),Seed oil: Production, uses and benefits. *Nova Science Publishers*, New York, 2018, 1–27.

-Boursali I. (2011). Etude expérimentale de la coagulation-floculation par le sulfate ferrique et le chlorure ferrique des matières en suspension. *Mémoire d'ingénieur d'états en géologie.* Université Abou Bakr Balkaid. Tlemcen, 54p.

C

-Caid A. (1984). Epuration biologique des eaux usées urbaines.

D

-Degremont, R. Malmaison, (1989), Mémento technique de l'eau, tome 1, Paris, Degremont, *Lyonnaise des eaux*, 592 pages.

-Degremont. (2005), Mémento technique de l'eau, 10ème édition, Ed, Lavoisier, Paris.

-Desjardins, R., (1997), Le traitement des eaux, 2ème édition, Ed. De l'école polytechnique de Montréal, 317 pages.

-Desta, W. M., &Bote, M. E. (2021), Waste water treatment using a natural coagulant (*Moringa oleifera seeds*): optimization through response surface methodology. *Heliyon*, 7(11), e08451.

-Dhakar, R. C, Maurya, S. D.; Pooniya, B. K.; Bairwa, N. et Gupta, M.(2011): *Moringa: The herbal gold to combat malnutrition, Chronicles of Young Scientists.*

F

-Fahey, JW. (2005), *Moringa oleifera: a review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties.* Part 1. *Trees for Life J.* 1: 5. /www.TFLJournal.org.

-Foidl N., Makkar H.P.S. et Becker K.,(2001). *Potentiel de développement des produits du Moringa. Dar es Salaam, Tanzanie*, 19p.

-Frah H, & Bouzad, H (2018) Evaluation de l'effet antibactérien et antiparasitaire des graines de *Moringa oleifera* dans le domaine de traitement des eaux usées. Mémoire de Magister. Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 115p.

G

-Gandji, K., Chadare, F., Idohou, R., Salako, V., Assogbadjo, A., & Kakai, R. G. (2018), Status and utilisation of *Moringa oleifera* Lam: A review. *African Crop Science Journal*, 26(1), 137-156.

-Gautam PK, Shivalkar S, Banerjee S (2020), Synthèse de nanoparticules magnétiques coiffées d'extrait de feuille de *M. oleifera* pour une élimination efficace du plomb [Pb (II)] de la solution : cinétique, isotherme et étude de réutilisation, *J Mol Liq* 305.

-Gifoni JM, Oliveira JTA, Oliveira HD, Batista AB, Pereira ML, Gomes AS, Batista OAB, Grangeiro TB, & Vasconcelos IM (2012), A novel chitin-binding protein from *Moringa oleifera* seed with potential for plant disease control, *Biopolymers* 98: 406– 415.

-Gopalakrishnan L., Kruthi D. et Devarai S. K.,(2016), *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Science and Human Wellness* 5: 49–56.

H

-Hédji, C.C., Diane N.S. Kpoguè G., Marcel R. Houinato et Emile D. Fi.,(2014), Valorisation de *Azolla spp*, *Moringa oleifera*, son de riz, et de coproduits de volaille et de poisson en alimentation animale: *synthèse bibliographique*. *Journal of Applied Biosciences* 81: 7277 – 7289.

-Hedj-Sadok, Z M. (1999), Modélisation et estimation dans les bioréacteurs ; prise en compte des incertitudes : application au traitement de l'eau. *Thèse : Faculté des sciences de l'ingénieur*, Université de Nice – Sophia Antipolis, France.

-Hernandez, L., (2006), Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable. *Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France.*

-Houndji B.V.S., Ouetchehou R., Londji S. B.M., Eamouzou K.S.S., Yehouenou B. et Ahohuendo C.B.,(2013), Caractérisations microbiologiques et physico-chimiques de la poudre de feuilles de *Moringa oleifera* (Lam.), un légume feuille traditionnel au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 7(1): 75-85.

I

-Islam A, Teo SH, Taufiq-Yap YH et al (2021), Étape vers l'élimination et le recyclage durables des colorants toxiques de la solution aqueuse - un examen complet. *Resour Conserv Recycl* 175:105849.

-Iwema A, Raby D, Lesavre J, Boutin C. (2005) Epuration des eaux usées domestiques par filières plantent de macrophytes : recommandations techniques pour le concept et la réalisation. *Groupe macrophytes et traitement des eaux, Agence de l'eau, France.*

J

-Jed, W., (2005), *Moringa oleifera: A review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties, Part 1, Trees for life journal.*

-Kaput C., (2015), *Moringa. With additional input from Hugh Locke and Timote Georges, respectively President and Executive Director of the Smallholder Farmers Alliance in Haiti,* 50 p.

K

-Katherine K. Stephenson et Fahey J. W., (2004), Development of Tissue Culture Methods for the Rescue and Propagation of Endangered *Moringa spp.* *Germplasm. Economic Botany*, Vol. 58, *Supplement* (Winter, 2004): 116-S124.

-Koller, E., (2009), *Traitement des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues.* Ed. Dunod, 2004,424 p.

-Kumar Biswas S., Chowdhury A., Das J., Roy A. et Zahid Hosen S.M., (2012), Pharmacological potentials of *Moringa oleifera lam.* *A Review. Ijpsr*, Vol. 3(2):305-310.

-KUNWAR, B., JAIN, V., & VERMA, S. (2022), *in vitro thrombolytic activity of Moringa oleifera.* *Nusantara Bioscience*, 14(1).

-Kwaambwa HM, Maikokera R (2008), Infrared and Circular Dichroism Spectroscopic Characterisation of Secondary Structure Components of a Water Treatment Coagulant Protein Extracted from *Moringa Oleifera* Seeds. *Colloids Surfaces B Biointerfaces* 64: 118–125.

L

-Lakshmidhevamma, T. N., Ugalat, J., Apoorva, K. A., Suresh, S. G., Doddamani, M., Kadam, S., Fakrudin, B. (2021), *Genetic Diversity of Moringa (Moringa Oleifera Lam.) The Moringa Genome*, 57p.

-Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., & Bertoli, S. (2015), Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of *Moringa oleifera* leaves: an overview. *International journal of molecular sciences*, 16(6), 12791-12835.

-Louni S., (2009), Extraction et caractérisation physicochimique de l'huile de graines de *Moringa oleifera*. *Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach*, 90 p.

M

-Madi O.P., Bourou S. et Noé 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.

-Maevalandy A.R., (2006), *Moringa oleifera*. Antanarivo (Madagascar), 16 p.

-Masschelein, W.J., (1999). Processus unitaires du traitement de l'eau potable, Editeur, Cebedoc.

-Metahri, M. S. (2012), Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes: cas de la STEP est de la ville de Tizi Ouzou (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

-Mimeche, L. (2014), Etude de faisabilité de l'installation de station d'épuration des rejets urbains par les filtres plantés en milieu aride-Application à la région de Biskra (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

-Moulin M, Mossou E, Signor L, Kieffer-Jaquinod S, Kwaambwa HM, Nermark F, Gutfreund P, Mitchell EP, Haertlein M, Forsyth VT, & Rennie AR (2019), Towards a molecular understanding of the water purification properties of *Moringa* seed proteins. *Journal of colloid and interface science* 554: 296-304.

-Muhl, Q.E., Du toit, E.S., Robbertse, P.J., (2011), Adaptability of *Moringa oleifera* Lam, (Horseradish) Tree seedlings to three temperature regimes, *American Journal of plant Sciences* 2: 776-780.

-Murati M., (2012), Etude d'élimination de trois herbicides : Atrazine, Sulcotrione et Méso-trione, en milieu aqueux par les procédés électrochimiques d'oxydation avancée. *Thèse de doctorat, Université Paris-Est*, 136 p.

O

-Osnick J., (2009), Etude du potentiel d'utilisation de résidus agricoles haïtiens pour le traitement par bio sorption d'effluents pollués. *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 171 p.

-OUALI, M. S. (2001), Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux. Edition,2,4334.

P

-Pavankumar AR, Kayathri R, Murugan NA, Zhang Q, Srivastava V, Okoli C, Bulone V, Rajarao GK, & Ågren H (2014), Dimerization of a flocculent protein from *Moringa oleifera*: experimental evidence and in silico interpretation. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics* 32 :406-415.

-Price, M. L. (2007), The *Moringa* tree. *ECHO technical note, 17391*, 1-19.

-Pronost J, Pronost R, Deplat L, Malrieu J, Berland. (2002), Stations d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation. Ministère de l'agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des affaires rurales (FNDAE n°22 bis), document technique, France.

R

-Rai, A., Amari, A., Yadav, V. K., Ismail, M. A., Elboughdiri, N., Fulekar, M. H., &Basnet, A. (2022), A Synergistic Effect of *Moringa oleifera*-Based Coagulant and Ultra filtration for the Waste water Treatment Collected from Final ETP. *Adsorption Science & Technology*.

-Reck IM, Baptista ATA, Paixão RM, Bergamasco R, Vieira MF, Vieira AMS (2020), Fractionnement des protéines de *Moringa oleifera* Lam. Graines et fonctionnalisation avec des particules magnétiques pour le traitement de la solution réactive de noir 5. *Can J Chem Eng* 97: 1–9.

-Rifi, S. K., Souabi, S., El Fels, L., Driouich, A., Nassri, I., Haddaji, C., &Hafidi, M. (2022), Optimization of coagulation process for treatment of olive oil mill wastewater using *Moringa oleifera* as a natural coagulant, CCD combined with RSM for treatment optimization. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 406-418.

-Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U., Stimm, B., (2009), *Moringa oleifera* Lam1785, Enzyklopädie der Holzgewächse, Handbuchund Atlas der Dendrologie.

-Rose, J.B., Farrah, S.R., Friedman, D., Riley, K., Hamann, C.L., Robbins, M.,(1999), Public evaluation of advanced water for potable application, *Water Science and Technology*, 40 (4-5) 247- 252.

S

-Sánchez-Machado, D. I., Núñez-Gastélum, J. A., Reyes-Moreno, C., Ramírez-Wong, B., & López-Cervantes, J (2010). Nutritional quality of edible parts of *Moringa oleifera*.*Food Analytical Methods*, 3(3), 175-180.

-Sané, N., Laffite, A., Serge, S., Malick, M., &Joh, P. (2022), Development of a Process For Domestic Waste water Treatment Using *Moringa oleifera* for Pathogens and Antibiotic Resistant Bacteria Inhibition under Tropical Conditions.

-Sauveur A.S et Broin M., (2006), *L'utilisation des feuilles de Moringa oleifera contre les carences alimentaires : un potentiel encore peu valorisé. Réseau Moringa news*, 211 rue du Fbg St Antoine, 75011 Paris, France, 8 p.

-Smahi, K., Makhloufi, A., Ouazani, L., Snini, H., Rouissat, L. D., Seddiki, N., &Harek, Y. (2020), *M. oleifera* Lam.). *The efficiency of urban waste water purification by a filtration system sand and seeds of Moringa.*

-Soliva, C., Kreuzer, M., Foidl, N., Foidl, G., Machmüller, A., & Hess, H.(2005), Feeding value of whole and extracted *Moringa oleifera* leaves for ruminants and their effects on luminal fermentation in vitro. *Animal feed science and technology*, 118(1-2), 47-62.

-Stone A., Massey A., Theobald M., Styslinger M., Kane D., Kandy D., Alex T., Abisola A.,Janeen M. et Elena D.,(2011), *Africa's Indigenous Crops. Innovations that Nourish the Planet*, 21p.

-Sujatha, B., & Patel, P. (2017), *Moringa Oleifera*–Nature's Gold. *Imperial J Interdisciplinary Res*, 3(5), 1175-1179.

-Sulaiman M., Andrawus Zhigila D., Kabiru M., Danladi M.U., Aliyu B., Fazilah A.M.,(2017), *Moringa oleifera* seed as alternative natural coagulant for potential application in water treatment: A review. *Journal of Advanced Review on Scientific Research* 30, Issue 1, 11 p.

T

-Teo SH, Ng CH, Islam A et al (2022) Élimination durable des colorants toxiques avec des matériaux avancés pour la production d'eau propre : un examen complet. *J Clean Prod* 332:130039.

-Tiaiba, M., Merzouk, B., & Mazour, M. (2021), Etude de l'applicabilité du procédé d'électrocoagulation pour le traitement de rejets textiles. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*

-Tong, C. Y., Yusuf, F. H. B. C., & Derek, C. J.C. (2022), *Optimization of Moringa oleifera seed extract and chitosan as natural coagulant in treatment of fish farm wastewater.*

-Triquet, T. (2021), Procédé hybride couplant adsorption et photo catalyse pour le traitement de l'eau : élimination de la ciprofloxacine par des fibres de charbon actif fonctionnalisées avec du TiO₂ (Doctoral dissertation).

V

-Valiron, F., (1989), *Gestion des eaux : alimentation en eau – assainissement*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris.

-Vilaseca M., López-Grimau V. et Gutiérrez-Bouzán C., (2014), Valorization of Waste Obtained from Oil Extraction in *Moringa Oleifera* Seeds: *Coagulation of Reactive Dyes in Textile Effluents*. *Materials*, 7: 6569-6584.

Résumé

Parmi les problèmes environnementaux, dont le monde souffre, est la pollution des eaux. Sa dépollution est devenue une obligation primordiale.

L'objectif global de notre travail est de réaliser l'état de l'art sur les dernières études réalisées à ce propos et de cerner les avancements qu'ont marqués les chercheurs avec le souhait de substituer les coagulants chimiques par des coagulants organique d'origine naturelle. Les travaux scientifiques consultés dans le cadre de cette contribution ont donné les principaux résultats énumérés ci-dessous :

Le sulfate d'aluminium coagulant, appliqué en association avec des graines de *M. oleifera*, permet d'améliorer le temps de sédimentation de l'ensemble du procédé, de sorte que 15 min suffisent. L'utilisation de graines de *M. oleifera* contribue à réduire jusqu'à 30 % la demande requise en sulfate d'aluminium, sans affecter l'efficacité du processus de coagulation/floculation et de sédimentation, en plus d'être une option environnementale intéressante de nos jours.

La poudre de graines de *Moringa* a une efficacité élevée d'élimination de la turbidité et de la couleur plutôt que de la DCO. La réduction maximale de la turbidité, de la couleur et de la DCO de *Moringa oleifera* dans les eaux usées acides était de 98 %, 90.76 % et 65.8 %, respectivement. Tandis que la réduction maximale de la turbidité, de la couleur et de la DCO dans les eaux usées basiques était de 99.5 %, 97.7 % et 65.82 %, respectivement.

Abstract

Among the environmental problems, from which the world suffers, is water pollution. Its n depollution has become a primary obligation.

The overall objective of our work is to carry out the state of the art on the latest studies carried out on this subject and to identify the advances that researchers have marked with the desire to replace chemical coagulants by organic coagulants of natural origin. The scientific works consulted for this contribution have given the main results listed below :

Coagulant aluminum sulfate, applied in combination with *M. oleifera* seeds, improves the sedimentation time of the whole process, so that 15 min insufficient. The use of *M. oleifera* seeds contributes to reduce the required demand of aluminum sulfate by up to 30%, without affecting the efficiency of the coagulation/flocculation and sedimentation process, and is an interesting environmental option nowadays.

Moringa seed powder has a high turbidity and color removal efficiency rather than COD. The maximum turbidity, color and COD reduction of *Moringa oleifera* in acidic waste water was 98%, 90.76% and 65.8%, respectively. While the maximum reduction of turbidity, color and COD in basic waste water was 99.5%, 97.7% and 65.82%, respectively.

الملخص

من بين المشاكل البيئية التي يعاني منها العالم تلوث المياه. أصبح إزالة التلوث التزاماً أساسياً.

الهدف العام من عملنا هو إجراء أحدث الدراسات التي أجريت حول هذا الموضوع وتحديد التطورات التي لاحظها الباحثون برغبة في استبدال المخثرات الكيميائية بمخثرات عضوية ذات أصل طبيعي. أعطت الأعمال العلمية التي تم الرجوع إليها لهذه المساهمة النتائج الرئيسية المذكورة أدناه:

تعمل كبريتات الألومنيوم المخثرة ، التي يتم وضعها مع بذور المورينجا أوليفيرا على تحسين وقت الترسيب للعملية بأكملها ، بحيث 15 دقيقة كاف. يساهم استخدام بذور المورينجا أوليفيرا تقليل الطلب المطلوب من كبريتات الألومنيوم بنسبة تصل إلى 30٪ ، دون التأثير على كفاءة عملية التخثر / التلبد والترسيب ، وهو خيار بيئي مثير للاهتمام في الوقت الحاضر.

واللون التعكر لخفض الأقصى الحد كان الكيميائي الأكسجين على الطلب من بدلاً اللون وإزالة التعكر في عالية كفاءة له المورينجا بذور مسحوق للعكارة الأقصى الحد كان بينما .التوالي على 65.8 % و 90.76 % و 98 % الحمضية الصرف مياه في .الكيميائي الأكسجين على والطلب التوالي على 65.82% و 97.7% و 99.5% الأساسية الصحي الصرف مياه في والأسجين واللون

