



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

UNIVERSITY MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

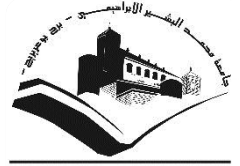
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

UNIVERSITY MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

Intitulé

**Utilisation des bio-coagulants en traitement
des eaux usées textiles**

Présenté par : Ghanem Hadjer
Sai Ilham

Soutenu le : 30/09/2020

Devant le jury :

Président : M. Amara Korba Raouf

MCB (Université de Bordj Bou-Arréridj)

Encadrant: M. Benyoucef Nabil

MCB (Université de Bordj Bou-Arréridj)

Examineur : M^{me} Fellah Fahima

MCB (université de Bordj Bou-Arréridj)

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Avant tout propos, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir données le courage et la volonté pour pouvoir élaborer ce travail et le présenter.

Nous tenons à remercier Monsieur Amara Korba Raouf, Maître de Conférences, pour le grand honneur qu'il nous fait d'avoir accepté de présider cette soutenance de mémoire.

Nous somme reconnaissantes à notre encadreur Mr Benyoucef Nabil qui nous a aidées à progresser dans notre recherche grâce à ses conseils, son esprit et son soutien tout au long de cette recherche.

Nous tenons à remercier Madame Fellah Fahima, Maître de conférences, qui a aussi accepté de faire partie de jury en tant qu'examineur.

Nous tenons à remercier vivement tous les enseignants de l'université qui nous ont aidées à l'accumulation des connaissances nécessaires durant les cursus universitaires.

Enfin, grand merci à toute ma famille, à mes parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi et

**L'éducation que j'ai
Reçu de leur part**



DÉDICACES

Grâce à Dieu tout puissant, je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire plus particulièrement :

A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

A l'esprit de ma grand-mère et toutes les familles : Sai et Ghanem mes frères, mes soeurs pour les efforts et attachement qu'ils m'ont fourni pour me supporter.

Je le dédie aussi à toute la promotion de Biodiversité et Environnement

A tous mes amis qui m'ont aidée dans mon travail.

A toutes les personnes que je porte dans mon Cœur.

A tous ceux qui m'ont aidée de près ou loin.

A tous mes enseignants qui nous donnent le maximum durant nos études.

A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire

A tous ceux que j'aime.

HADJER, ILHAM

الملخص

الهدف من هذا العمل هو إظهار مكانة المخثرات الطبيعية في معالجة المياه بشكل عام ومياه الصرف الصحي النسيجية بشكل خاص. وقد أظهرت المخثرات الطبيعية فعاليتها كما أشارا ليه عدد كبير من الأبحاث. وانه من الضروري زيادة إمكانية استخدام المتخثرات الطبيعية لتحسين قدرتها. ولقد تم تحديد العديد من أنواع كثيرة من المخثرات النباتية الطبيعية المصنفة على انها نفايات الفاكهة وغيرها من النفايات وتقديمها بشكل جماعي مع ملخص أبحاثها في هذا الموجز. كما نوقشت أيضا إيجابيات وسلبيات هذا النوع من المخثرات.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه؛ التخثر؛ المخثرات الطبيعية؛ المياه المستعملة النسيجية.

Abstract

The aim of this work was to show the place of biocoagulants in water treatment in general and textile Wastewater in particular. Natural coagulants has shown their effectiveness as indicated by a significant amount of research. Indeed, it was necessary to increase the potential for the use of natural coagulants to improve their capacity. Many types of natural plant-based coagulant classified as fruit waste and others are identified and presented collectively with their research summary in this review. The benefits and inconvenients of this type of coagulant are also discussed.

Key words: Water treatment; Coagulation-Flocculation; Bio-coagulants; Textile wastewater.

Résumé

Ce travail avait pour objectif de montré la place des biocoagulants dans le traitement des eaux en général et les eaux usées textile en particulier. Les coagulants naturels ont montré leurs efficacités comme l'indique un nombre important de recherches. En effet, Il est nécessaire de procéder à un examen approfondi pour augmenter le potentiel d'utilisation des coagulants naturels en mettant en évidence le développement actuel et les efforts visant à améliorer la capacité des biocoagulants. De nombreux types de coagulants naturels à base de plantes classés comme déchets de fruits et d'autres sont identifiés et présentés collectivement avec leur résumé de recherche dans cette mémoire. Les avantages et les inconvénients de ce type de coagulants sont également discutés.

Mots clés : Traitement des eaux ; Coagulation-Flocculation ; Bio-coagulants ; Eaux usées textiles.

Table des matières

Introduction.....	1
I.1 EAUX RESIDUAIRES INDUSTRIELLES.....	2
I.1.1 Présentation de l'industrie textile.....	2
I.1.2 Activités de l'industrie textile.....	2
I.1.2.1 Activité mécanique.....	2
I.1.2.2 Finition textile (ou ennoblissement).....	2
I.1.3 Rejets de l'industrie textile.....	3
I.1.4 Colorants.....	3
I.1.4.1 Définition.....	3
I.1.4.2 Utilisation des colorants.....	4
I.1.4.3 Classification des colorants.....	4
I.1.4.3.1 Classification chimique.....	4
I.1.4.3.1.1 Colorants azoïques.....	4
I.1.4.3.1.2 Colorants triphénylméthanes.....	5
I.1.4.3.1.3 Colorants indigoïdes.....	5
I.1.4.3.1.4 Colorants xanthènes.....	6
I.1.4.3.1.5 Colorants anthraquinoniques.....	6
I.1.4.3.1.6 Phtalocyanines.....	6
I.1.4.3.1.7 Colorants nitrés et nitrosés.....	7
II. THEORIE DE LA COAGULATION-FLOCCULATION.....	8
II.1 INTRODUCTION.....	8
II.2 PARTICULES EN SUSPENSION.....	8
II.3 PARTICULES COLLOÏDALES.....	9
II.3.1 Types des colloïdes.....	9
II.3.1.1 Colloïdes hydrophiles.....	9
II.3.1.2 Colloïdes hydrophobes.....	10
II.4 NATURE ET LA CHARGE DES SUBSTANCES COLLOÏDALES.....	10
II.5 STABILITE DES PARTICULES.....	10
II.5.1 Potentiel Zêta.....	11
II.5.2 Coagulation-floculation.....	12
II.5.2.1 Rôle de la coagulation-floculation.....	12
II.5.2.2 Coagulation.....	13
II.5.2.2.1 Principe.....	13
II.5.2.2.2 Mécanismes de coagulation.....	13
II.5.2.2.2.1 Compression de la double couche.....	13
II.5.2.2.2.2 Adsorption et neutralisation des charges.....	14
II.5.2.2.2.3 Emprisonnement des particules dans un précipité.....	15
II.5.2.2.2.4 Adsorption et pontage entre les particules.....	15
II.5.2.2.3 Coagulants et les floculants chimiques.....	16
II.5.2.2.4 Dimensionnement d'une coagulation-floculation.....	17
II.5.2.2.5 Facteurs affectant la coagulation.....	17
II.5.2.2.5.1 Influence du pH.....	17
II.5.2.2.5.2 Influence de la minéralisation.....	18
II.5.2.2.5.3 Influence de la température de l'eau.....	18
II.5.2.2.5.4 Influence du coagulant.....	18
II.5.2.2.5.5 Influence de l'agitation.....	19
II.5.2.2.5.6 Influence de la turbidité.....	19
II.5.2.2.5.7 Influence de la couleur.....	19
II.5.2.3 Floculation.....	20
II.5.2.3.1 Principe.....	20
II.5.2.3.2 Types de floculation :.....	20
II.5.2.3.2.1 Floculation physique.....	20
II.5.2.3.2.1.1 Floculation péricinétique.....	21

II.5.2.3.2.1.2 Flocculation orthocinéque	21
II.5.2.3.2.2 Flocculation chimique	21
II.6 MISE EN ŒUVRE DE LA COAGULATION-FLOCCULATION	22
II.7 CONCLUSION	23
III.1. INTRODUCTION	24
III.2. CHITOSANE	24
III.2.1. Mécanismes de la coagulation-flocculation avec le chitosane	25
III.3. COAGULATIONS NATURELLES A BASE D'EXTRAITS DES PLANTES	26
III.3.1. Graines de <i>Moringa oleifera</i> (bâton de tambour)	26
III.3.2. Protéines des graines de <i>Cocos</i>	27
III.3.3. <i>Ocimum basilicum</i>	27
III.3.4. Protéines des graines de <i>Phaseolus. Vulgaris</i>	27
III.3.5. Graines de mangue (<i>Magnifera indica</i>)	28
III.3.6. Okra (<i>Abelmoschus esculentus</i>)	28
III.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES COAGULANTS NATURELS	29
III.4.1. Avantages	29
III.4.2. Inconvénients	30
CONCLUSION.	31

Liste des figures

• Figure 1 : Formule chimique des colorants azoïques.....	05
• Figure 2 : Formule chimique de triphénylméthane.....	05
• Figure 3 : Formule chimique des colorants indigoïdes.....	06
• Figure 4 : Formule chimique des colorant xanthènes.....	06
• Figure 5 : Formule chimique des colorants anthraquinoniques.....	06
• Figure 6 : Formule chimique des phtalocyanines.....	07
• Figure 7 : Formule chimique des colorants nitrés et nitrosés.....	07
• Figure 8 : Processus de coagulation-floculation.....	08
• Figure 9 : Représentation schématique de la double couche d'une particule colloïdale.....	11
• Figure 10 : Représentation schématique de la compression de la couche diffuse.....	14
• Figure 11 : Représentation schématique de neutralisation des charges.....	14
• Figure 12 : Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation.....	15
• Figure 13 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères.....	16
• Figure 14 : Jar test Flocculateurs.....	17
• Figure 15 : Structure chimique de la chitine et de la chitosane.....	25
• Figure 16 : Procédé de coagulation-floculation au chitosane.....	26

Liste des tableaux

- **Tableau 1** : Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante..... **04**
- **Tableau 2** : Dérivés des sels d'aluminium et de fer..... **16**
- **Tableau 3** : Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium..... **18**

Liste des abréviations

- **MES:** Matières en suspension
- **MVS :** Matières volatiles en suspension
- **DBO :** Demande biologique en oxygène
- **DBO₅ :** Demande biologique en oxygène à cinq jours d'incubation
- **DCO :** Demande chimique en oxygène
- **NTU :** Néphélomètre Turbidity Unit



Introduction Générale

Les eaux de rejets textiles se caractérisent généralement par un niveau élevé de coloration due à la présence de colorants résiduels qui ne se sont pas fixés aux fibres durant le procédé de teinture. En effet, lorsqu'on réalise un processus de teinture en industrie, une proportion importante de colorants, souvent utilisés en excès pour améliorer la teinture, est rejetée dans les cours d'eau. Etant difficilement dégradables ; ils risquent de s'accumuler dans l'environnement où ils constituent une toxicité non négligeable vis-à-vis des organismes vivants, d'où la nécessité de mettre au point des procédés de dépollution spécifiques afin de protéger les ressources en eau (**Tsai et al., 2007**).

Parmi les procédés de traitement des eaux : la coagulation floculation qui fait appel à des agents de coagulation et de floculation généralement d'origine synthétiques. Ces produits ont des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement. Cependant, faire appel à des produits alternatifs devient une nécessité cruciale.

Compte tenu de tous ces faits, le remplacement des coagulants / flocculants chimiques de synthèse par des produits naturels efficaces et inoffensifs doit être considéré comme un besoin urgent. C'est dans ce contexte que plusieurs produits naturels issus de graines, de fruits et de feuilles comme les graines de Tilleul (**Seghosime et al., 2017**), les gousses de graines de tamarin (**Buenaño et al., 2019**), les feuilles de gland (**Benalia et al., 2019**), les coussinets de cactus (**Kumar et Murunganadami, 2017**), les écorces de fruits de banane (**Zaidi, 2019**) et le haricot jacinthe (**Shilpa et al., 2012**), ont suscité un grand intérêt en tant qu'alternatives prometteuses de coagulant / flocculant aux réactifs synthétiques en raison de leur sécurité, abondance et le rapport coût-efficacité.

Le présent mémoire est une revue bibliographique traitant la diversité des coagulants naturels, ainsi que leurs avantages et inconvénients.



Chapitre I : Eaux usées textiles

I.1 Eaux résiduaires industrielles

Les eaux résiduaires industrielles sont celles en provenance des diverses usines, qui sont des déchets liquides obtenues lors de l'extraction et de la transformation de la matière premières en produits industriels. Elles contiennent les substances plus diverses, pouvant être acides ou alcalines, corrosives ou entartrantes, à températures très élevées, souvent odorantes et colorées (**Alem, 2016**).

I.1.1 Présentation de l'industrie textile

L'industrie textile rassemble de très nombreux métiers tout au long d'une chaîne de transformations partant de matières premières fibreuses jusqu'à des produits semi-ouvrés ou entièrement manufacturés. La première étape consiste en la transformation de matières premières issues de fibres naturelles, artificielles ou synthétiques en fils. Les métiers associés sont la filature, le guipage le moulinage ou encore la texturation. A partir des fils unidimensionnels, les techniques de tissage et de tricotage permettent d'obtenir des surfaces textiles bidimensionnelles (voire tridimensionnelles). Ces surfaces sont alors très souvent ennoblies pour leur donner de la couleur (teinture, impression) ou des propriétés particulières (apprêts chimiques, apprêts mécaniques, enduction, contre-collage, etc. (**Salmi et Slimani, 2014**).

I.1.2 Activités de l'industrie textile

L'industrie textile comprend essentiellement deux types d'activité : activité mécanique et activité d'ennoblissement.

I.1.2.1 Activité mécanique

Elle regroupe les opérations de filature et de tissage. Ces opérations peuvent être définies comme suit :

- **Filature** : on désigne sous le nom de filature, l'ensemble des opérations industrielles qui transforment la matière textile en fil.
- **Tissage** : c'est l'opération qui consiste à entrecroiser les fibres perpendiculairement les unes aux autres pour en former des tissus.

I.1.2.2 Finition textile (ou ennoblissement)

Elle regroupe les opérations de blanchiment, de teinture, d'impression et d'apprêts

- **Blanchiment** : c'est une opération ou un ensemble d'opérations industrielles qui ont pour but de décolorer les fibres textiles.
- **Teinture** : elle est destinée à donner à une fibre, un fil ou un tissu dans toute sa longueur et dans toute son épaisseur, une teinte uniforme, différente de sa teinte habituelle. Elle s'obtient en fixant un colorant sur la fibre d'une manière durable
- **Impression** : a pour but d'obtenir des dessins blancs ou colorés à la surface des tissus

- **Apprêts** : on donne le nom d'apprêts aux divers traitements mécaniques ou chimiques que l'on fait subir aux fils et aux tissus avant ou après les opérations de blanchiment, teinture et impression (**Abbas et Messaad, 2017**).

I.1.3 Rejets de l'industrie textile

Les eaux usées industrielles issues de la fabrication des textiles sont généralement alcalines et ont des charges en DBO et DCO très élevées. Les polluants présents dans les effluents de l'industrie textile englobent des solides en suspension, des huiles minérales (des agents anti-moussants de la graisse, des huiles d'ensimage) et des composés organiques. Ainsi les flots d'effluents produits par les processus de teinture sont généralement chauds, colorés et peuvent renfermer des concentrations importantes de métaux lourds et des produits toxiques (**Alem, 2016**).

I.1.4 Colorants

De tout temps, l'homme a utilisé les colorants pour ses vêtements, pour sa nourriture et pour la décoration de son habitation. Ainsi, dès l'antiquité, il a su extraire les matières colorantes à partir de végétaux comme l'indigo et d'animaux comme le carmin extrait de la cochenille. Ceci a permis le développement du commerce entre les différentes peuplades de l'époque. L'utilisation de ces colorants naturels s'est prolongée jusqu'à la première moitié du XIX^{ème} siècle. Ils furent ensuite progressivement remplacés par des colorants synthétiques lesquels sont mieux adaptés à de nombreux usages particuliers. On sait que la couleur résulte d'une part, de l'interaction entre le rayonnement du spectre visible et de la matière et d'autre part, elle est le complément de la radiation absorbée (c'est-à-dire que la couleur observée résulte de la superposition des radiations non absorbées). Ceci se traduit par des transitions électroniques des orbitales moléculaires de l'état fondamental vers celles de l'état excité (**Ali ouche, 2007**).

I.1.4.1 Définition

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre une substance d'une manière durable. Il possède des groupements qui lui confèrent la couleur : appelés chromophores et des groupements qui permettent sa fixation auxochromes (Tableau I.1) (**Lamri, 2010**).

Les colorants sont des composés non dégradables par les micro-organismes, ces rejets toxiques et nocifs pour les eaux superficielles et de profondeur, présentent un danger certain pour l'homme et l'animal. Les colorants synthétiques ont presque complètement supplanté les colorants naturels. Les colorants azoïques constituent la famille la plus importante sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes (**Anouar et al., 2014**).

Tableau 1 : Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante (Hammami, 2008).

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyle (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyle (-C=C-)	Hydroxyle (-HO)
Sulfure (>C=S)	Alkoxy (-OR)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Groupements donneurs d'électrons

I.1.4.2 Utilisation des colorants

L'industrie des colorants constitue un marché économique considérable car de nombreux produits industriels peuvent être colorés, principalement :

- Pigments (industrie des matières plastiques)
- Encre, papier (imprimerie)
- Colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire)
- Pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques
- Colorants capillaires (industrie des cosmétiques)
- Colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique)
- Carburants et huiles (industrie automobile etc...)
- Colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport, colorants textiles à usage médical etc. (Salmi et Slimani, 2014).

I.1.4.3 Classification des colorants

Les colorants textiles peuvent être classés selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'application aux différents substrats (textiles, papier, cuir, matières plastiques, etc.) (Guitouni, 2017).

I.1.4.3.1 Classification chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore (Benamraoui, 2014).

I.1.4.3.1.1 Colorants azoïques

La spécificité des colorants azoïques est caractérisée par l'unissant de deux noyaux benzéniques (figure I.1) formants un groupement fonctionnel Azo (-N=N-) (Guitouni, 2017).

Les colorants azoïques se répartissent en plusieurs catégories : les colorants basiques, et acides. Ces composés organiques cancérigènes sont réfractaires aux procédés de traitements habituellement mis en œuvre et sont très résistants à la biodégradation (Lamri, 2010).

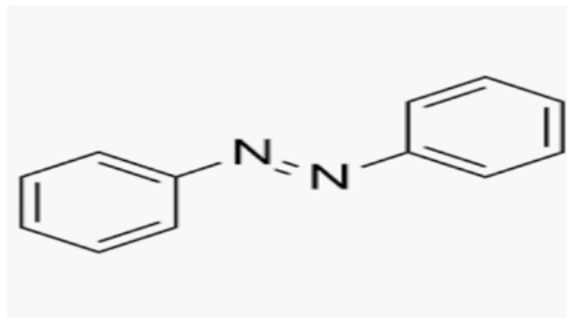


Figure 1 : Formule chimique des colorants azoïques

I.1.4.3.1.2 Colorants triphénylméthanés

Les colorants triphénylméthanés dérivent du triphénylméthane, qui est un hydrocarbure possédant trois cycles phényle liés à un carbone central (Figure I.2)

Les triphénylméthanés sont utilisés intensivement dans les industries papetières et textiles pour teindre le nylon, la laine, la soie et le coton. Leur utilisation ne se limite pas à l'industrie. On les retrouve également dans le domaine médical comme marqueur biologique et comme agent antifongique chez les poissons et la volaille (Lamri, 2010).

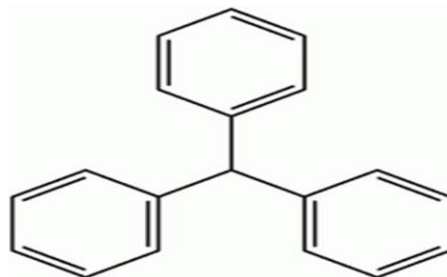


Figure 2 : Formule chimique de triphénylméthanés

I.1.4.3.1.3 Colorants indigoïdes

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues sélénisés, soufrés et oxygénés du bleu indigo provoquent d'importants effets hypochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise. Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorant en textile, comme additifs en produits pharmaceutiques, la confiserie, ainsi que dans des diagnostics médicales (Lamri, 2010). La figure I.3 présente la formule générale des colorants indigoïdes.

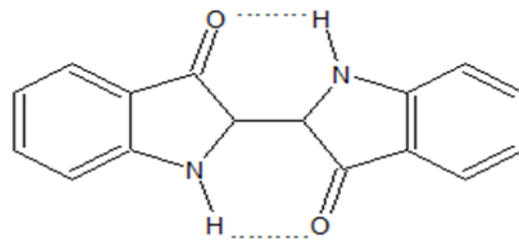


Figure 3 : Formule chimique des colorants indigoïdes

I.1.4.3.1.4 Colorants xanthènes

Les colorants xanthènes sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Ils sont dotés d'une intense fluorescence, leur propriété de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie. Ils sont aussi utilisés comme colorant en alimentaire, cosmétique, textile et impression (Lamri, 2010).

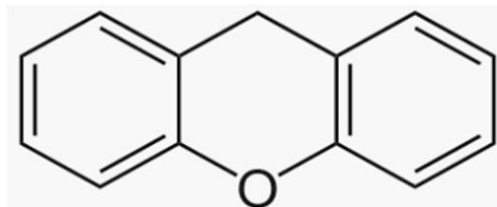


Figure 4 : Formule chimique des colorant xanthènes

I.1.4.3.1.5 Colorants anthraquinoniques

Leur formule générale dérivée de l'antracène (figure I.5), montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino. Ces produits sont utilisés pour la coloration des fibres polyester, acétate et triacétate de Cellulose.

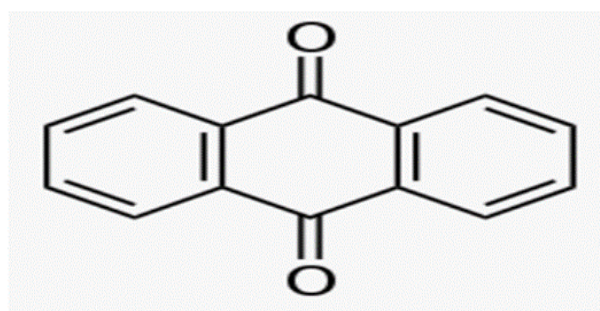


Figure 5 : Formule chimique des colorants anthraquinoniques

I.1.4.3.1.6 Phtalocyanines

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.).

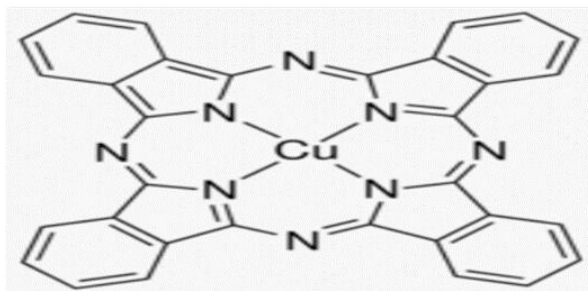


Figure 6 : Formule chimique des phtalocyanines

I.1.4.3.1.7 Colorants nitrés et nitrosés

Les colorants nitrés et nitrosés forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (NO_2) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés).

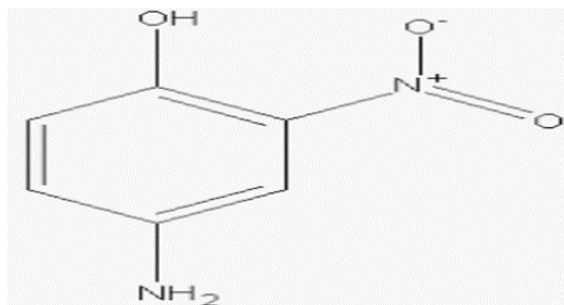


Figure 7 : Formule chimique des colorants nitrés et nitrosés



*Chapitre II :
Théorie de la
coagulation-Floculation*

II. Théorie de la Coagulation-Floculation

II.1 Introduction

La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont dues à la présence de particules de très faible diamètre : les colloïdes. Leur élimination ne peut se baser sur la simple décantation. En effet, leur vitesse de sédimentation est extrêmement faible. Le temps nécessaire pour parcourir 1m en chute libre peut être de plusieurs années. La coagulation et la floculation sont les processus qui permettent l'élimination des colloïdes. La coagulation consiste à les déstabiliser, il s'agit de neutraliser leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre. La floculation rend compte de leur agglomération en agrégats éliminés par décantation et/ou filtration (Cardot, 2005).

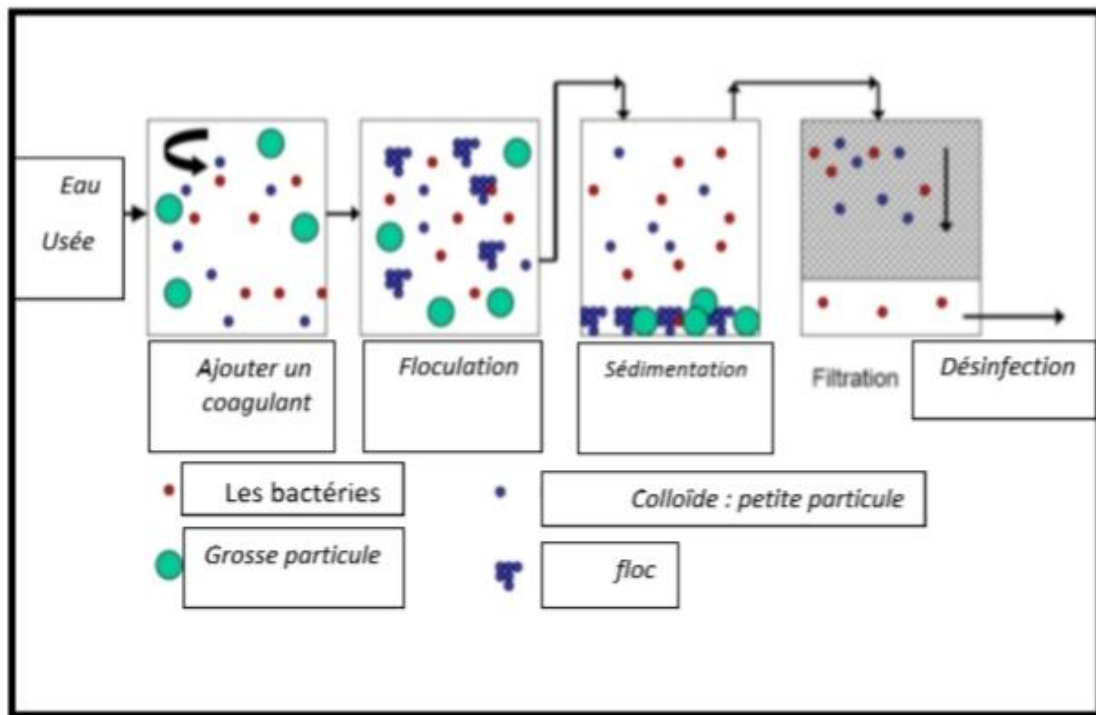


Figure 8 : Processus de coagulation floculation

II.2 Particules en suspension

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

- Les matières en suspension qui regroupe les plus grosses particules, ces matières sont d'origine minérale ou organique. Leur temps requis pour

décanter d'un mètre varie de quelques dixièmes de secondes à plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité (**Ezziane, 2007**).

- Les matières colloïdales sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1micron, leur vitesse de décantation est pratiquement nulle. Les matières colloïdes d'origine minérale ont une densité relative de l'ordre 2,65 alors que celles d'origine organique ont une densité peuvent nécessiter jusqu'à 66600 années pour décanter d'un mètre (**Ezziane, 2007**).
- Les matières dissoutes sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre. La difficulté de sédimentation des particules colloïdales est essentiellement due d'une part, à la faible taille de la particule, à leur densité proche de l'eau et d'autre part, aux charges électriques réparties à leur surface qui leur confère une grande stabilité (**Ezziane, 2007**).

II.3 Particules colloïdales

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes de temps, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation (**Boursali, 2011**).

II.3.1 Types des colloïdes

Les particules colloïdes sont classées en deux catégories suivant leur comportement vis-à-vis de l'eau. Il s'agit des particules hydrophobes et hydrophiles (**Ezziane, 2007**).

II.3.1.1 Colloïdes hydrophiles

Les hydrophiles sont des micromolécules complexes à nombre élevé d'atomes, et qui englobent la plupart des corps de la chimie organique. Les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourées de molécules d'eau qui préviennent tout contact ultérieur entre ces particules. Les colloïdes hydrophiles sont plus difficiles à déstabiliser que les solutions hydrophobes. En effet, il faut agir d'abord sur les molécules d'eau qui les entourent pour permettre leur agglomération (**Ezziane, 2007**).

II.3.1.2 Colloïdes hydrophobes

Les hydrophobes sont des micelles ou agrégats de molécules simples, dissoutes et qui comprennent la plupart des corps de la chimie minérale. Les particules hydrophobes ne sont pas entourées de molécules d'eau, leur dispersion dans l'eau n'étant pas spontanée. On doit la faciliter à l'aide de moyens chimiques ou physique. Ce sont en général des particules minérales telles que la silice et les argiles (**Ezziane, 2007**).

On doit la faciliter à l'aide de moyens chimiques ou physique. Ce sont en général des particules minérales telles que la silice et les argiles (**Boursali, 2011**).

II.4 Nature et la charge des substances colloïdales

Les études réalisées sur la coagulation-floculation de suspensions colloïdales affirment qu'il existe une relation stœchiométrique entre la charge des substances colloïdales et le taux de sulfate d'aluminium ajouté. Dans le cas de la coagulation par adsorption-déstabilisation, on a observé une relation stœchiométrique entre la surface spécifique et la dose du coagulant (**Chabni, 2005**).

La structure minéralogique et les propriétés surfaciques des particules affectent la dose du coagulant (**Chabni, 2005**). Dans le cas de la déstabilisation par neutralisation de charge **Bordet (2007)** rapporte que la dose du coagulant est liée à :

- ☒ La solubilité de l'hydrolyse de l'aluminium
- ☒ La densité de charge des particules primaires
- ☒ La surface spécifique des particules primaires

II.5 Stabilité des particules

Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique qui est généralement négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former des agrégats plus gros et donc plus facile à éliminer, elles demeurent donc stables. Les ions positifs présents dans l'eau neutralisent la charge à la surface de la particule et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent ce phénomène (**Lakhdari, 2011**).

- La théorie d'Helmholtz : une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche fixée).
- La théorie de Gouy-Chapman : la couche d'ions positifs est inégalement autour du colloïde, la neutralité est obtenue à une plus grande distance (couche diffuse) (**Lakhdari, 2011**).

- La théorie de Stern : est un compromis des deux précédentes. Elle considère la formation de la double couche. La première adhère à la particule et le potentiel décroît rapidement. La seconde est plus diffuse et potentiel décroît plus lentement (**Deltalab, 2012**).

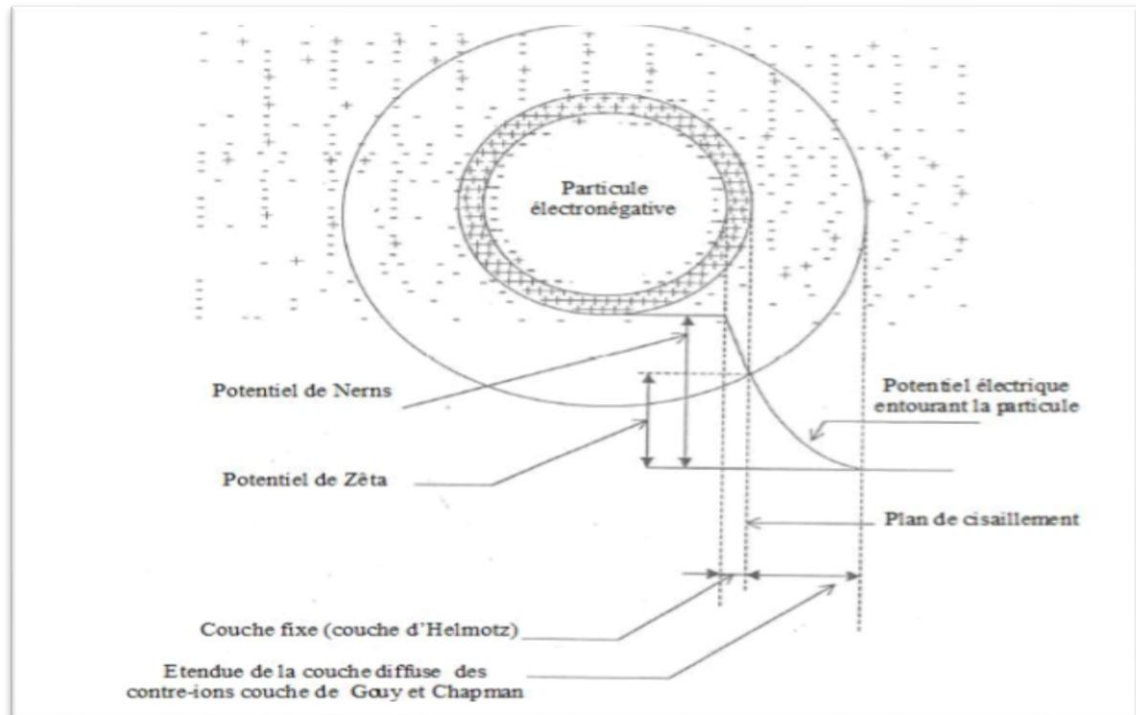


Figure 9 : Représentation schématique de la double couche d'une particule colloïdale (**Ezziane, 2007**)

II.5.1 Potentiel Zêta

Le potentiel électrostatique diminue à mesure où l'on s'éloigne de la particule. Le potentiel Zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules ayant un potentiel Zêta négatif se déplacent en direction de l'électrode positive. Le potentiel Zêta est important car il définit le comportement électrocinétique des particules et par voie de conséquence leur stabilité dans la solution, l'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations (**Siangsanun, 2010**).

On a le potentiel Zeta(Z) :

$$Z = \frac{K \cdot \mu}{\epsilon} \cdot me$$

me : Mobilité électrophorétique ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$)

ϵ : Constante diélectrique du milieu

μ : Viscosité dynamique ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

K : fonction du diamètre de la particule et de l'épaisseur de la double couche

On mesure ce potentiel par le Zettamètre (**Degrement, 2005**).

II.5.2 Coagulation-floculation

Le mot coagulation vient du latin coagulare qui signifie « agglomérer » (**Hernandez de León, 2006**), c'est une opération qui permet de débarrasser les eaux usées des impuretés qu'elles contiennent grâce à la réaction d'émulsion. La coagulation a donc pour but principal de déstabiliser les fines particules en suspension pour ainsi faciliter leur agglomération (**Desjardins, 1997**).

Généralement caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques, ce procédé permet d'augmenter substantiellement l'efficacité des traitements secondaires. La floculation a pour but de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées (**Hernandez de León, 2006**).

II.5.2.1 Rôle de la coagulation-floculation

Les procédés de coagulation et de floculation facilitent l'élimination de MES et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation et/ou filtration.

Ils constituent les traitements de base appliqués pour corriger tout ou partie des défauts de l'eau liés aux fractions particulaires inertes (limons, argiles, colloïdes) ou vivantes (microalgues planctoniques ; micro-invertébrés en particulier les kystes des protozoaires parasites : amibes, Giardia Cryptospridium... ; bactéries).

Ils assurent aussi l'élimination de la fraction « floculable » des matières organiques (macromolécules, en particulier la plupart des acides humiques responsables de la couleur), de certains métaux lourds, plus généralement de la fraction des

micropolluants associée à ces MES et macromolécules colloïdales dont les virus, pratiquement toujours portés par les MES et colloïdes de l'eau (**Ymottot, 2000**).

II.5.2.2 Coagulation

II.5.2.2.1 Principe

Les particules colloïdales en solution sont naturellement chargées négativement. Ainsi, elles tendent à se repousser mutuellement et restent en suspension. On dit qu'il y a stabilisation des particules dans la solution. La coagulation consiste dans la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. On utilise, pour ce faire des réactifs chimiques nommés coagulants (**Hernandez de León, 2006**).

L'adjonction du coagulant produit dans un premier temps un ensemble de réactions complexes d'hydrolyse, d'ionisation et également de polymérisation et dans un second temps, une déstabilisation des colloïdes par un ensemble de mécanismes complexes (**Brahmi et al., 2010**). Le procédé nécessite une agitation importante (**Hernandez de León, 2006**).

II.5.2.2.2 Mécanismes de coagulation

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

- ❖ La compression de la double couche.
- ❖ L'adsorption et neutralisation des charges.
- ❖ L'emprisonnement des particules dans un précipité.
- ❖ L'adsorption et pontage entre les particules (**Boursali, 2011**).

II.5.2.2.2.1 Compression de la double couche

La compression de la double couche diminue la barrière énergétique ; ainsi, les colloïdes peuvent se rapprocher (**Gheraout et al., 2017**). Ceci est atteint par l'injection d'électrolyte indifférents dans l'eau (**Gheraout et al., 2018**). La règle de Schultz-Hardy montre que l'impact des électrolytes indifférents augmente avec la valence des ions d'une sixième puissance exponentielle (**Al arni et al., 2019**).

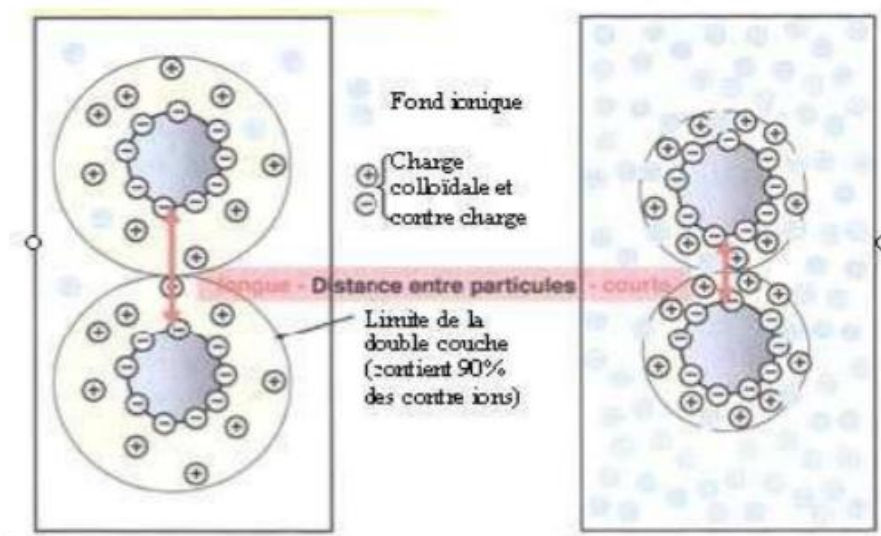


Figure 10 : Représentation schématique de la compression de la couche diffuse (Ezziane, 2007).

II.5.2.2.2 Adsorption et neutralisation des charges

Ce mécanisme repose sur l'ajout suffisant de cations afin de neutraliser la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface. Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut résulter en une adsorption trop importante de cations et inverser la charge des particules qui devient alors positive. Les particules seraient ainsi restabilisées (Boursali, 2011).

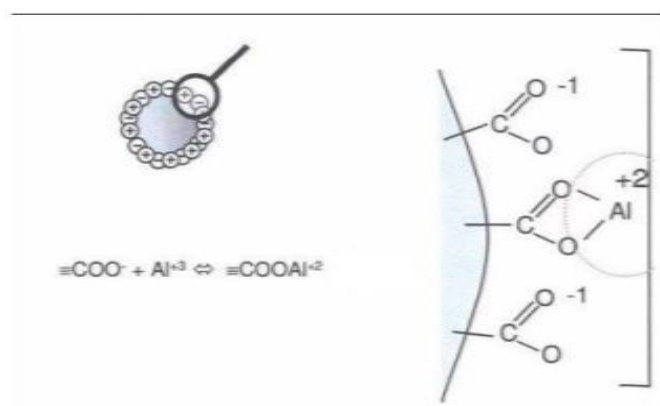


Figure II.11 : Représentation schématique de neutralisation des charges (Ezziane, 2007)

II.5.2.2.3 Emprisonnement des particules dans un précipité

Pour déstabiliser les particules colloïdes. On peut en outre les emprisonner dans une particule de floc. Lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des coagulant, habituellement des sels de métaux trivalents ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)$ ou FeCl_3), on obtient un précipité appelé floc. Lorsque le pH de l'eau est situé dans plage acide ou neutre, le floc constitué de molécules de $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou le $\text{Fe}(\text{OH})_3$, possède habituellement une charge positive et la présence de certains anions et de particules colloïdes accélère la formation du précipité. Les particules colloïdes jouent le rôle de noyaux lors de la formation du floc, les polymères possèdent fils et fibres qui lient les particules en agglomérats grands et compacts (Ghernaout et al., 2019). Polymères plus poids moléculaire sont souvent plus efficaces, grâce à leurs longues chaînes (Ghernaout et al., 2019).

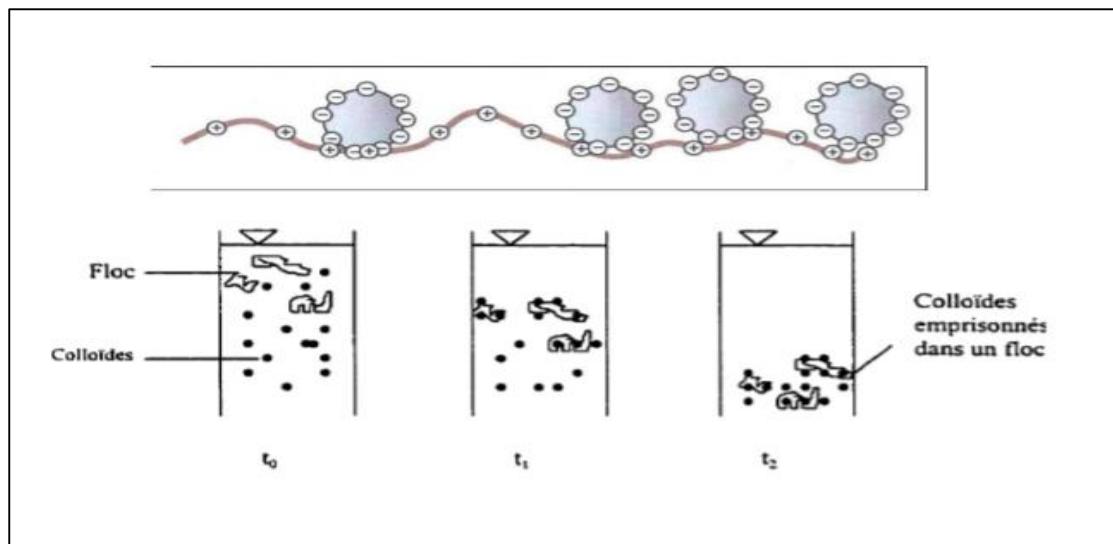


Figure 12 : Emprisonnement des particules dans les flocs pendant la décantation (Zongo, 2009)

II.5.2.2.4 Adsorption et pontage entre les particules

Ce mécanisme implique l'utilisation de polymères cationiques, non anioniques ou anioniques ayant une masse moléculaire élevée et une structure longitudinale. Un polymère en présence d'un colloïde l'adsorbe à une de ses extrémités à l'aide d'un de ces groupes fonctionnels. Les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde. Ce mécanisme permet donc l'agglomération des particules par "pontage" des polymères (Lagaly et al., 2003). La figure II.6 décrit le processus. Par

contre, une concentration de polymères trop élevée peut restabiliser les colloïdes. Les polymères verront alors chacune de leurs extrémités être adsorbées par la même particule, d'où une restabilisation (Tombacz et al., 2004).

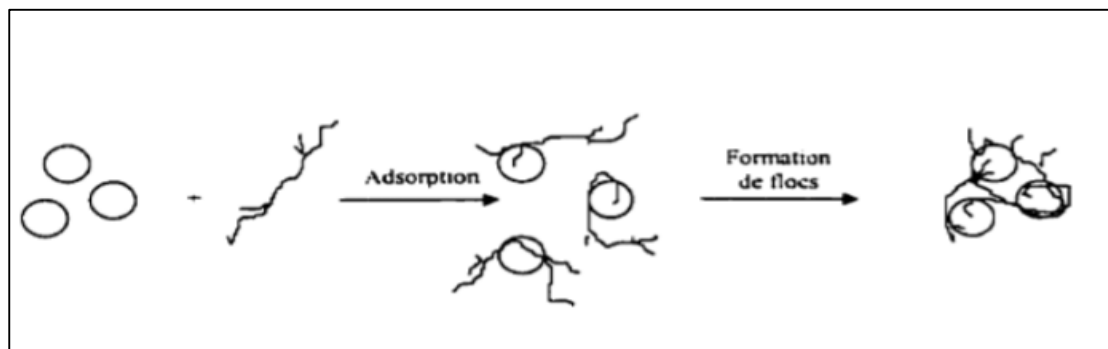


Figure 13 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères (Lakhdari, 2011)

II.5.2.2.3 Coagulants et floculants chimiques

Plusieurs agents chimiques peuvent être employés dans le procédé de coagulation floculation. Les sels métalliques sont indéniablement les coagulants les plus utilisés actuellement dans le monde. Récemment, plusieurs types de coagulants et de floculants inorganiques sous formes de polymères ont été développés et sont maintenant largement utilisés en Chine, au Japon, en Russie et l'Europe de l'Est (Wang et al., 2004). D'autres recherches ont montré que l'utilisation de polymères d'origine biologique est une avenue forte prometteuse.

Tableau 2 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer (Lakhdari, 2011)

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

Les produits les plus utilisés sont l'alun et le chlorure ferrique. Ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation. Par exemple, lorsque l'alun est utilisé, plusieurs radicaux hydroxyalumineux monomères ou polymères sont formés (Duan et al., 2003).

II.5.2.2.4 Dimensionnement d'une coagulation-floculation

Le dimensionnement de ce type d'installation prend en compte la quantité de réactif ainsi que la vitesse d'agitation des bacs destinés à recevoir les volumes à traiter. Un essai au laboratoire appelé "Jar test" permet, par un dosage et une vitesse d'agitation différente sur plusieurs béchers, de déterminer quels sont les couples quantités de réactifs / vitesse et temps d'agitation qui permettent d'obtenir l'eau la plus limpide, les "flocs" les plus gros et les mieux décantés (Figure II.7)



Figure 14 : Jar test Flocculateurs

II.5.2.2.5 Facteurs affectant la coagulation

De nombreux facteurs influencent le mécanisme et l'efficacité de la coagulation. Certains sont liés à la qualité de l'eau à traiter : le pH, l'alcalinité, la turbidité, la couleur, les matières organiques et la température. D'autres sont liés au traitement lui-même : la nature, la dose du coagulant et le mode d'injection (Ezziane, 2007).

II.5.2.2.5.1 Influence du pH

Le pH est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation est optimale, elle est fonction du coagulant utilisé, de la concentration et de la composition de l'eau à traiter. Les flocs sont des précipités d'hydroxydes de métaux. Leur formation et leur stabilité dépendent donc du pH. Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium

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

Pour que la coagulation puisse se produire hors de cette plage optimale, il faut soit augmenter la quantité de coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité. En général, le temps de coagulation est compris entre 15 secondes et 3 minutes (Hernandez de León, 2006).

II.5.2.2.5.2 Influence de la minéralisation

En règle générale, la minéralisation de l'eau exerce des influences sur la coagulation et la floculation :

- Modification de la plage de pH optimale
- Modification du temps requis pour la floculation
- Modification de la quantité de coagulant requis (Desjardins, 1997)

II.5.2.2.5.3 Influence de la température de l'eau

Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de la viscosité, c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc. L'abaissement de la température entraîne selon Bachi et al. (2005) :

- Une augmentation de la concentration en sulfate d'aluminium (alun) à l'optimum de floculation.
- Une décroissance de la taille des floccs
- Un déplacement du pH optimum de floculation vers les pH basiques (Hernandez de León, 2006).

II.5.2.2.5.4 Influence du coagulant

Le choix du coagulant influence les caractéristiques de la coagulation, autrement dit, les finalités de traitement, même si l'aluna est le coagulant le plus utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par un autre coagulant ou de mettre de l'adjuvant selon les caractéristiques de l'eau à traiter (Boursali, 2011). Ainsi, même si le sulfate d'aluminium est le coagulant plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique. Cette dernière procure en effet à plusieurs eaux une

plage de pH optimale plus large que celle due à l'alumine. De plus pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que l'alun (**Cardot, 2005**).

II.5.2.2.5.5 Influence de l'agitation

Selon **Ezziane (2007)**, le processus de coagulation floculation se déroule généralement en deux étapes :

- Une étape de mise en contact entre l'eau à traiter et le coagulant. Cette étape se déroule généralement sous forte agitation (2minutes au maximum) ; son but est également de permettre la neutralisation de la charge des particules et d'amorcer le processus de floculation par la formation de microflocs. La turbidité résiduelle dépend du temps de mélange rapide et pour chaque combinaison de gradient de vitesse et dose du coagulant injecté ; il existe un temps de mélange rapide associé au minimum de turbidité (**Rodier et al., 2005**).
- La deuxième étape c'est l'agitation lente (30 à 60minute) et elle pour but provoque les contacts entre les particules pour former des floccs décantables (**Bachi et Abdelli, 2005**)

II.5.2.2.5.6 Influence de la turbidité

La turbidité est un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation (**Hernandez de León, 2006**). Elle est principalement due à la présence de particules de diamètre de 0,2 à 5micromètre.

L'augmentation de la quantité de coagulant ne varie tout fois pas de façon linéaire en fonction de la turbidité. Lorsque la turbidité est très élevée, la quantité de coagulant nécessaire est relativement faible, car la probabilité de collision entre les particules est très élevée. Par contre, lorsque la turbidité est faible, la coagulation est difficile (**Ahmed et Benhaddou, 2010**).

II.5.2.2.5.7 Influence de la couleur

Des études ont révélé que 90 des particules responsables de la couleur avaient de diamètre supérieur à 3,5 nm ; ces particules sont donc des particules colloïdales beaucoup plus petites que les particules responsables de la turbidité. La plupart des particules responsables de la couleur possèdent des charges négatives à leur surface.

Pour un pH optimal, la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisée. Le pH optimal pour l'élimination de la couleur varie entre 4 et 6 (**Desjardins, 1997**).

II.5.2.3 Floculation

II.5.2.3.1 Principe

La floculation est l'agrégation des particules déjà déstabilisées, par collision les unes contre les autres ce qui conduit à la croissance en taille du floc et à la diminution en nombre des particules en solution (**Chen et al., 2007**).

Les processus préalables à la floculation sont :

- La coagulation
- Les oxydations chimiques ou biologiques qui détruisent les colloïdes protégés
- Le changement des conditions générales tel que le pH et la température
- Et enfin, l'utilisation de réactifs auxiliaires (par exemple : les adjuvants de floculation).

Comme pour la coagulation, il existe un certain nombre de paramètres à prendre en compte pour le bon fonctionnement de ce procédé. Le mélange doit être suffisamment lent afin d'assurer le contact entre les floccs engendrés par la coagulation. En effet, si l'intensité du mélange dépasse une certaine limite, les floccs risquent de se briser. Il faut également un temps de séjour minimal pour que la floculation ait lieu. La durée du mélange se situe entre 10 et 60 minutes (**Hernandez de León, 2006**).

II.5.2.3.2 Types de floculation :

Pour arriver à la décantation des particules colloïdales coagulées, il est nécessaire de les passer par une opération de floculation. Cette floculation peut être faite à l'aide d'une de ces deux méthodes suivantes :

II.5.2.3.2.1 Floculation physique

Elle consiste à augmenter par la création d'une différence de vitesse entre les particules colloïdales déstabilisées, la probabilité des contacts entre ces particules afin de les agglomérer en floccs denses ensuite de les décanter (**Boursali, 2011**).

Deux mécanismes assurent la mobilité des particules : le mouvement brownien (floculation péricinétique) ; et le brassage mécanique (floculation orthocinéque) :

II.5.2.3.2.1 Floculation péricinétique

Par le mouvement brownien ; le mouvement aléatoire des particules cause occasionnellement des collisions. Ce mécanisme est plus efficace que la sédimentation différentielle mais il demeure lent et produit de petits agglomérats (Svarowsky et Ladislav, 2000).

Au cours du processus de floculation lui-même, le mouvement Brownien a de moins en moins d'effet sur le mouvement des particules dont la taille augmente progressivement. Cette augmentation accroît aussi l'influence de la barrière énergétique et ceci réduit encore le contact péricinétique dès que le diamètre de particules dépasse 1 μm (Masschlrin, 1996).

II.5.2.3.2.1.2 Floculation orthocinétique

Ce type de floculation est fonction de l'énergie dissipée dans le fluide. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules. La vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps et est caractérisée par les particules. Par l'agitation mécanique, c'est la méthode la plus efficace, mais trop d'agitation peut briser les agrégats au lieu de les créer. La coagulation n'est pas utilisée dans le procédé Bayer, mais elle est très importante dans plusieurs autres domaines, notamment dans le traitement des eaux.

(Sincero et al., 2003)

II.5.2.3.2.2 Floculation chimique

C'est la floculation qui est provoquée par l'agitation de l'eau. Cette agitation facilite l'agrégation des particules par augmentation de la probabilité de collisions entre ces particules. Elle consiste en une agglomération par pontage des particules colloïdales déchargées à l'aide de certains produits chimiques appelés floculants (Degremont, 2005).

II.5.2.3.3. Floculants utilisés

Les polymères emprisonnent les matières colloïdales agglomérées et forment ainsi des flocons volumineux qui se déposent par gravité. Ils sont ajoutés après la coagulation pour augmenter d'avantage la taille et la cohésion des flocons (Boursali, 2011).

Les floculants peuvent être de trois natures différentes

✓ Flocculants organiques

Ils sont hydrosolubles et qui peuvent voir une charge anionique ou, cationique ou neutre. On peut citer exemple l'amidon, les alginates ou les polysaccharides.

✓ Flocculants minérales

Ce sont des produits chimiques qui agissent par adsorption ou par neutralisation sur une eau brute qui ne contient pas assez de matières en suspension. Les floculations connus sont à base de la silice activée, certaines argiles colloïdales comme la bentonite ou le charbon actif en poudre, certains hydroxydes à structure polymère comme l'alumine ou l'hydroxyde ferrique et le sable fin (**Boursali, 2011**).

✓ Flocculants de synthèses

Ce sont des produits fabriqués à partir de monomères à très haute masse moléculaire. Ces polymères ont un rendement supérieur aux polymères naturels. Ils sont classés suivant leur ionicité :

- ❖ **Anionique** : conçu à partir polymère d'acrylamide et l'acide acrylique
- ❖ **Neutre** : conçu à partir de polyacrylamides
- ❖ **Cationique** : conçu à partir d'acrylamide et de méthacrylate de diméthylamino-éthyle ou d'acrylate de diméthylamino-éthyle (**Boursali, 2011**).

II.6 Mise en œuvre de la coagulation-floculation

Il faut associer dans un temps assez court, deux phases distinctes et incompatibles. En effet, les conditions de mise en œuvre de la coagulation sont différentes de celles de la floculation. On distingue les deux phases suivantes :

- ✓ 1^{ère} phases : mélange rapide et vigoureux
- ✓ 2^{ème} phase : mélange lent

Dans un premier temps, un mélange rapide est nécessaire pour disperser les additifs dans la totalité du volume d'eau à traiter. L'injection se fait dans une zone de turbulence crée par des chicanes ou par mélange mécanique avec des hélices. La deuxième phase favorise les contacts entre les particules de floccs sans les léser. Le mélange doit être néanmoins assez énergétique pour engendrer des différents de vitesse dans le bassin nécessaire à la rencontre des particules (**Cardot, 2005**).

II.7 Conclusion

Le processus de coagulation-floculation et a fait apparaître divers mécanismes, souvent complexes et dépendant fortement du pH de l'eau à traiter. En outre, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à optimiser cette étape pour un meilleur abattement des polluants, notamment organique, certains ont porté leur choix sur l'amélioration des performances des réactifs coagulant et adjuvants de floculation.



***Chapitre III :
Biocoagulants***

III.1. Introduction

Au cours des dernières années, un changement de paradigme dans les industries du traitement de l'eau et des eaux usées a changé la culture des opérateurs de l'eau pour adopter et mettre en œuvre le développement durable dans les exploitations. L'une des pratiques réalistes consiste à remplacer les produits chimiques utilisés dans les processus de traitement par des produits « verts » qui ont des impacts environnementaux moindres en termes de production, de consommation et de gestion des déchets secondaires. Dans ce contexte, les coagulants naturels semblent convenir à l'image et peuvent être une alternative aux coagulants inorganiques conventionnels. Il a été généralement rapporté que les coagulants naturels peuvent être obtenus facilement à partir de matières premières renouvelables, produisent des boues biodégradables en moindre quantité (réduisant potentiellement les dépenses associées à l'élimination des boues) et moins affectés par le pH de l'eau (**Mohd-Salleh et al., 2019 ; Saleem et Bachmann, 2019**).

De nombreux articles de recherches auraient prouvé l'efficacité des coagulants naturels (principalement le chitosane et les coagulants d'origine végétale) dans diverses applications de traitement de l'eau et des eaux usées (**Choy et al., 2015, 2014 ; Mohd-Salleh et al., 2019 ; Oladoja, 2015 ; Renault et al., 2009 ; Saleem et Bachmann, 2019 ; Yin, 2010**). Ces auteurs ont également présenté l'extraction de coagulants naturels et ont mis en évidence certains défis d'application des coagulants naturels. Cependant, l'acceptation des coagulants naturels dans les usines de traitement des eaux potables et des eaux usées est faible. La commercialisation de coagulants naturels a rencontré peu de défis critiques qui empêchent sa transition d'une étude de coagulation en laboratoire à une application répandue de traitement de l'eau potable et des eaux usées.

III.2. Chitosane

Le chitosane est un polysaccharide linéaire formé d'unité D-glucosamine liées entre elles par des liens glycosidiques et de N-acétyle-N-glucosamine, ils proviennent de la désacétylation de la chitine, un composé grandement similaire à la cellulose (**Kawamura, 1991**).

On retrouve la chitine dans plusieurs écosystèmes puisqu'elle est la composante fondamentale de l'exosquelette des invertébrés marins (crabe, crevette...) et des

insectes. Après la cellulose, la chitine est le composé organique le plus abondant dans la nature (Payet *et al.*, 2000)

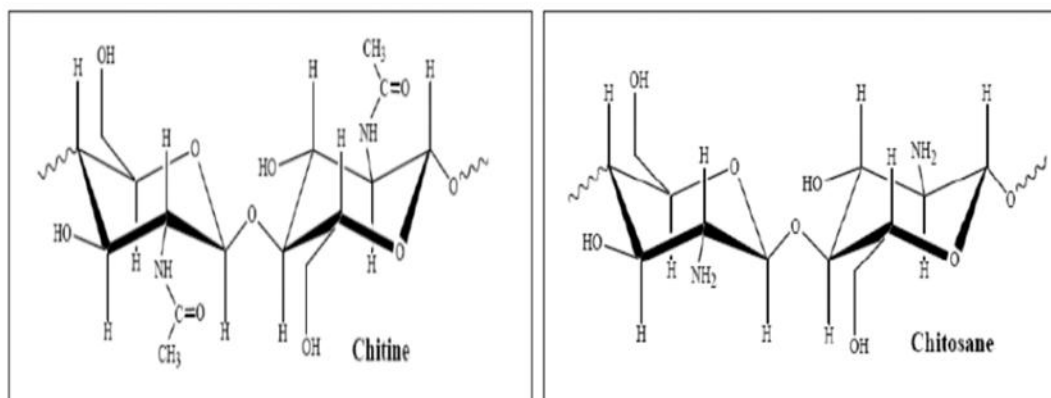


Figure 15 : Structure chimique de la chitine et de la chitosane.

III.2.1. Mécanismes de la coagulation-floculation avec le chitosane

Gras à ces propriétés physico-chimiques, le chitosane possède un degré élevé de réactivité chimique du a son groupe primaire amino libre NH_3 qui lui confère une forte densité de charges positives. Cette propriété lui permet d'agir comme un agent coagulant ou chélatant dans le traitement des eaux usées (Sandford, 1989).

Traditionnellement, les chercheurs se sont concentrés sur l'application du chitosane cationique commercial produit à partir de crustacées dans la séparation des solides négatifs en suspension des eaux usées par coagulation-floculation (Chi et Cheng, 2006 ; Rizzo *et al.*, 2008 ; Sila *et al.*, 2014).

Beaucoup de travaux ont été publiés sur l'application du chitosane d'origine crustacée comme biocoagulant dans une grande variété d'effluents, par exemple : l'eau potable (Türker et Baran, 2017), l'industrie textile (Rao, 2015), l'industrie pétrolière (Hosny *et al.*, 2016), les plans d'eau peu profonds (Miranda *et al.*, 2017), l'eau de mer (Altaher, 2012), la récupération des protéines (Wibowo *et al.*, 2005) et le latex colloïdal (Ashmore et Hearn, 2000).

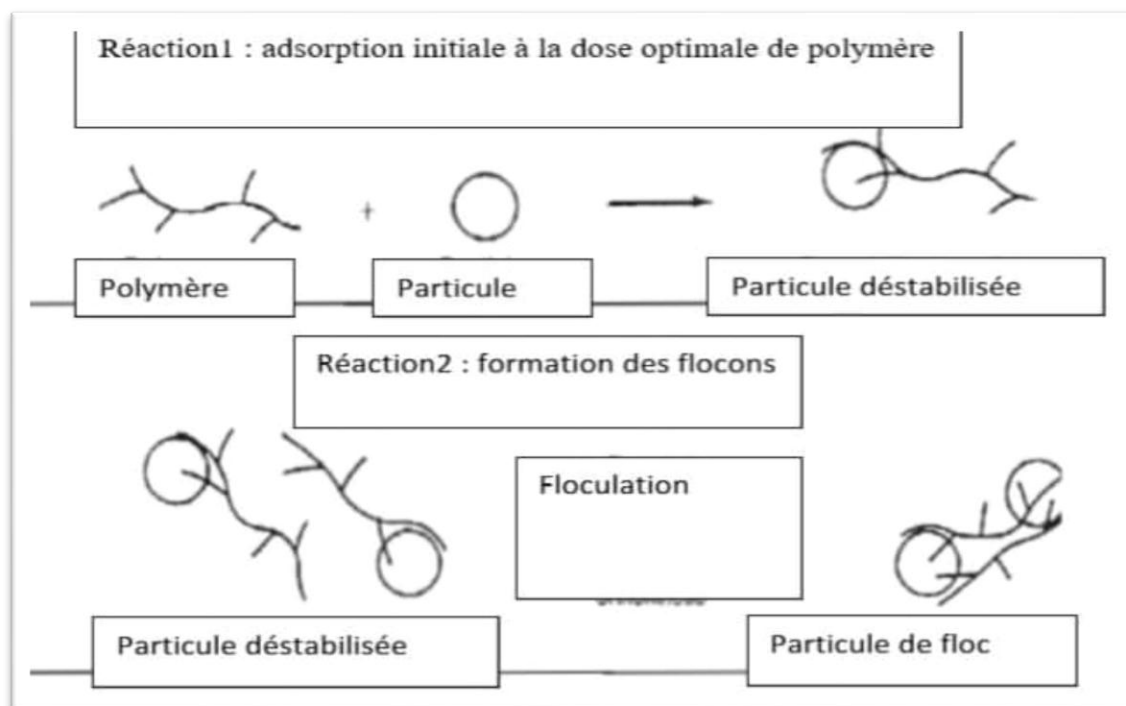


Figure 16 : Procédé de coagulation-floculation au chitosane

III.3. Coagulations naturelles à base d'extraits des plantes

III.3.1. Graines de *Moringa oleifera* (bâton de tambour)

Les grains de *Moringa oleifera* contiennent des quantités importantes de protéines solubles dans l'eau. Les protéines sont considérées comme agissent de la même manière que les coagulants polymères. Lorsqu'elles sont ajoutées à l'eau brute, les protéines se lient aux particules chargées négativement qui rendent les eaux brutes turbides (limon, argile, bactéries, etc.). Sous l'agitation appropriée, ces particules liées puissent se développer en taille pour former les floccs facilement éliminables par filtration (Maruti Prasad *et al.*, 2013).

La poudre de *Moringa oleifera* a été rapportée pour avoir la capacité de réduire valeurs élevées de turbidité dans les eaux de surface (Sanghi *et al.*, 2006 ; Muyibi *et al.*, 2002 ; Muyibi *et al.*, 2003). *Moringa oleifera* a été utilisé comme coagulant naturel dans un essai de traitement de l'eau à grande échelle au Malawi. Les valeurs de turbidité jusqu'à 270–380 NTU ont été réduites à environ 04 NTU, qui sont dans la valeur de la ligne directrice de l'OMS avec l'ajout de la Poudre (Bhatia *et al.*, 2006).

III.3.2. Protéines des graines de Cocos

Les graines de *C. nucifera* contiennent un coagulant à base de protéines appelé caséine (Fatombi et al., 2013). La caséine purifiée, désignée par Cas MG comprend des résidus amino de 5,6 kDas avec un point isoélectrique et une densité de charge de 7,5 et 1,09 meq / g (Fatombi et al., 2013), respectivement. La présence de pics spectraux infrarouges (IR) caractéristiques à 1649 cm⁻¹, 1536 cm⁻¹ et 1237 cm⁻¹ suggèrent que Cas MG contient une riche source de groupes réactifs aux amides primaires, secondaires et tertiaires (Fatombi et al., 2013). De plus, le Cas MG contient également des sites actifs -OH et -NH dans sa molécule en raison de la présence distincte de pics IR à 3411 cm⁻¹ et 3290 cm⁻¹, respectivement (Fatombi et al., 2013). En raison de la dominance des groupes fonctionnels amide cationique en général, le Cas MG est traité comme un coagulant cationique.

III.3.3. Ocimum basilicum

O. basilicum communément connu sous le nom de basilic, est une herbe aromatique à fleurs cultivée dans les régions tropicales d'Asie, d'Afrique de Centre et l'Amérique du Sud. Les feuilles de la plante sont utilisées comme épices dans la cuisine traditionnelle. L'huile de basilic a longtemps été utilisée pour aromatiser les aliments et produits dentaires et oraux. L'herbe contient des composés bioactifs tels que les flavonoïdes ayant une activité antioxydante et antimicrobienne (Razavi et al., 2009). Le mucilage d'*O. basilicum* a été utilisé pour la décoloration du rouge Congo. (Meroufel et al., 2013). Selon Chaibakhsh et al. (2014), une élimination maximale de la couleur de 68,5 % a été obtenue en utilisant une faible quantité de l'*O. Basilicum* mucilage (1,6 mg/L) pour une charge en colorant de 50 mg/L.

III.3.4. Protéines des graines de *Phaseolus. Vulgaris*

Les graines de *P. vulgaris* constituent une fraction coagulante de type protéine anionique (Antov et al., 2010). La séparation chromatographique de l'extrait hydrosoluble de graines végétales à l'aide d'Amberlite™ IRA 900 Cl a été réalisée par Antov et al. (2010) qui ont montré que la fraction coagulante comprend principalement des acides aminés chargés négativement. Bien que les études sur *P. vulgaris* soient toujours en cours, la réactivité de ce coagulant peut être attribuée en raison de la présence d'acides aminés chargés négativement et / ou polaires.

III.3.5. Graines de mangue (*Mangifera indica*)

La mangue est un fruit tropical appartenant à la famille des Anacardiaceae. Il est principalement utilisé comme produit alimentaire, tandis que ses graines sont jetées comme déchet de fruits. Afin de valoriser les graines de mangue jetées, diverses études ont testé leur capacité à éliminer les polluants des eaux usées synthétiques (Ali *et al.*, 2008) et réelles (Ullah et Rathnasiri, 2015). Concernant leur utilisation dans le traitement de l'eau, les graines de mangue ont été exploitées pour purifier plusieurs types d'eaux. Par exemple, Seghosime *et al.* (2017) ont utilisé un extrait de mangue pour clarifier une eau trouble, résultant d'un mélange d'eau de rivière et de kaolin. De plus, Ullah et Rathnasiri (2015) ont montré que 1,2 mL d'extrait / L d'eau de la poudre de graines de mangue permettaient une élimination effective de 96%, 89% et 97%, respectivement, des matières en suspension (MS), de la DCO et de la couleur dans le traitement d'un effluent d'huile de palme.

III.3.6. Okra (*Abelmoschus esculentus*)

Le gombo est une plante appartenant à la famille des Malvacées et bien connue sous le nom de dames finger ou gumbo. Il est originaire d'Afrique et se développe maintenant dans le monde entier. Alors que le gombo est largement utilisé comme produit alimentaire en raison de ses fruits comestibles à haute teneur nutritionnelle (Freitas *et al.*, 2015). Les graines de gombo sont considérées comme la partie active potentielle en tant que coagulant et / ou floculant pour l'élimination de la turbidité par rapport aux autres parties de la plante. Dans cette ligne, selon Fahmi *et al.* (2014), la forte réduction de la turbidité à l'aide de graines peut être attribuée à leur teneur en protéines relativement élevée qui se situait entre 24 et 26%, alors que la teneur en protéines des feuilles et des tiges du gombo était de 23% et 6,5%, respectivement. Par conséquent, la corrélation entre la teneur en protéines des graines et l'efficacité d'élimination indique que les protéines favorisent le processus de coagulation-floculation. Comme pour MO et cactus, les différents résultats de la littérature montrent clairement le potentiel de coagulation / floculation significatif de l'extrait de gombo dans le traitement de divers types d'eaux usées.

III.4. Avantages et inconvénients des coagulants naturels

III.4.1. Avantages

- ❖ Les composés polymères organiques présentent des avantages par rapport aux matières inorganiques. Ils possèdent plusieurs caractéristiques nouvelles telles que leur capacité à produire de grands floccs compacts qui sont plus forts et ont de bonnes caractéristiques de décantation. Les polymères naturels peuvent potentiellement être appliqués non seulement dans les procédés alimentaires et de fermentation, et ils peuvent être appliqués dans le traitement des eaux usées textiles (**Renault et al., 2009**)
- ❖ L'utilisation de coagulants à base de plantes à place des coagulants inorganiques et/ou les polymères organiques comprennent des besoins en dose de coagulant inférieur, des augmentations de la charge ionique et la réduction des niveaux de métaux les eaux usées traitées (**Kakoi et al., 2016**). En raison de leur faible risque toxicologique et d'une biodégradabilité élevée, ils sont sans danger pour la santé humaine et la vie aquatique, ayant donc un impact environnementale moindre (**Choy et al., 2016**).
- ❖ L'utilisation de coagulants à base de plantes peut réduire les couts de traitement des eaux usées et ces avantages sont particulièrement augmentés si les plantes sont cultivées en cessions locales (**Sanghi et al., 2006 ; Freitas et al., 2015**). Les extraits de plantes brutes sont souvent disponibles localement et par conséquent, les coagulants sont plus rentables que les produits chimiques importés. (**Choy et al., 2014; Oladoja, 2015**).
- ❖ Les eaux usées traitées avec des coagulants naturels n'ont aucun risque pour les organismes biologiques, Contrairement aux coagulants synthétiques. En outre, les boues produites par les polymères naturels peuvent être traitées par procédés biologique ou éliminés par enfouissement dans le sol en raison de sa non toxicité (**Souza et al., 2014**). En tant que tel, les couts de traitement et de manutention des boues sont réduits (**Choy et al., 2016**).
- ❖ Il existe plusieurs autres avantages : les matériaux renouvelables ne produisent généralement pas de pollution secondaire (**Renault et al., 2009**).

III.4.2. Inconvénients

- Les coagulants polymériques à base de plantes présentent également certains inconvénients. Les polymères naturels sont généralement non toxiques mais les polymères synthétiques sont plus efficaces en raison de la possibilité de contrôler leurs propriétés tel que le nombre et le type d'unités et le poids moléculaires. En outre, en raison de leur biodégradabilité, les biopolymères ont une durée de conservation plus courte que les polymères synthétiques (**Zahrim et al., 2011**). Malgré la promesse faite par ces matériaux, leur application n'a pas eu encore la transition de l'échelle de banc aux essais sur le terrain et l'application dans le traitement industriel. (**Oladoja, 2015**). Un autre problème lié à l'utilisation des coagulants à base de plante est l'augmentation de la charge organique dans l'eau traitée, ce qui peut entraîner des l'augmentation des activités microbiennes, ayant graves répercussions sur les processus de désinfection à l'aide du chlore (**Anastaskis et al., 2009**).



CONCLUSION

Avec la demande accrue de produits textiles, l'industrie de ces derniers génère des grands volumes d'eaux usées, qui ont augmenté proportionnellement avec l'augmentation de la production mondiale, ce qui en fait l'une des principales sources des graves problèmes de pollution dans le monde. Le traitement des eaux usées textiles est l'un des problèmes environnementaux les plus difficiles car il contient une large gamme de colorants et des produits chimiques toxiques. Le rejet direct de ces eaux usées sans un traitement approprié dans les plans d'eau cause des dégâts irréversibles à l'environnement.

La coagulation-floculation est l'un des procédés les plus utilisés pour le traitement des eaux usées, car il est efficace et simple à utiliser. Ce procédé est utilisé pour l'élimination des solides en suspension, des colloïdes et matière organiques présente dans les eaux usées industrielles. En effet, divers types de coagulants ont été testés et les plus utilisés sont souvent d'origine chimiques, qui eux même présente un danger pour l'environnement. L'utilisation des coagulants naturels biodégradable s'impose donc, car ils sont sans danger pour la santé humaine, respectueux de l'environnement, généralement sans toxicité et ne produisent aucune pollution secondaire.

Ces coagulants sont extraits de matières naturelles et des sources renouvelables, tel que les microorganismes, les animaux ou les plantes. Non seulement le volume de boue généré par les coagulants naturels est plus petit que les coagulants chimiques, ils peuvent en outre être traités biologiquement ou peuvent être éliminés en toute sécurité en raison de leur non toxicité.

Bien que, les progrès actuels des coagulants naturels sont assez encourageants, les perspectives de l'évaluation de la durabilité ont montré que l'acceptation et la commercialisation des coagulants naturels sont entravées par deux défis principaux : l'aspect pratique et la faisabilité d'une application réelle sur le terrain. Des recherches futures axées sur ces questions peuvent aider à clarifier les incertitudes entourant les coagulants naturels et en même temps, poussent l'industrie de l'eau à devenir plus durable.



*Références
bibliographiques*

A

- **Abbas M. Messaad A. (2016 /2017).** Utilisation de l'électrocoagulation pour L'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile. Mémoire de master en hydraulique. Université Mohamed Boudiaf. Msila.
- **Alem S. (2015/2016).** Etude comparative entre coagulation-floculation et electrocoagulation-électroflottaton. Mémoire de master en hydraulique. Université Abderrahmane mira. Bejaia.
- **Ali ouche S. (2007).** Etude de l'élimination d'un colorant par différentes méthodes photochimiques en milieu aqueux. Mémoire de magister en chimie. Université Mentouri. Constantine.
- **Anushiravani A. Dehgani M. Shabestari R. Shamsedini N. (2014).** Application of Electrocoagulation Process for Reactive Red 198DyeRemoval from the Aqueous Solution. Iranian Journal of Health Sciences. (2). pp.1-9.
- **Ahmed Ammar Y. Benhaddou M. (2010).** Etude expérimentale de la coagulation-floculation par le sulfate d'alumine des matières en suspension. Mémoire d'ingénieur d'état en hydrogéologie. Université Abou Bakr Balkaid. Tlemcen.
- **Al Arni S. Amous J. Ghernaout D. (2019).** On the Perspective of Applying of a New Method for Wastewater Treatment Technology: Modification of the Third Traditional Stage with Two Units, One by Cultivating Microalgae and Another by Solar Vaporization. International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources. (2). pp.1-4.
- **Anastasakis K. Kalderis D. Diamadopoulos E. (2009).** Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater. Desalination. (249). pp.786-791.
- **Ashmore M. Hearn J. (2000).** Flocculation of model latex particles by chitosans of varying degrees of acetylation. Langmuir. (16). pp.4906-4911.
- **Ali G H. Hegazy BE. Fouad AH. (2008).** Comparative study on natural Products used for pollutants removal from water. Journal of applied Science Research. (5). pp.1020-1029.
- **Anouar H. Elhourch A. Elkacemi K. Zouahri A. (2014).** Elimination de l'orange 16 colorant azoïque par adsorption sur charbon actif en poudre. International Journal of Innovation and Applied Studies. (9). pp.1373-1377.

- **Antov M. Šćiban MB. Petrović NJ. (2010).** Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal. *Bioresource Technology*. (101). pp.2167-2172.

B

- **Benamraoui F. (2014).** Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs Synthétisés à partir des résidus de l'agriculture. Mémoire de magister en chimie. Université Ferhat Abbas. Sétif.
- **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.
- **Bordet J. 2007.** L'eau dans son environnement rural. Edition Johanet. Paris. France.2318p.
- **Brahimi Z. Benaissa N. (2010).** Influence de la coagulation-floculation et décantation sur la qualité des eaux épurées de la station de Ain El Houtz. Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique. Université Abou Bakr Balkaid. Tlemcen.
- **Bachi M. Abdelli R. (2005).** Influence des paramètres physiques et chimiques sur la coagulation-floculation et décantation. Mémoire pour l'obtention du diplôme DEUA en hydraulique. Université Abou Bakr Balkaid. Tlemcen.
- **Bhatia S. Othman Z.L Ahmad. (2006).** Palm oil mill effluent pre-treatment using *Moringa Oleifera* seeds as an environmentally friendly coagulant: laboratory and pilot plant studies. *Journal of Chemical technology and Biotechnology*. (81). pp.1852-1858.
- **Buenaño B. Vera E. Aldás MB. (2019).** Study of coagulating/focculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment. *Ingenieria Investig.* (39). pp.24-35.
- **Benalia A. Derbal K. Panico A. Pirozzi F. (2019).** Use of Acorn Leaves as a natural coagulant in a drinking water treatment plant. *Water*. (11). pp.1-12.
- **Ben Mansour H. Boughzala O. Dridi. Barillier D. Chekir-Ghediraet L. Mosrati R. (2011).** Les colorantes textiles sources de contamination de L'eau: Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. *Journal of Water Science*. (24). pp.209-238.

C

- **Chebli D. (2012).** Traitement des eaux usées industrielles : Dégradation des colorants Azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancé et un traitement biologique. Thèse de doctorat en sciences. Université Ferhat Abbas. Sétif.
- **Cardot G. (2005).** Génie de l'environnement ; Les traitements de l'eau Procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus. Edition Ellipse. 2^{ème} édition. Paris. France.302p.
- **Chabni L. (2005).** Etude de la propagation des polluants dans les eaux souterraines. Mémoires de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique. Ecole National Supérieur de hydraulique ENSH. Blida.
- **Chen S. Sun D. Chung JS. (2007).** Treatment of pesticide wastewater by moving-bed biofilm reactor combined with Fenton-coagulation pre-treatment. Journal of Hazardous Materials. (144). pp.577-784.
- **Choy SY. Prasad KN. TY Wu. Raghunadan ME. Ramanan RN. (2016).** Performance of conventional starches as natural coagulants for turbidity removal. Ecological Engineering. (94). pp.352–364.
- **Chaibakhsh N. Ahmadi N. Zanjanchi M A. (2014).** Use of Plantago major L. as a natural coagulant for optimized decolorization of dye-containing wastewater. Industrial Crops and Products. (61). pp.169-175.
- **Choy SY. Prasad KMN.TY Wu. Ramanan RN. (2013).** A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification. International journal of Environmental Science and Technology. (12). pp.367-390.
- **Chi FH. Cheng WP. (2006).** Use of chitosan as coagulant to treat waste water from milk processing plant. Journal of Polymers and the Environment. (14). pp.411-417.

D

- **Deltalab. (2012).** Bultin technique du coagulation-floculation et décantation.
- **Desgrement. (2005).** Mémento technique de l'eau, Tome I et II.10^{ème} édition. Lavoisier. Paris.France.1718p.

- **Desjardins C. (1999).** Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée à l'aide d'une procédure modifiée de jar test. Mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées. Canada.
- **Desjardins R. (1997).** Traitement des eaux. Edition de l'école polytechnique de Montréal. 2^{ème} édition revue et améliorée. Montréal. Québec. 304p.

E

- **Ezziane S. (2007).** Traitement des eaux de rejets de l'unité CERAMIT 'TENES. Mémoire de Magister en génie de procédé. Université Hassiba Ben Bouali. Chleff.

F

- **Fahmi MR. Hamidin N. Zulzikranmi Azner H. Fazara UA. MDIrfan H. (2014).** Performance evaluation of okra (*Abelmoschus esculentus*) as coagulant for turbidity removal in water treatment. *Key Engineering Materials*. (594-595). pp.226-230.
- **Fatombi JK. Lartiges BS. Taofiki A.O Barres. Caillet C. (2013).** Natural coagulant protein from copra (*Cocos nucifera*). Isolation, characterization and potential for water purification. *Separation Purification Technology*. (116). pp.35-40.
- **Guitouni F. (2017).** Oxydation des colorants par les procédés d'oxydation avancées sur des catalyseurs à base de la montmorillonite modifiée. Mémoire de master en chimie. Université Abou Bakr Balkaid. Tlemcen.
- **Ghernaout D. (2017).** Water Treatment Chlorination: An Updated Mechanistic Insight Review. *Chemistry Research Journal*. (2). pp.125-138.
- **Ghernaout D. Aichouni M. Alghamdi A. (2018).** Applying Big Data (BD) in Water Treatment Industry: A New Era of Advance. *International Journal of Advances in Applied Sciences*. (5). pp. 89-97.
- **Ghernaout D. Aichouni M. Touahmia M. (2019).** Mechanistic Insight into Disinfection by Electrocoagulation. A Review. *Desalination and Water Treatment*. (141). pp.68-81. G

H

- **Hernandez de León H R. (2006).** Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable. Mémoire pour l'obtention de diplôme de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées. Toulouse.
- **Hammami S. (2008).** Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancées : application à la dépollution des rejets industriels. Thèse doctorat Université Paris-Est Institut Francilien des Sciences Appliquées. Université El Manar Faculté des Sciences. Tunis.

J

- **Jinming D. Gregory J. (2003).** Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science.* (100-102). pp.475-502.

K

- **Kakoi B. Kaluli JW. Ndiba P. Thiong GT. (2016).** Banana pith as a natural coagulant for polluted river water. *Ecological Engineering.* (95). pp.699-705.
- **Kumar MNR. (2000).** A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers.* (46). pp.1-27.
- **Kawamura S. (1991).** Effectiveness of Natural Polyelectrolytes in Water Treatment. *Journal of the American Water Works Association.* (83). pp.88-91).

L

- **Lamri N. (2010).** Elimination du colorant orange II en solution aqueuse par voie photochimique et par adsorption. Mémoire de magister en chimie Université Mentouri. Constantine.
- **Lakhdari B. (2011).** Effet de la coagulation-floculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz. Mémoire de magister en Chimie Inorganiques et Environnement. Université Abou Bakr Balkaid. Tlemcen.
- **Lagaly G. Ziesmer S. (2003).** Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersion. *Advances in Colloid and Interface Science.* (100-102). pp.105-128.
- **Lecomte M. (2004).** Violet de Gentiane fiche technique, Cercle des Mycologues du Luxembourg belge asbl (M.L.B).

M

- **Merouani Djellali R. (2011).** Traitement de colorant azoïque et anthraquinoniques par Procédés d'oxydation avancé (POA). Thèse doctorat en chimie. Université Lille1 et Université Abdelhamid ibn Badis. Mostaganem.
- **Masschelein wj. (1996).** Processus unitaire du traitement de l'eau potable". Edition Cebedoc. Paris. France.pp.222-647.
- **Muyibi AS. Alfugara M. (2003).** Treatment of surface water with Moring Oleifera seed extract and alum- a comparative study using a pilot scale water treatment plant. International Journal of Environmental Studies. (60). pp.617-626.
- **Muyibi AS. Megat M. Loon LH. Leong TK. (2002).** Effects of Oil Extraction from Moring Oleifera seeds on coagulation of turbid water. International Journal of Environmental Studies. (59). pp.243-254.
- **Meroufel B. Benalia O. Benmoussa Y. Zenasni MA. (2013).** Adsorptive removal of anionic dye from aqueous solutions by algerian kaolin characteristics, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. Journal of Materials Environmental Science. (4). pp.482-491.
- **Mohd-Salleh SNA. Mohd-Zin NS. Othman N. (2019).** A review wastewater treatment using natural material and its potential as aid and composite coagulant. Sains Malaysiana. (48). pp.155-164.
- **Muruganandam L. Saravana KMP. Amarjit J. Sudiv G. Bhagesh G. (2017).** Treatment of waste water by coagulation and focculation using biomaterial. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. (263). pp.032006.
- **Mussarat S. Bachmann RT. (2019).** A contemporary review on plantbased coagulants for applications in water treatment. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. (72). pp.281-297.

N

- **Nait Merzoug N. (2013-2014).** Application des tiges de dates dans l'adsorption de Polluants organiques. Mémoire de magister en chimie. Université Mohamed Cherif Massaadia. Souk-Ahras.

O

- **Oladoja NA. (2015).** Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. *Journal of Water Process Engineering.* (6). pp.174–192.

P

- **Prasad SM. Srinivasa RB. (2013).** A Low cost water treatment by using a Natural coagulant. *International Journal of Research in Engineering and Technology.* (2). pp.239-242.
- **Payet LF. Pontoon P. Agenlyb J. colinart L. Grpossiord b. (2002).** Rhéologie caractérisation rhéologique de la gélification de l'alginate et de chitosane : effet de la température. *Rhéologie.* (2). pp.46-51.

R

- **Racha H. Mahmoud F. Mahmoud R. Th A-M. Desouky S E M. Sayed Ahmed A-S. (2016).** Treatment of the oil produced water (OPW) using coagulant mixtures. *Egyptian Journal of Petroleum.* (25). pp.391-396.
- **Rodier J. Legube B. Merlet N. (2005).** Lanalyse de l'eau ; eau naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^{ème} édition. Dunod, Paris.1824p.
- **Renault F. Sancey B. Jérémie C. Morin-Crini N. Badot PM. Winterton P. Crini G. (2009).** Chitosan flocculation of cardboard-mill secondary biological wastewater. *Chemical Engineering Journal.* (155). pp.775-783.
- **Razavi SMA. Mortazavi SA. Matia-Merino L. Hosseini-Parvar SH. Motamedzadegan A. Khanipour E. (2009).** Optimization study of gum extraction from basil seeds (*Ocimum basilicum*). *International Journal of Food Science and Technology.* (44). pp.1755-1762.
- **Rizzo L. Guisy O. Grassi M. Belgiorno V. (2008).** Pre-treatment of olive mill wastewater by chitosan coagulation and advanced oxidation processes. *Separation and Purification Technologie.* (63). pp.648-653.
- **Rao LN. (2015).** Coagulation and flocculation of industrial wastewater by Chitosan. *International Journal of Engineering and Applied Science.* (2). pp.2394-3661.

- **Ranata PS. Thabata KFSF. Domingues FS. Pezoti O. Ambrosio E. Ferrari-Lima A. Garcia JC. (2016).** Photocatalytic activity of TiO₂, ZnO and Nb₂O₅ applied to degradation of textile wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.* (329). pp.9-17.

S

- **Saraswati R. Suresh S. Miranda M. Noyma N. Pacheco FS. Magalhães L. Pinto E. Santos S. (2017).** Comparison of different coagulants for reduction of COD from textile industry Wastewater. *Materials Today: Proceedings.* (4). pp.567-574
- **Salmi D. Slimani K. (2014).** Application de l'électroflottation-électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant textile Cas du Bleu d'indanthrène RS. Mémoire de master en hydraulique. Université Abderrahmane Mira. Bejaia.
- **Svarowsky L. (2000).** Solid-liquid separation. 4^{ème} édition. Angle Terre: Butterworth-Heinemann.554p.
- **Sincero AP. Sincero AG. (2003).** Physical-chemical treatment of water and wastewater.1éd. New York: RC Press.832p.
- **Siangsantum V. (2010).** Procédé hybride: hydrocyclone, coagulation-floculation et flottation pour le traitement de l'eau, Hybrid process: hydrocyclone, coagulation, floculation and flotation for water treatment process. Thèse Doctorat en génie des procédés et de l'environnement. Université de Chulalongkon. Toulouse.
- **Sanghi R. Bhattacharya B. Singh V. (2006).** Use of Cassia javahikai seed gum and gum-g-polyacrylamide as coagulant aid for the decolorization of textile dye solutions. *Bioresource Technology.* (97). pp.1259-1264.
- **Seghosime A. Awudza JAM. Buamah R. (2017).** Comparative studies on proximate composition and phytochemical screening of mango, key lime, African star apple and african pear seeds as possible coagulant aids for water treatment. *American Journal of Environmental Sciences.* (13). pp.325-333.
- **Shilpa BS. Papegowda G. (2012).** Evaluation of cactus and hyacinth bean peels as natural coagulants. *International Journal of Environmental and Engineering.* (3). pp.1242-1246.

T

- **TKFS F.VM Oliveira. MTF De Souza. Geraldino H. VC Almeida. Fávoro SL. Garcia JC. (2015).** Optimization of coagulation-foculation process for treatment of industrial textile wastewater using Okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops Products*. (76). pp.538-544.
- **Tombacz E. Nyilas T. Libor Z. Csanaki C. (2004).** Surface charge heterogeneity and aggregation of clay lamellae in aqueous suspensions. *Progress in Colloid and Polymer Science*. (125). pp. 206-215p.
- **Türker OC. Baran T. (2017).** Evaluation and application of an innovative method based on various chitosan composites and *Lemna gibba* for boron removal from drinking water. *Carbohydrate Polymers*. (166). pp.209-218.
- **Tsai WT. Hsu HC. Su TY. Lin KY. Lin CM. Dai TH. (2007).** The adsorption of cationic dye from solution onto acid-activated andesite. *Journal of Hazardous Materials*. (147). pp.1056-1062.

U

- **Ullah S. Rathnasiri RPG. (2015).** Optimization of adsorption-coagulation process for treatment of palm oil mill effluent (pome) using alternative coagulant. *International Research Symposium on Engineering Advancements*.pp.68-70.

W

- **Wibowo S. Velazquez G. Savant V. Torres JA. (2005).** Surimi wash water treatment for protein recovery: effect of chitosan–alginate complex concentration and treatment time on protein adsorption. *Bioresource Technology*. (96). pp.665-671.
- **Wang D. Wei W. Yi Yu. Hongxiao T. Gregory J. (2004).** Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. (243). pp.1-10.

Y

- **Ymottot. (2000).** Texte de la 279^o conférence de l'université de tous les savoirs.

- **Yin CY. (2010).** Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. (45). pp.1437-1444.
- **Yang R. Haijiag L. Huang M. Yang H. Li A. (2016).** A review on chitosan based flocculants and their applications in water treatment. *Water Research*. (95). pp.59-89.

Z

- **Zongo I. (2009).** Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application de traitement de deux effluents textiles et un effluent simulé de tannerie. Thèse de Doctorat en Génie Des procédés et de produit. Institut national polytechnique. Lorraine.
- **Zahrim AY. Tizaoui C. Hilal N. (2011).** Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: a review. *Desalination*. (266). pp.1–16.
- **Zaidi NS. Muda K. Liew WL. Sgawi MS. (2019).** Potential of fruit peels in becoming natural coagulant for water treatment. *International Journal of Integrated Engineering*. (11). pp.140-150).