

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques



Département agronomie



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité: eau et environnement

Thème

**Etude de deux méthodes de la coagulation
floculation : la biocoagulation et
l'électrocoagulation**

Réalisé par :

- SLIMANI Dalila
- SOUFI Ouissem

sous la direction de :

M^{me} BERROUANE. N
MR METAHRI. S
MR LOUCIF. S

Présenté devant le jury :

MR MOUALEK

Président de jury

Maître de conférences classe (A) UMMTO.

MR BERRADJ. O

Examineur

Maître de conférences classe (A) UMMTO.



Promotion : 2021





REMERCIEMENTS

***EN TOUT PREMIER LIEU, ON REMERCIE LE DIEU, TOUT PUISSANT, DE NOUS AVOIR
DONNE LA FORCE ET L'AUDACE POUR DEPASSER TOUTES LES DIFFICULTES.***

***NOUS TENONS A EXPRIMER NOTRE PLUS HAUTE ESTIME A NOTRE PROMOTEUR
MR METAHRI POUR NOUS AVOIR ENCOURAGES ET ORIENTES.***

***NOUS REMERCIONS ET EXPRIMONS NOTRE PROFONDE GRATITUDE A MME
BERROUANE. N NOTRE CO-PROMOTRICE DE MEMOIRE POUR SA GENTILLESSE,
SES CONSEILS, SON ESPRIT, SON SOUTIEN ET DE NOUS AVOIR GUIDE DANS NOTRE
TRAVAIL ET SURTOUT DE NOUS AVOIR PROPOSE CE BON ET INTERESSANT THEME DE
NOTRE RECHERCHE.***

***NOUS ADRESSONS NOS REMERCIEMENTS A NOTRE ENCADREUR AU NIVEAU DE
CENTRE DE DEVELOPPEMENT ET DE TECHNOLOGIE AVANCE (CDTA) À ALGER.***

NOUS TENONS A REMERCIER LES MEMBRES DE JURYS.

***ENFIN, NOUS REMERCIONS, TOUTES LES PERSONNES QUI NOUS AVONS ENCOURAGE
ET SOUTENU DE PRES OU DE LOIN DURANT LA REALISATION DE CE TRAVAIL.***

Dédicace



A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers grands parents, pour leurs invocations

A mes aimables sœurs : Sabrina, Nassima, Nadia pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon frère, Mohamed, pour son encouragement,

A mes petits neveux : Lyna, Aksil, Massilia

A mon oncle : Rezak

A ma meilleure amie : Amina

Dalila

Dédicace



Il existe dans le monde des êtres chers, à qui nous leur devons presque tout, et qui comptent beaucoup pour nous et rien ne pourrait être accompli pour leur rendre tout ce qu'ils nous ont apporté dans la vie. Je voudrais dédier ce modeste travail à :

Ma mère, Qui m'a toujours soutenue dans les moments critiques auxquels j'ai été confrontée. Ce travail est sans doute le résultat de ton encouragement pour continuer mes études. Que Dieu t'accorde longue vie et santé pour que tu sois heureuse et très fière de moi.

Mon père, qui n'a jamais cessé de croire en moi. Toi qui a sacrifié et souffert les plus belles années de ta vie pour me voir un jour réussir. Je prie Allah pour qu'il vous garde et protège.

A mes chères sœurs Maïssa et Roufaïda et mon frère Islem.

Et à l'ensemble des étudiants de la promotion master 2 « Eau et environnement ».

Je rends grâce à Allah le Tout-Puissant de m'avoir donnée la santé, le courage et la force pour mener ce travail au bout.

Ouissam

Sommaire

Introduction

Chapitre I : généralité sur la Coagulation-floculation

I-1- Introduction.....	5
I-2 Particules présents dans l'eau.....	5
□ Colloïdes.....	5
□ Matières en suspensions (MES).....	6
□ Matières dissoutes.....	6
I-3- Coagulation-floculation.....	6
I-3-1- Coagulation	7
I-3-2-Mécanisme de coagulation.....	7
I-3-3-Choix du coagulant.....	8
I-4-Principe de base de la floculation	9
I-4-1- Particules déstabilisées.....	9
I-4-2-Mécanisme de floculation	9
I-5-Facteurs influençant la coagulation-floculation.....	10
I-5-1-Influence du potentiel hydrogène pH	10
I-5-2-Influence des Sels dissous	10
I-5-3-Influence de la Température	10
I-5-4-Influence de la turbidité.....	11
I-5-6-Influence du coagulant.....	11
I-5-7-Influence de la couleur.....	12
I-5-8-Influence de l'agitation.....	12
Chapitre II : biocoagulation	
II-1-Introduction	14
II-2- Coagulants inorganiques (chimiques)	14
II-2-a-Sels d'aluminiums.....	15

II-2-b-Sels de fer.....	15
II-3-Coagulants organiques (naturel)	16
II-3-a- Cactus (Opuntia ficus indica).....	16
II-3-b-Tanfloc (tanin).....	17
II-3-C- Moringa oleifera.....	19
II-3-d- Chitine et Chitosane	21
Chapitre III : ELECTROCOAGULATION	
III-1 Introduction	24
III-2- Historique	24
III-3-Mécanisme d'électrocoagulation	25
III-4-Types d'électrodes	26
III-4-1-Électrode en Aluminium.....	26
III-4-2-Électrode en Fer	27
III-4-3-Électrode en cuivre	27
III-5-Cellule d'électrolyse.....	28
III-6-Configuration des électrodes.....	29
III-7-Principales lois d'électrolyse.....	30
III-8-Paramètres influençant l'efficacité d'électrocoagulation	32
III-8 -1- Intensité de courant.....	32
III-8-2- Effet de potentiel hydrogène (Ph).....	33
III-8-3- Effet de la conductivité de la solution.....	33
III-8-4- Influence de l'écart entre les électrodes.....	34
III-9-Avantages et inconvénients du processus d'électrocoagulation.....	34
Chapitre IV : matériels et méthodes	
IV-1 Objectif de l'étude	38
IV-2 Zone et durée de l'étude.....	38
IV-3 Etude de la bio coagulation.....	39

IV-3.1 Protocole expérimentale	39
IV-3-1-1 Matériel utilisé.....	39
IV-3-1-2 Produits utilisés.....	40
IV-3-2 Préparation des coagulants.....	40
IV-3-2-1 Cactus.....	40
IV-3-2-2 Tanin	41
IV-3-2-3 Moringa Oleifera.....	42
IV-4 Jar test.....	43
IV-5 Electrocoagulation.....	44
IV-5-1 Présentation de Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).....	44
IV-5-2 Matériels utilisés.....	45
IV-5-3 Déroulement de l'expérience.....	46
Chapitre V : Résultats et Discussions	
V-1- Caractéristiques de l'eau étudiée.....	49
V-2- Biocoagulation.....	49
V-2-1 -Détermination de la dose optimale des coagulants.....	49
V-2-1-a-Tanin.....	49
V-2-1-b-Cladode de Cactus.....	50
V-2-1-c-Moringa Oleifera (graines).....	51
V-2-1-d- Moringa Oliefera (feuille).....	51
V-2-1-e- Sulfate d'Aluminium.....	52
V-2-2-Taux d'abattement de la turbidité avec les coagulants organiques et inorganiques.....	53
V-3 Electrocoagulation.....	55
V-3-1-Etude du traitement électrochimique de la turbidité.....	55
V-3-2 Paramètres retenus.....	55

V-3-3-Influence du temps de traitement et de la DDP.....	58
V-3-3-a- Pour la couleur.....	59
V-3-3-b-Évolution du pH en fonction de la tension électrique.....	60
V-3-3-c- Pour la résistivité.....	60
V-3-4- Effet du matériau de l'anode sur la performance de l'électrocoagulation.....	60
IV-3- 5- Ions formés pour chaque électrode.....	61
V-3-6- Taux d'abattement de la turbidité par électrocoagulation.....	63
Annexes.....	66
Conclusion générale.....	70
Résumé	

Liste des abréviations

BTX : Toluène, Benzène et Xylène

CDTA : centre de développement et de technologie avancé

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en oxygène

DDP : Différence de potentielle

EC : Electrocoagulation

F : Constante de Faraday

Hf : FluorHydrique acide

I : Intensité de courant imposée

MES : Matière En Suspension

MO : Moringa Oliefera

M : la masse moléculaire de l'espèce considérée

MOD : matière organique dissout

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OMS : Organisation Mondial de la Santé

pH : potentiel d'Hydrogène

Q : la charge électrique

U : est la tension aux bornes des électrodes

V : volt

z : la valence de l'ion formé

Liste des figures

Figure1 : Charge électrique des colloïdes	6
Figure 2 : Processus de coagulation-floculation	7
Figure3 : Stabilisation des colloïdes.....	8
Figure 4: Mécanisme de la floculation.....	9
Figure 5 : Morphologie d'Opuntia Ficus Indica	16
Figure 6 : Structure du Cactus.....	17
Figure 7 : Extrait du tanin.....	18
Figure 8 : Monomère de la molécule de Tanfloc.....	19
Figure 9 : les parties de la plante de Moringa Oleifera.....	20
Figure 10 : Structure de la Chitine et du Chitosane.....	22
Figure 11 : Schéma du principe de l'électrocoagulation.....	26
Figure 12 A: Configuration des électrodes monopolaire.....	30
Figure 12 B: configuration des électrodes bipolaire.....	30
Figure 13 : Eau de surface du barrage Taksebt.....	38
Figure 14 : Matériel utilisé.....	40
Figure 15 : Etapes de préparation du bio coagulant à base de cladode de cactus.....	41
Figure 16 : Etapes de préparation du bio coagulant à base de tanin.....	42
Figure 17 : Préparation de bio coagulant Moringa Oleifera a base des graines.....	42
Figure 18 : Préparation de bio coagulant Moringa Oleifera a base de feuilles.....	43
Figure 19 : Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).....	44
Figure 20 : Réacteur électrochimique.....	45
Figure 21 : pH mètre.....	46
Figure 22 : Ultrason.....	46
Figure 23 : Les différentes électrodes utilisées.....	47
Figure 24 : Taux d'abattement de la turbidité avec les coagulants organiques et inorganiques.....	53
Figure 25 : Couleur des eaux traitées avec les différentes électrodes.....	61
Figure 26 : Formation des bulles d'air.....	61

Liste des figures

Figure 27 : Electrode en Aluminium avant et après traitement.....	62
Figure 28 : Electrode en acier inoxydable avant et après traitement.....	62
Figure 29 : Electrode en Cuivre avant et après traitement.....	63
Figure 30: Taux d'abattement de la turbidité pour chaque type d'électrode.....	63

Liste des figures

Tableau 1 : Diamètres des particules	5
Tableau 2 : Caractéristiques de l'eau brute étudiée.....	49
Tableau 3 : Dose optimale de tanin.....	49
Tableau 4 : Dose optimale de cactus.....	50
Tableau 5 : Dose optimale de Moringa Oleifera (graines).....	51
Tableau 6 : Dose optimale de Moringa Oleifera (feuilles).....	51
Tableau 7 : Dose optimale de Sulfate d'Aluminium.....	52
Tableaux 8 : Résultat obtenu avec l'électrode d'Aluminium	56
Tableaux 9 : Résultat obtenu avec l'électrode de Fer	57
Tableaux 10 : Résultat obtenu avec l'électrode de Cuivre.....	57

Introduction

Introduction

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus importantes pour la survie de l'humanité et le développement socio-économique des nations (Ammar et al., 2017). La faible pluviométrie a fait que l'Algérie est classée sur la liste des pays pauvres en eaux, et le danger de pénurie ne cesse de nous getter au fil du temps risquant de provoquer une sécheresse qui pourrait menacer l'équilibre écologique de la région. A cet effet, la gestion et le traitement des ressources en eaux superficielles doivent être un souci majeur. Depuis de longues années, les autorités du pays se sont orientées vers la construction des barrages (Achour et al ., 1997).

La qualité de l'eau a toujours été un facteur important pour assurer le bien-être humain. Actuellement, la pollution de l'hydrosphère est un des problèmes environnementaux les plus graves qui est due pour une grande partie à l'activité humaine. Dans les pays développés et ceux en voie de développement, la qualité de cet élément vital est en détérioration à cause des déchets des industries chimiques déversés dans la nature (Assad ; 2006).

Pour garantir une bonne qualité des eaux de barrage, nous devons trouver des techniques de traitements adéquats qui doivent assurer une bonne efficacité de traitement. Les méthodes traditionnelles ne répondent pas toujours à cette exigence, elles sont aussi très onéreuses ; pour cela le recours à de nouveaux procédés prometteurs et moins couteux est à entreprendre (Alem ; 2016).

Le procédé de coagulation/floculation constitue la colonne vertébrale de la plus part des procédés de traitement des eaux et les unités développées de traitement des eaux usées. Il est à présent admis que l'optimisation de la coagulation floculation au cours de la clarification d'une eau de surface peut contribuer d'une façon remarquable à éliminer la matière organique aussi bien sous sa forme colloïdale (turbidité) que dissoute (Khellouf, 2020 ; Achour et al., 1997).

Pour ce faire, plusieurs procédés de traitement sont mis en œuvre : la biocoagulation et la coagulation électrochimique sont des techniques utilisées particulièrement pour le traitement des eaux de surface.

Dans ce cadre et pour une vraie stratégie de développement durable de l'environnement, nous nous sommes intéressées à la valorisation des nouveaux produits naturels biodégradables et aussi la valorisation de la technique électrochimique, en tant que coagulant avantageux dans le procédé de traitement physico-chimique et électrochimique 'coagulation-floculation'.

Introduction

L'utilisation des coagulants naturels a été privilégiée ces dernières années, car il a été bien compris que ces biocoagulants naturels sont écologiquement et économiquement plus acceptables que les coagulants chimiques connus par leur toxicité et leurs risques pour la santé humaine (Troubles neurologiques tels que l'encéphalopathie par dialyse, et la maladie d'Alzheimer). Les biocoagulants préparés à partir de plantes telles que *Moringa Oleifera* (MO), *Opuntia Ficus indica* (cactus) et *Tanin* (*Acacia Mearnsii*) sont avérés plus bénéfiques que les coagulants chimiques en raison de leur faible toxicité, de leur biodégradabilité et de leur moindre production de boues (Zhang et al., 2012 ; Kapse ; 2021).

D'autre part, l'électrocoagulation est une technique de traitement de l'eau polluée (de surface et usées) qui a montré son efficacité pour le traitement de certains polluants solubles ou colloïdaux, tout en produisant de l'électricité (Par la production de l'hydrogène) ce qui permet de compenser le coût opérationnel (Stichnothe ; 2010). Contrairement à la coagulation chimique, il n'y a pas de pollution secondaire en raison du zéro ajout de coagulant chimique (Garcia-Segura et al., 2017). Cela garantit aussi qu'il n'y aura pas de processus supplémentaires pour neutraliser l'excès de dosage ajouté dans l'eau. En plus, le processus d'électrocoagulation génère des gaz en tant que sous-produits. Des bulles de gaz sont produites lors de l'électrocoagulation et aident à la flottation des polluants à la surface de l'eau (Bazrafshan et al ; 2015).

Le matériau constituant les électrodes influence visiblement la performance du réacteur d'électrocoagulation. Il détermine la nature du cation introduit en solution. Plusieurs chercheurs ont étudié l'incidence du matériau de l'électrode avec diverses théories. Les plus communes des électrodes sont des plaques d'aluminium, de fer ou de cuivre, en raison de leur faible coût, de leur disponibilité et de leur efficacité (Novikova et al., 1982).

L'un des objectifs de notre travail est de mettre en évidence sur les eaux de barrage l'efficacité des nouveaux coagulants naturels biodégradables, grâce à une étude comparative avec le coagulant chimique le plus utilisé dans le traitement des eaux (Sulfate d'aluminium). Le second objectif est d'évaluer la méthode de la coagulation électrochimique (EC). Le troisième objectif est de comparer les résultats obtenus avec les biocoagulants et les trois types principaux d'électrodes pour un même effluent. En effet, paradoxalement on trouve des dizaines d'articles décrivant le traitement des eaux de surface variés par des électrodes en fer ou en aluminium ou en cuivre mais très peu comparent les résultats obtenus avec les trois électrodes pour des effluents identiques (Ehsan , 2012).

Introduction

Ce manuscrit est structuré autour de deux parties suivis d'une conclusion générale. La première partie dédiée à la recherche bibliographique est divisée en deux chapitres : le premier concerne la coagulation biologique, le deuxième chapitre présente la coagulation électrochimique. La seconde partie est dédiée à l'expérimentation est divisée en deux chapitres : le premier est consacré à la description du matériel utilisé et la méthodologie suivis et le deuxième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus, discutés et interprétés. Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralité sur la Coagulation-floculation

Chapitre I : Généralité sur la coagulation-floculation

I-1- Introduction

La coagulation et la floculation sont deux processus couramment utilisés dans le traitement de l'eau pour éliminer les matières en suspension indésirables dans l'eau. Cependant, ils peuvent être couramment adoptés pour déstabiliser tout système de suspension.

La coagulation floculation est un processus chimique dans lequel la chimie d'une suspension doit être modifiée afin de provoquer la sédimentation des particules. Par conséquent, cela nécessite l'ajout d'un coagulant chimique ou organique. Le coagulant réagit avec les particules ou les colloïdes de la suspension et déséquilibre sa charge chimique, en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par le système de décantation (moise desire dihang ; 2017).

I-2 Particules présents dans l'eau

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter sous les trois états suivants (tableau1):

Tableau1 : diamètre des particules (projet IRE. 2004)

Diamètre des particules (micromètre)	Etat	Exemple
< 0,001	Dissous	exp : solution d'un sel dissous
0,001 à 1	Colloïdal	Oxydes et hydroxydes Argile Huiles et graisses Bactéries
> 1	Solides décantables	Limon Sables Pollen

- ❖ **Colloïdes** : présentent un diamètre compris entre 1 μm et 1 nm. Ils possèdent deux autres caractéristiques très importantes. Leur rapport surface/volume leur confère des propriétés d'adsorption des ions présents dans l'eau. . Ce phénomène explique en

Chapitre I : Généralité sur la coagulation-floculation

partie l'existence de charges électriques à leur surface (figure1). Ces charges, souvent négatives, engendrent des forces de répulsion inter colloïdales (Van Der Waals)

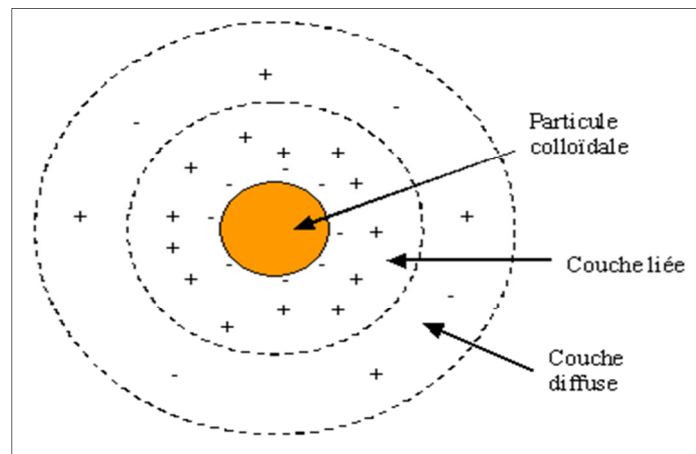


Figure1 : la charge électrique des colloïdes (Bessedik ; 2018)

- ❖ **Matières en suspensions (MES)** : c'est l'ensemble des particules solides minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée. Elles indiquent la présence dans la colonne d'eau des particules plus grosses que $0,45 \mu\text{m}$ (Degrémont (1 988)).
- ❖ **Matières dissoutes** : ce sont des sels inorganiques et les petites quantités de matières organiques qui sont dissoutes dans l'eau (Degrémont ; 1988).

I-3- Coagulation-floculation

La coagulation-floculation facilite l'élimination des MES et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration (figure 2). C'est 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 colloïdale (Alem ; 2016).

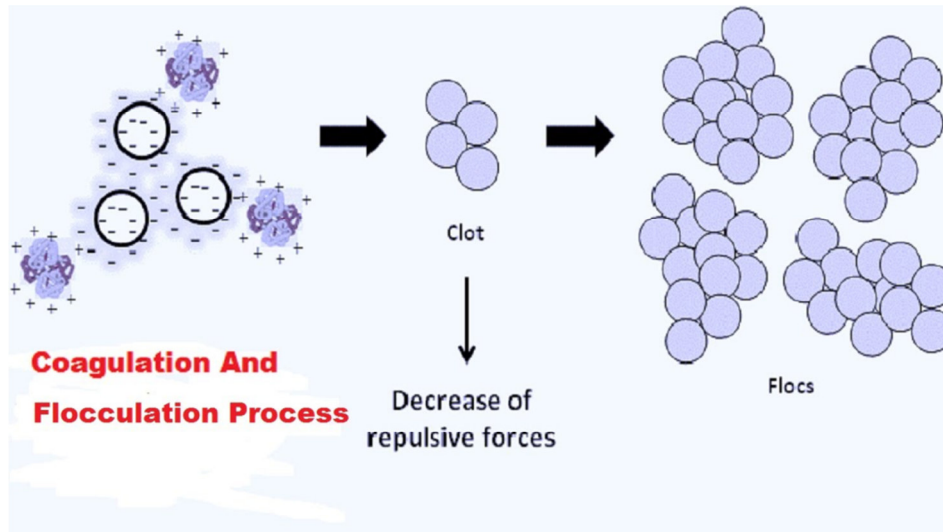


Figure 2 : Processus de coagulation-floculation (Hindi ; 2020).

I-3-1- Coagulation

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 à déstabiliser des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives, pour ce faire on utilise des réactifs chimiques nommés coagulant (Valiron F ; 1989).

Les coagulants sont des produits capables de neutraliser les charges des colloïdes présents dans l'eau, le choix du coagulant pour le traitement de l'eau de consommation doit tenir compte de l'innocuité du produit, de son efficacité et de son coût (Valiron F, 1989).

Le type de coagulant et la dose ont une influence sur (Benefield ; Judkins et Weand 1982 ; Desjardins ; 1988) :

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

I-3-2-Mécanisme de coagulation

La stabilité et donc l'instabilité des particules en suspension dépendent de différentes forces répulsives et attractives (SNF SAS. 2005).

Chapitre I : Généralité sur la coagulation-floculation

- Les forces d'attraction de Van der Waals,
- Les forces de répulsion électrostatiques,
- L'attraction universelle,
- Le mouvement Brownien

Afin de déstabiliser une suspension colloïdale, la coagulation agit sur : la neutralisation des charges et les mécanismes de pontages (figure 3) (FLOPAM™ et FLOQUAT™ ; 2005).

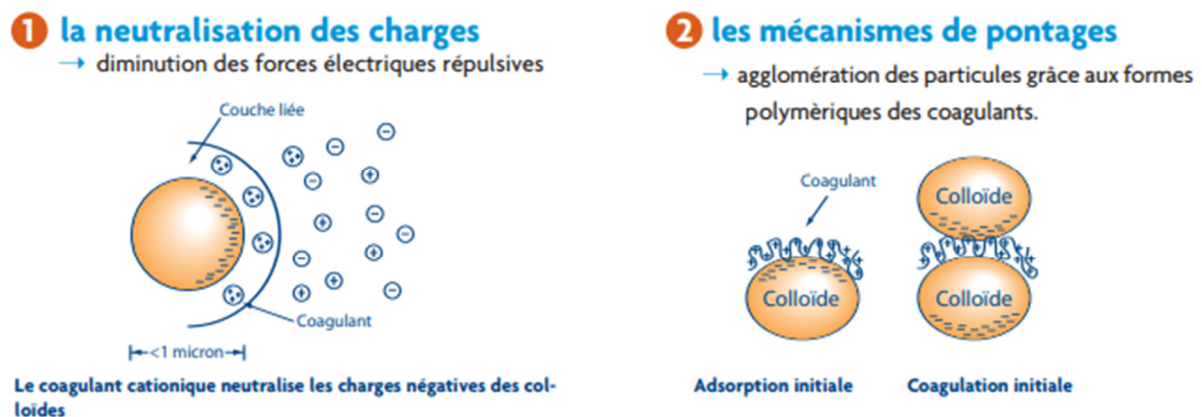


Figure3 : Stabilisation des colloïdes (FLOPAM™ et FLOQUAT™ ; 2005)

Dans le cas de la coagulation, la charge cationique apparaît comme étant plus importante que le poids moléculaire. En effet, la charge cationique des coagulants assure la neutralisation des charges de surface, des colloïdes en suspension et facilite ainsi leur déstabilisation et agglomération (SNF SAS. 2005).

I-3-3-Choix du coagulant

Un certain nombre de paramètres doivent être pris en compte pour le choix du coagulant à savoir (Benyoub et al ; 2014):

- Température de l'eau
- Caractéristiques des eaux brutes (dont l'équilibre calco-carbonique)
- Paramètres physico-chimiques à inclure ou éliminer prioritairement (turbidité– et/ou matières organiques, par exemple)
- Gestion de l'exploitation (stocks, automatisme, etc...)
- Coût du produit

Chapitre I : Généralité sur la coagulation-floculation

- Choix imposé ou "considération esthétique"

I-4-Principe de base de la floculation

L'étape de floculation ne peut être envisagée que sur une eau contenant des particules déjà déstabilisées ; elle est donc la suite logique de l'étape de coagulation (SNF SAS ; 2005).

I-4-1- Particules déstabilisées

L'origine des particules déstabilisées est très variée et dépend essentiellement de la provenance de l'eau à traiter. Elles peuvent être issues d'une étape de coagulation préliminaire. La charge positive (+) ou négative (-) apportée par le flocculant sera sélectionnée en fonction du type de particules déstabilisées présentes dans l'eau. D'une manière générale, elle peut être (SNF SAS. 2005).

- Plus ou moins anionique pour les particules minérales
- Plus ou moins cationique pour les particules organiques.

I-4-2-Mécanisme de floculation

Les flocculants de par leur très haut poids moléculaire (longue chaîne de monomères) et leur charge, fixent les particules déstabilisées et les rassemblent sur leur chaîne. Il va s'en suivre un grossissement de la taille des particules présentes dans la phase aqueuse. Cette étape de formation des floccs est appelée floculation (figure 4).

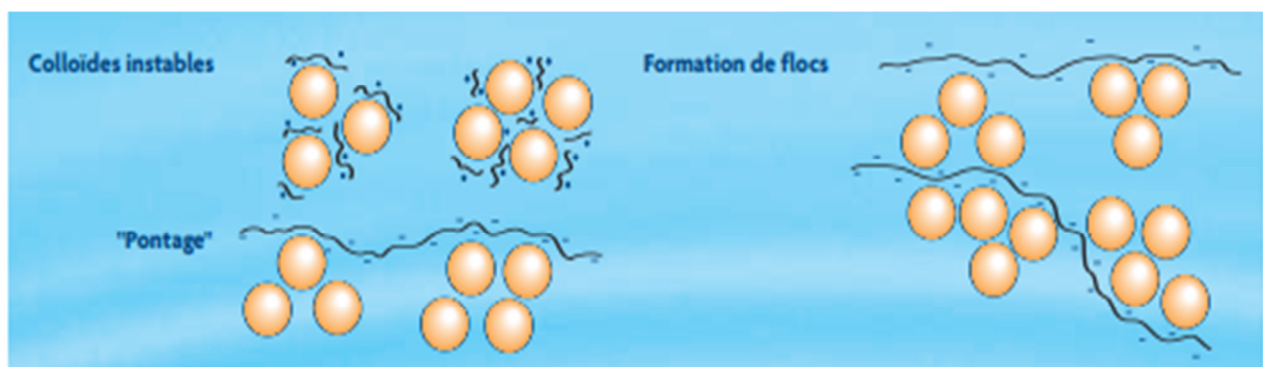


Figure 4: Mécanisme de la floculation (SNF SAS ; 2015).

Les types de liaison entre les particules et le flocculant sont principalement des liaisons ioniques et des liaisons hydrogènes (SNF SAS ; 2015).

I-5-Facteurs influençant la coagulation-floculation

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, la couleur, grosseurs et concentration des particules colloïdales, et l'hydratation. Ces interrelations complexes interdisent actuellement toute approche théorique permettant de prédire quelle sont les concentrations optimales de coagulants (Alem ; 2016).

I-5-1-Influence du potentiel hydrogène 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 a lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Lorsque la coagulation se produit hors de cette plage optimale, il faut soit augmenter la quantité de coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité (Desjardins ; 1997). Pour les sels de fer et d'aluminium, les plages de pH optimales s'étendent respectivement de 4 à 6 et de 5 à 7. Pour certaines eaux, il faut parfois corriger le pH à l'aide de divers produits (acides, chaux ou soude). Pour abaisser le pH, il est plus avantageux, dans certains cas, d'augmenter la quantité de coagulant. Lorsque le pH est optimal, les produits solubles d'aluminium ou de fer sont pratiquement inexistantes (Ezziane ; 2007).

I-5-2-Influence des Sels dissous

Les sels contenus dans une eau influent sur la coagulation et la floculation par la (Desjardins ; 1997) :

- modification de la plage de pH optimale
- modification du temps requis pour la floculation
- modification de la quantité de coagulant requis
- modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

I-5-3-Influence de la Température

Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité, c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc. De plus, pour une même vitesse de

Chapitre I : Généralité sur la coagulation-floculation

filtration, les forces de cisaillement qui s'exercent sur le floc sont plus importantes, ce qui en favorise le bris et l'entraînement dans le filtre. Pour y remédier il faut (Hernandez ; 2016):

- Effectuer la coagulation dans la plage de pH optimale pour cette eau à cette température.
- Augmenter la quantité de coagulant, ce qui a pour effet d'accroître la probabilité de collisions entre les particules et d'élargir la plage de pH optimale.
- Augmenter la turbidité de l'eau (par addition de glaise), afin d'alourdir le floc, ou on ajoute un aide- coagulant (silice activée ou polyélectrolyte) pour alourdir et renforcer le floc.

I-5-4-Influence de la turbidité

La turbidité est un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation (Hernandez ; 2016). Elle est principalement due à la présence de particules de diamètre de 0.2 à 0.5 μm . Il s'agit donc de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer naturellement (Hernandez ; 2016).

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 (Ammar et al., 2010)

I-5-6-Influence du coagulant

Le choix du coagulant influence les caractéristiques de la coagulation, autrement dit, les finalités de traitement, même si l'alun 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).

I-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 les 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. La quantité de coagulant requise est fonction de la couleur initiale, pour un pH optimale la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisé. Le pH optimale pour éliminer la couleur varie entre 4 et 6 (Desjardins, 1997).

I-5-8-Influence de l'agitation

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

La première étape c'est l'agitation énergique rapide de courte durée (cinq minutes au maximum). Elle a pour but de favoriser la dispersion et l'homogénéisation des produits injectés dans la totalité du volume d'eau à traité ; mais une agitation intense peut empêcher l'agrégation des particules.

La deuxième étape c'est l'agitation lente (30 à 60 min) et elle a pour but de provoquer les contacts entre les particules pour former des floccs décantables (Bachi et al., 2005).

Chapitre II : Biocoagulation

II-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. 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 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 (Ghanem, Sai, 2020).

II-2- Coagulants inorganiques (Commerciales)

La coagulation chimique est le processus qui consiste à déstabiliser les impuretés colloïdales présentes dans l'eau ou les eaux usées en utilisant des substances produites chimiquement. Le processus de formation de floccs lors de la neutralisation de la charge est connu sous le nom de floculation (Hamawand, 2015). L'aluminium, sulfate d'aluminium (Quintero-Jaramillo et al.; 2016), le potassium sulfate d'aluminium, chlorure de fer (III) hexahydraté, sulfate ferrique (Karamany, 2010) peuvent être utilisés en tant que coagulants pour le traitement de l'eau et des eaux usées.

Chapitre II : Biocoagulation

II-2-a-Sels d'aluminiums

Les sels d'aluminium commerciaux sont généralement caractérisés par leur teneur en aluminium, exprimée en % Al_2O_3 (représentative de la matière active contenue) et par la basicité du produit exprimée par le rapport molaire $(\text{OH}^-) / 3 (\text{Al}^{3+})$ (représentative du degré de polymérisation des ions aluminium). La réaction de base, lors de l'ajout d'un sel d'aluminium dans une eau, est la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium et la libération d'acide (Mottot ; 2000).



Les principaux produits commercialisés sont :

- Le sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$
- L'aluminate de sodium NaAlO_2

Le sulfate d'aluminium reste le produit le plus utilisé, mais il est peu à peu déplacé par des polymères minéraux plus performants (Mottot; 2000).

II-2-b-Sels de fer

Les sels ferriques, plus chargés, ont un meilleur pouvoir coagulant que les sels ferreux. Comme pour les sels d'aluminium, des espèces polycondensées apparaissent au cours du traitement, et sont fortement dépendantes du pH. L'utilisation d'un sel ferrique à dose élevée induit souvent une coloration rouille de l'eau traitée : c'est le principal inconvénient de ces produits. Les sels de fer commercialisés en traitement des eaux sont principalement (Mottot 2000):

- Le chlorure ferrique $\text{FeCl}_3, 6 \text{H}_2\text{O}$
- Le sulfate ferrique $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 9 \text{H}_2\text{O}$
- Le sulfate ferreux $\text{FeSO}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$.

L'utilisation de coagulants chimiques pour la coagulation des eaux usées et les eaux de surfaces ont diverses implications telles que leur potentiel à provoquer des maladies (OMS 2010), la possibilité d'une contamination des eaux souterraines ou le ruissellement de surface des eaux traitées contenant une forte concentration d'aluminium résiduel, et donc leur utilisation pour le traitement des eaux usées n'est pas une option écologique. D'autre part,

Chapitre II : Biocoagulation

l'utilisation de substances naturelles pour la coagulation au lieu de produits chimiques est une alternative prometteuse pour le traitement des eaux de surfaces et les eaux usées (Gautam et al.; 2020).

II-3-Coagulants organiques (naturel)

Les risques potentiels pour l'environnement et la santé humaine associés à l'utilisation de coagulants chimiques a rendu nécessaire l'utilisation de coagulants naturels pour le traitement des eaux usées et les eaux de surfaces. Les coagulants naturels gagnent beaucoup d'attention de nos jours car ils constituent une alternative efficace aux coagulants chimiques (Yin ; 2010). Les coagulants naturels constituent une approche durable (Folkard et al ; 1995), les matériaux à base de plantes ont été étudiés pour le traitement des effluents industriels de différentes industries. Les substances à base de plantes comme *Moringa Oleifera* (Chonde et Raut, 2017 ; Sivakumar, 2013), le chitosan et la chitine, *Opuntia ficus-indica* (cactus), *Prosopis laevigata* Seed Gum, *Hibiscus rosasinensis* (Awang et Aziz, 2012), *Acacia mearnsii* (Beltrán-Heredia et al., 2011), etc, peuvent être utilisés comme coagulants. Généralement, les coagulants naturels sont directement utilisés sous forme de poudre ou de solution mère (Gautam et Saini ; 2020).

II-3-a- Cactus (*Opuntia ficus indica*)

Opuntia ficus indica est une espèce de cactus cultivé dans différentes parties du monde avec différents habitats et des climats différents (figure 5). L'*Opuntia ficus* a un énorme potentiel pour traiter les eaux usées et les eaux de surface (Bogacki et al, 2011; Gautam et Saini; 2020).

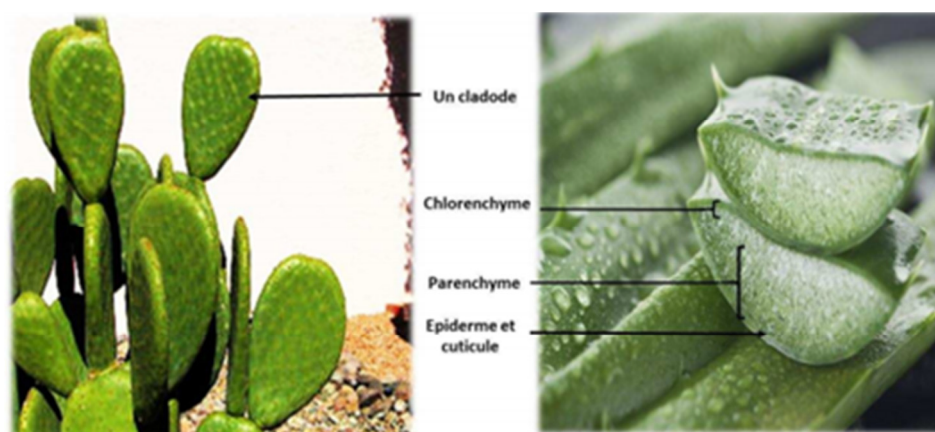


Figure 5 : Morphologie d'*Opuntia Ficus Indica* (Bouaouine ; 2018).

Chapitre II : Biocoagulation

L'Opuntia est une plante qui a le potentiel d'être utilisée comme biocoagulant naturel car elle possède toutes les qualités souhaitées d'un biocoagulant. Les parties internes et externes de l'Opuntia peuvent être extraites pour le traitement des eaux usées et les eaux de surface. Il a été signalé que la capacité de coagulation élevée de l'Opuntia est très probablement attribuée à la présence de mucilage, qui est visqueux, et à la présence d'hydrates de carbone complexes dans les parties interne et externe du cactus qui ont une grande capacité de rétention d'eau (Edzwald et Drinking ; 2015).

Les hydrates de carbone (figure 6) tels que le L-arabinose, le D-galactose, le L-rhamnose, le D-xylose et l'acide galacturonique sont identifiés sur la base des recherches précédentes (Yin, Chun-Yang ; 2010). Certains chercheurs ont rapporté que l'acide galacturonique est l'ingrédient actif possible qui favorise la coagulation actif qui soutient la capacité de coagulation de l'Opuntia (Sáenz, et al ; 2019; Sethu1 et al ; 2019).

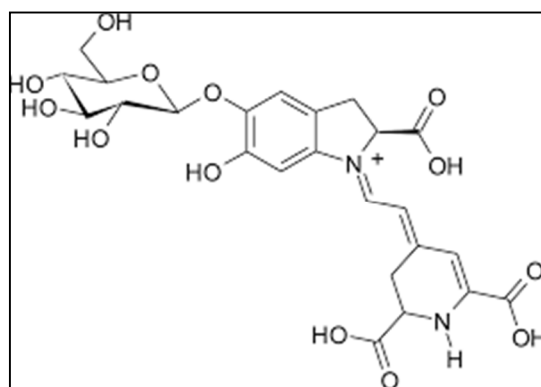


Figure 6 : Structure du Cactus (Ghédiraet Goetz ; 2018)

La recherche a montré que l'Opuntia ficus indica en poudre est très efficace pour éliminer la turbidité et la DCO des eaux usées, les efficacités d'élimination de la turbidité obtenue varient entre 70% et 85%. Et que le dosage du cactus ne fait pas varier le pH de l'eau traitée, l'ajustement du pH n'est pas nécessaire après traitement des eaux usées. La DCO après traitement est dans la fourchette des normes d'élimination ($DCO \leq 250$ mg/litre) (INCEEE ; 2019)

II-3-b-Tanfloc (tanin)

Dans le traitement de l'eau, et plus précisément en coagulation, les tanins désignent généralement les coagulants naturels produits à partir d'extrait de tanin. Les tanins sont des composés phénoliques, issus du métabolisme des plantes. Certaines plantes, telles que

Chapitre II : Biocoagulation

l'Acacia mearnsii (espèce de Mimosa), Schinopsis balansae (ou Quebracho), et certaines espèces de chêne sont cultivées spécialement pour leur tanin, il existe deux types de tanins : les tanins hydrolysables et les tanins condensés encore appelés flavonoïdes (Pizzi ; 2008). Ils se différencient entre autres par leur chaîne moléculaire (figure 7), leurs groupements fonctionnels, leurs applications chimiques (production de vin, de cuir, de produits pharmaceutiques, etc.) (Haslam ; 1989).

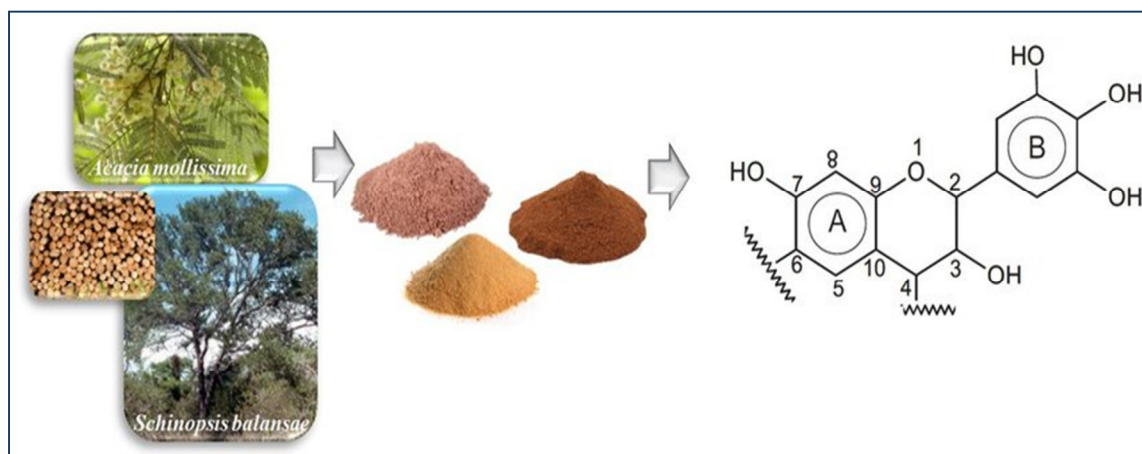


Figure 7 : Extrait du tanin (Delgado-Sánchez ; 2017).

Le tanin condensé est utilisé pour la production de coagulants naturels commercialisés tels que le Tanfloc et le Silvafloc (Sánchez-Martín et al ; 2010) ; le tanin hydrolysable est également source de production de coagulants naturels commercialisés tels que le Valonia (Özacar et al ; 2003).

Le Tanfloc est produit à partir d'extrait de tanin condensé d'Acacia mearnsii (une plante tropicale cultivée au Brésil) selon la réaction de Mannich (Cummings, et al. 1960, Vollhardt, et al. 2009), qui a pour objectif de polymériser le tanin et d'obtenir un coagulant cationique (Graham, et al. 2008). Selon le brevet du Tanfloc, il est issu de la réaction entre le formaldéhyde (CH_2O), le chlorure d'ammonium (NH_4Cl) et le flavan-3-ol (tanin condensé). Le monomère du produit obtenu est présenté dans la Figure 8 (Lamb, et al. 2002).

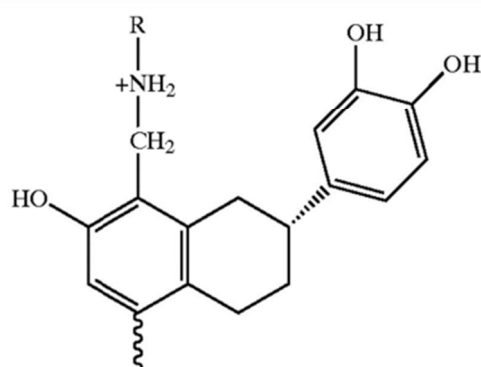


Figure 8 : Monomère de la molécule de Tanfloc (Lamb et al ; 2002)

Ce monomère se répète plusieurs fois, pour former le polymère qu'est la molécule de Tanfloc. Contrairement aux coagulants inorganiques tels que le sulfate d'aluminium, son efficacité ne serait pas altérée par la variation de pH à cause de cette amine quaternaire (Lamb, et al. 2002).

II-3-C- *Moringa oleifera*

- **Origine et nomenclature de l'arbre de *Moringa Oleifera***

Moringa Oléifera est originaire des régions d'Agra et d'Oudh, au nord-est de l'Inde, au sud de la chaîne de montagne de l'Himalaya (Meda ; 2011). Cette plante est connue dans 82 pays par 210 noms différents (Amjad et al ; 2015), en Inde par exemple c'est l'arbre miracle et en anglais on le connaît sous le nom de Horseradish tree (découlant du goût d'un condiment préparé à partir de ces racines), ou encore appelé drumstick tree (découlant de la forme de ces gousses) ou bien never die (qui ne meurt jamais). Au Soudan, il est connu sous le nom de Shagara al Rauwaq qui signifie l'arbre purificateur (Louni ; 2009).

- **Culture**

La plante *Moringa Oléifera* 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 haut 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). Les fruits de la plante *Moringa Oléifera* pendent des branches et constituent des gousses à trois lobes mesurant 20 à 60 cm de long. Les gousses sèches s'ouvrent en trois parties en libérant 12 à 35 graines de forme ronde (Hédji et al, 2014). Un arbre adulte de *Moringa* produit environ 200 à 250 gousses, soit 1 kg de gousse (Bidima, 2016), comme la figure 9 nous montre.

Chapitre II : Biocoagulation

Le Moringa peut se trouver dans des zones très arides comme le Sahara, mais il préfère les climats semi-tropicaux humides. Il peut s'accommoder à tout type de sol mais s'adapte mieux les collines et les bordures de rivières. Elle résiste bien à la sécheresse grâce à ses racines tubéreuses lui permettant d'accumuler de l'eau (Madi et al, 2012).



Figure 9 : les parties de la plante de Moringa Oleifera (C.G Sarah, T. Khadidja, 2017).

- **Coagulation avec les graines de Moringa :**

les graines de *Moringa oleifera* (MO) ont été recommandés et largement utilisés comme alternative efficace pour le traitement des eaux usées, notamment en Afrique et en Asie (Vunain, E et Rocha, VVF et al 2019). Les graines MO, en particulier, ont attiré une attention remarquable dans la communauté des chercheurs en raison de leur applicabilité en tant que coagulant et agent antimicrobien dans le traitement de l'eau et des eaux usées (Kansal, 2014 et Adelodun, 2019). Le MO offre une solution prometteuse pour le traitement des eaux usées avec un coût moindre, une disponibilité des matières premières et une efficacité plus élevée dans l'élimination des contaminants. De plus, les sous-produits sont respectueux de l'environnement par rapport à d'autres procédés ou techniques de traitement, y compris les méthodes de traitement biologique (Rocha, VVF, 2019. Bello, OS 2017).

Le traitement des eaux usées utilisant la MO est basé sur le processus de coagulation-floculation dans lequel l'élimination des polluants est réalisée en raison de la présence de protéines cationiques dans les graines de MO (Camacho et al., 2017) formant ainsi de petits

Chapitre II : Biocoagulation

flocs avec des particules en suspension et des matières organiques dans les eaux usées qui sont autorisées à se déposer ou à sédimenter sous des temps de contact variables (Hoa, NT et al ; 2018). Le mécanisme de coagulation d'une graine de MO a été bien discuté dans la littérature. (Ndabigengesere et al., 1995) ont décrit le mécanisme de coagulation du coagulant de MO comme l'adsorption et la neutralisation des charges, tandis que Muyibi et Evison ; 1995 l'ont attribué au pontage de particules déstabilisées. (Okuda et al., 2001) d'autre part, ont associé les variations du mécanisme de coagulation du coagulant de la biomasse MO dans l'élimination des polluants au type d'extractant utilisé pour le composant actif du coagulant. (Hoa et Hue ; 2018) ont fait référence au processus d'adsorption comme l'un des principaux mécanismes du processus de coagulation utilisé par la biomasse MO. Malgré les contributions importantes sur le mécanisme de coagulation du coagulant de la biomasse MO, le mécanisme d'élimination des polluants par la biomasse MO à travers la capacité de décantation des flocs n'est pas bien discuté. (Viotti et al., 2019) ont réaffirmé la nécessité de poursuivre les études sur l'élimination des polluants organiques à l'aide de la biomasse MO. Les détails inadéquats dans ce domaine créent un écart de connaissances important qui doit être pris en compte. Des modèles appropriés décrivant le processus d'élimination des polluants pourraient être des outils précieux à cet égard (Farzadkia et al., 2015).

Les études qui modélisent l'élimination cinétique des polluants dans les eaux usées municipales en utilisant la biomasse MO comme coagulant sont peu nombreuses et, à notre connaissance, il n'y a pas de publications disponibles sur l'applicabilité d'un modèle de Gompertz modifié pour la prédiction de l'élimination des polluants à l'aide de MO. L'étude cinétique offre des informations précieuses sur le mécanisme de la réaction et le processus d'élimination des polluants (Bello, OS et al., 2017). En outre, la biomasse MO offre une élimination rentable, facilement accessible et efficace des polluants du système d'approvisionnement en eau et des eaux usées par rapport à d'autres coagulants ordinaires, tels que l'alun et le chlorure ferrique, ce qui en fait une alternative durable aux pays en développement (Kansal et al ; 2014).

II-3-d- Chitine et Chitosane

- **Découverte et histoire**

La chitine a été découverte en 1811 par le scientifique français Henri Braconnot, qui a isolé la substance des champignons. En, 1823, Odier trouva le même composé dans les cuticules des

Chapitre II : Biocoagulation

insectes et le nomma chitine, du mot grec pour tunique ou enveloppe. Odier était intrigué par le fait que les champignons et les insectes possédaient tous le même élément structural. En 1859 Rouget publia ses découvertes selon lesquelles une Chitine modifiée pouvait être préparé en traitant la chitine avec des solutions bouillantes et concentrées d'hydroxyde de potassium dans l'eau. Il rapporta que la cette dernière était soluble dans des solutions diluées d'acides organiques dans l'eau. Cette propriété de solubilité la distinguait de la chitine, qui était insoluble dans de telles solutions. La Chitine modifiée a été renommée Chitosane par Hoppe-Seiler en 1894. La recherche sur la chitine et la Chitosane s'est accélérée du début au milieu des années 1900 (Winterowd et Sandford ; 1995).

- **Structure de la Chitine et du Chitosane**

La Chitine est le deuxième polysaccharide naturel le plus ubiquitaire sur terre après la cellulose et est composée de β (1 \rightarrow 4) liaison 2- d'acétamido-2-deoxyde- β -D-glucose¹(N-acetylglucosamine). Le Chitosane est un polymère linéaire de α (1 \rightarrow 4) liaison 2-amino-2-deoxy- β -D-glucopyranose et il est facilement dérivé par N-de acétylation (figure 10) (Pradip Kumar Dutta, et Joydeep Dutta ; 2004)

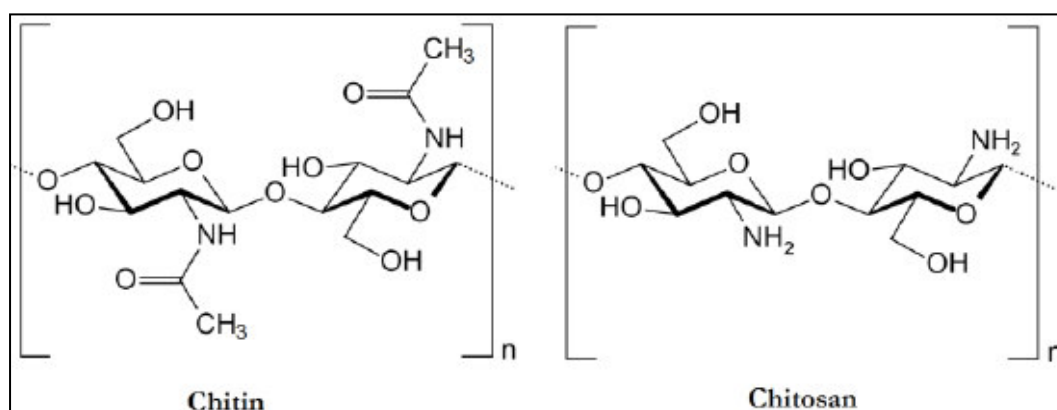


Figure 10 : Structure de la Chitine et du Chitosane (Younes ; Rinaudo ; 2015).

Chapitre III : Electrocoagulation

Chapitre III : électrocoagulation

III-1 Introduction

L'électrocoagulation est une technique électrolytique dérivée de la coagulation floculation chimique classique. Son avantage est qu'elle permet de générer, in situ, des ions d'hydroxydes de métal obtenus par dissolution des anodes sacrificielles (souvent le fer et l'aluminium). Pouvant assurer la déstabilisation électrostatique à pH acide ou neutre. Elle a également l'avantage d'éliminer certaines pollutions (turbidité, matières colloïdales, couleur, métaux lourds) par adsorption sur les floes d'hydroxyde métallique qui se forment lorsque le pH est basique (Kashefialasi et al ; 2006). Les principaux avantages du procédé d'électrocoagulation mis en évidence par plusieurs auteurs (Persin et Rumeau ; 1989; Pouet, 1994, Shenet Chi, 1996, Lin et al ; 1997 ; Chen et al ; 2000, Mollah et al ; 2004) sont la compacité des installations, le volume des boues plus faible et l'élimination des particules colloïdales de petites tailles (Gousmi ; 2019).

III-2- Historique

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement de l'eau développée avant le 20^{ème} siècle. Un pilote a été construit à Londres en 1889 pour traiter de l'eau de mer par électrolyse. Une demande de licence a été déposée par A.E. Dietrich en 1906 pour le traitement des eaux usées de manufactures. En 1909, J.T. Harries reçut une licence des USA pour le traitement des eaux usées par des électrodes de fer et d'aluminium. En 1940, Matteson et al décrivait un coagulateur électronique qui consistait à faire dissoudre une anode en aluminium pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui flocculent et coagulent en entraînant les matières en suspensions et purifient l'eau. Un procédé similaire a été développé en Grande Bretagne pour traiter les eaux de rivière par des électrodes de fer.

L'EC a été utilisée pendant toutes ces années sans véritablement connaître un succès et sans qu'elle ne soit acceptée par les populations et les industriels. Cependant, ces dernières années, on constate un regain d'intérêt, et son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels font appel à elle pour le traitement de leur effluent. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement. Son efficacité a été démontrée sur divers polluants. Elle est efficace dans le traitement des métaux lourds (Pb, Cd, Cr et As), des métaux (Mn, Cu, Zn, Ni, Al, Fe, Sn, Mg, Se, Mo, Ca et Pt), des anions (CN^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- et Cl^-), des non métaux tels que le phosphore et les composés organiques, des TPH (Hydrocarbures Totaux de Pétrole), des BTX (Toluène, Benzène et Xylène), du MTBE (Methyl tert-butyl ether), de la DBO, des MES, des minéraux, des

Chapitre III : électrocoagulation

colorants organiques, des huiles et graisses d'effluents industriels variés (Debillement ; 1996, Moreno et al., 2007).

III-3-Mécanisme d'électrocoagulation :

L'électrocoagulation est considérée comme un procédé complexe avec une multitude de mécanismes synergiques concourant au traitement de la pollution. Trois catégories de mécanismes en électrocoagulation ont été identifiées (Holt et al., 2002):

- Les phénomènes électrochimiques,
- La coagulation,
- L'hydrodynamique.

L'action directe d'un champ électrique sur une eau résiduaire permet de créer des conditions d'une bonne coagulation-floculation (Rove, 1947). En effet le champ électrique permet de créer, d'une part, un gradient de vitesse affectant toutes les particules chargées notamment les ions et les colloïdes facilitant ainsi leur rencontre (Debillement, 1996) et, d'autre part, en utilisant les anodes de fer et d'aluminium, on arrive à faire passer en solution des quantités contrôlables d'ions métalliques indispensables à la création de floccs de taille suffisante. La séparation de la masse aqueuse est réalisée par flottation ou par décantation (Mollah et al., 2001) résumant ce processus comme suit :

- La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels.
- La déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspension et la cassure des émulsions.
- L'agrégation des phases déstabilisées pour former les floccs.

Cette dernière étape peut être résumée par les sous étapes suivantes :

- Présence forte de la double couche diffuse autour des espèces chargées obtenues grâce aux interactions des ions métalliques provenant de la dissolution de l'anode sacrificielle ;
- Neutralisation des espèces ioniques présentes dans l'eau par les cations ;

Chapitre III : électrocoagulation

- Formation de floccs comme le résultat de l'agglomération des particules et des colloïdes autour des espèces coagulées.

Le procédé d'électrocoagulation peut être utilisé seul ou en série avec d'autres procédés dans une chaîne de traitement des eaux (Inoussa Zongo ; 2009).

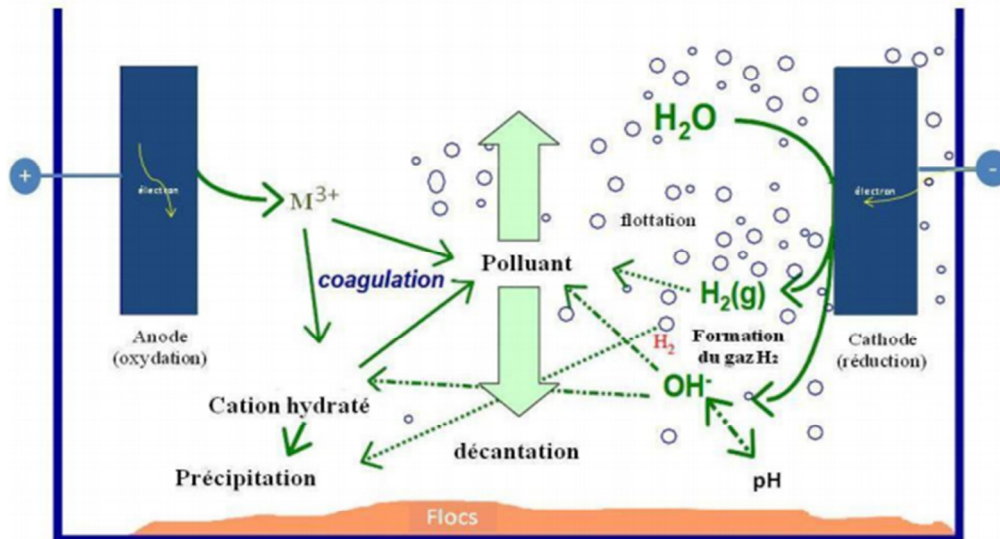


Figure 11 : Schéma du principe de l'électrocoagulation (Zodi, 2012).

III-5-Types d'électrodes

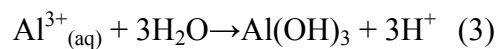
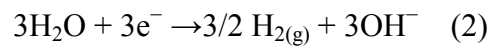
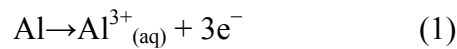
III-5-1-Électrode en Aluminium

L'aluminium est généralement utilisé comme électrodes, leurs cations sont générés par la dissolution d'anodes sacrificielles lors de l'application de courant continu (Rahman et al ; 2020). C'est une méthode alternative à la coagulation chimique car elle peut réduire le besoin de produits chimiques additifs. Plusieurs réactions se produisent au cours de l'électrocoagulation comme montré dans les équations 1, 2, et 3 .

L'électro-dissolution provoque une augmentation de la concentration de métal dans les eaux usées et finalement précipite sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes. De même, il s'est hydrolysé en hydroxydes monomères et polymères tels que $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_3$ et $Al(OH)_4^-$ (Tahreen, 2020) des hydroxydes de métal obtenus par dissolution des anodes sacrificielles (souvent le fer et l'aluminium) (M.S. Jami F .Ali, 2020).

Chapitre III : électrocoagulation

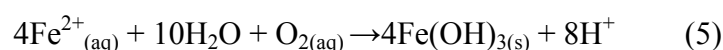
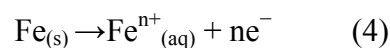
L'électrocoagulation génère des hydroxydes hautement métalliques, fonctionnant comme neutralisant de la charge électrostatique présente parmi les particules colloïdales, pour favoriser l'agglomération ou la coagulation des matières en suspension (Babu et al., 2020).



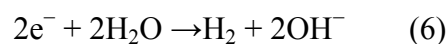
III-5-2-Électrode en Fer

Les électrodes de fer génèrent des coagulants in situ par les dissolutions d'électrodes sacrificielles à l'anode pour former des ions hydroxyle, tandis que l'électrode cathodique produit de l'hydrogène gazeux. Le processus commence lorsque le courant est appliqué au réacteur, des hydroxydes monomères et polymères tels que l'hydroxyde de fer et le polyhydroxyde sont produits en raison du processus d'hydrolyse. De l'hydrogène gazeux est également généré lors de la réaction latérale de la cathode, ce qui aide les floes produits à dériver à la surface de l'eau. Les réactions anodiques sont exprimées par les équations 4 et 5, tandis que l'équation 6 montre la formation de bulles d'hydrogène à la cathode par réaction d'oxydation avec des ions hydroxyle (Rahman et al., 2020).

Anode:



Cathode:



III-5-3-Électrode en cuivre

L'électrode de cuivre dans le traitement par électrocoagulation peut éliminer divers polluants de l'eau. Une étude comparative entre les électrodes en cuivre et en aluminium a révélé que le cuivre a une meilleure efficacité d'élimination des polluants et que la corrosion à la surface du cuivre après l'électrocoagulation était uniforme. En se référant aux équations 7, 8, 9, 10 et 11, le processus d'oxydation et de réduction est produit simultanément au cours du traitement par électrocoagulation utilisant des électrodes en cuivre, au cours de laquelle des cations de

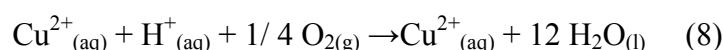
Chapitre III : électrocoagulation

cuivre et l'hydroxyde de cuivre sont produites in situ à agir en tant que coagulant pour éliminer des polluants (Nazeri Abdul; Allene Albania et al ; 2020).

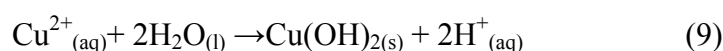
Dissolution électrochimique anodique :



Oxydation des électrodes en cuivre :



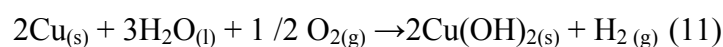
Réaction d'hydrolyse:



Réaction électrochimique cathodique:



Réaction générale :



III-6-Cellule d'électrolyse

L'électrolyse met en jeu deux couples redox. Il les fait réagir dans le sens contraire de la réaction naturelle au moyen d'un courant électrique qui apporte l'énergie nécessaire à la réaction. Un électrolyseur est un dispositif consistant en un récipient contenant une solution ionique dans laquelle plongent deux électrodes. Les électrodes se polarisent dès que le courant passe (Moussa et al ; 2017).

- L'anode est l'électrode par laquelle le courant arrive dans le système. Les électrons en sortent donc. Il y a oxydation du réducteur. Elle est reliée au pôle + du générateur.
- La cathode est l'électrode par laquelle sort le courant c'est à dire par laquelle entrent les électrons. Il s'y produit une réduction. Elle est reliée au pôle - du générateur.

Contrairement aux piles, le dispositif d'électrolyse n'est pas polarisé par les couples redox mais bien par le générateur branché à ses bornes. L'électrolyte est le milieu conducteur, la solution ionique dans laquelle baignent les anions et les cations (Dina T. Moussa et al ; 2017).

Chapitre III : électrocoagulation

Les anions de l'électrolyte migrent vers l'électrode reliée au pôle + (l'anode) et y subissent parfois une réaction d'oxydation. Les cations de l'électrolyte migrent vers l'électrode reliée au pôle - (la cathode) où ils peuvent subir une réduction (Moussa et al., 2017).

Une réaction électrochimique est ainsi une réaction d'oxydation ou de réduction effectuée au moyen d'une électrode. L'une des électrodes va jouer le rôle de la cathode (réduction) et l'autre va jouer le rôle d'anode (oxydation). Les réactions électrochimiques correspondent toujours à une oxydation anodique et une réduction cathodique (Moussa et al., 2017).

III-7-Configuration des électrodes

Les électrodes utilisées dans le traitement par électrocoagulation peuvent être de formes variées, tout dépendant de l'effluent à traiter et des installations déjà en place. Il est possible de rencontrer des électrodes cylindriques, des lits fluidisés, des électrodes de métal déployé et des électrodes planes. Dans certains cas, les anodes sont même placées dans un réacteur qui sert directement de cathode (back et al., 1974). Par contre, dans la majorité des cas en recherche et même dans les applications industrielles, les électrodes planes sont les plus utilisées. Il est également important de noter que le nombre d'électrodes utilisées est très variable. Certains auteurs utilisent seulement une paire d'électrodes (EL-Masry et al., 2004, Kumar et al., 2004 ; Phutdhawong et al ; 2000). Tandis que d'autres utilisent jusqu'à huit électrodes (Beauchesne et al., 2005, Meunier et al., 2004).

La configuration des électrodes planes peut être de deux types : monopolaire ou bipolaire. Dans les deux cas, les électrodes sont placées sur le support de façon à avoir un espacement constant. La configuration choisie dépend seulement de la façon dont elles sont branchées au générateur de courant. Dans le cas de la configuration monopolaire, chacune des électrodes est branchée au générateur en alternant les anodes et les cathodes (figure 12 A) (Asselin, 2017).

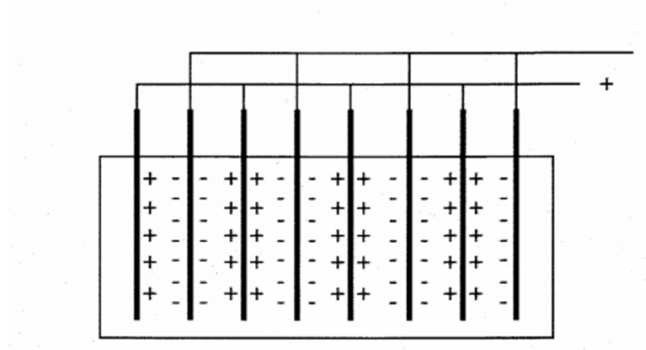


Figure 12 A: Configuration des électrodes monopolaire (Asselin, 2007).

Dans le cas de configuration bipolaire, seules les deux électrodes placées aux extrémités du réacteur sont branchées au générateur de courant (une connectée à la borne positive et l'autre à la borne négative) (figure 12 B). Toutes les électrodes intermédiaires servent à la fois d'anode et de cathode (dipôles), sans être toutefois directement branchées. En fait, le passage du courant se fait par déplacement ionique au sein de la solution (Asselin, 2017).

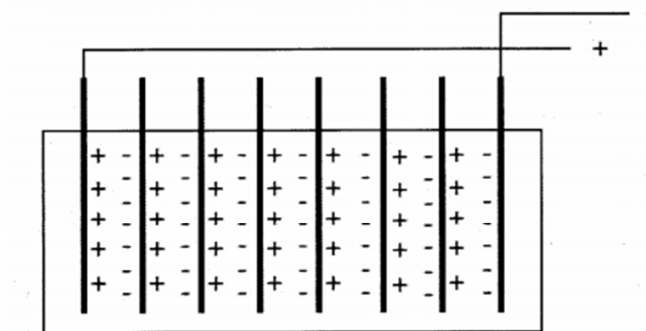


Figure 12 B: configuration des électrodes bipolaire (Asselin, 2007).

Le choix de l'une ou l'autre des configurations doit être fait en fonction de l'eau à traiter, de ses caractéristiques propres et du nombre d'électrodes disponibles (Asselin, 2007).

III-8-Principales lois d'électrolyse

Le procédé d'électrocoagulation met en œuvre plusieurs types de phénomènes tels que les réactions chimiques, les réactions électrochimiques d'oxydoréduction, les phénomènes physiques de transfert de charge à l'interface électrode solution, les adsorptions physiques ou chimiques entre hydroxydes et polluants et adsorption chimiques entre les ions métalliques et la pollution, l'hydrodynamique dans l'espace inter électrodes, les interactions gaz-liquide plus précisément entre le gaz produit et la solution.

Chapitre III : électrocoagulation

La quantité de matière produite ou consommée lors d'une réaction électrochimique se calcule par la loi de Faraday (équation 12) et est fonction de la durée de traitement et de l'intensité de courant I (Zongo ; 2009) :

$$m = M.I.t/z.F \quad (12)$$

Où

M : la masse moléculaire de l'espèce considérée (g.mol^{-1}).

I : intensité de courant imposée (A).

F : constante de Faraday ($96487 \text{ Colomb. mol}^{-1}$)

z : la valence de l'ion formé

m : masse de métal dissoute à l'anode par seconde

t : le temps

L'énergie consommée en KWh.m^3 est donnée par l'équation (13) :

$$E = U.I.t/V \quad (13)$$

Où

U est la tension aux bornes des électrodes (V),

Une partie de l'énergie imposée peut être utilisée par des réactions secondaires, d'où la notion de rendement faradique. Il se détermine par le rapport de la quantité théorique d'électricité nécessaire pour produire ou consommer une mole de B (espèce formée expérimentalement) sur la quantité d'électricité réellement consommée ou produite.

Soit la réaction suivante :



Le rendement faradique est donné par :

$$\Phi = z.F.m_B/Q.M_B \quad (14)$$

Avec :

Chapitre III : électrocoagulation

Φ : rendement faradique

Q : la charge électrique ($Q=I \times t$)

m_B : la masse de l'espèce B formée expérimentalement.

z : la valence de l'ion formé

F : constante de Faraday (96487 Colomb. mol⁻¹)

Le rendement faradique est souvent supérieur à l'unité, lorsque les électrodes en aluminium sont utilisées, cette valeur supérieure à l'unité peut s'expliquer par l'oxydation chimique de l'aluminium par les ions OH⁻ produits ou bien par la présence de Cl⁻ qui réduit la passivation de l'aluminium (Picard et al ; 2000, Khemis ; 2005, Goussmi ; 2019).

III-9-Paramètres influençant l'efficacité d'électrocoagulation

Parmi les paramètres qui influencent le traitement d'EC, on peut citer l'intensité appliquée, le type d'électrode, le pH, la conductivité, la distance inter électrodes et le temps de traitement (Khandegar et Saroha ; 2013).

III.9 -1- Intensité de courant

L'intensité du courant imposée au système est un paramètre important, déterminant l'efficacité de la technique à éliminer les polluants des eaux, puisqu'il permet d'une part de contrôler la cinétique électrochimique de dissolution des électrodes anodiques et d'autre part de contrôler le dégagement de bulles d'hydrogène sur les électrodes cathodiques. En effet si le courant est trop faible, une faible quantité d'hydroxydes sera produit, une faible quantité d'hydrogène sera dégagée à la cathode et le temps de résidence de l'effluent dans le réacteur devra être plus long afin d'obtenir une bonne qualité de l'eau traitée. Par contre, un courant plus élevé provoque une augmentation de la vitesse de la réaction. Cependant une forte valeur de la tension électrique peut réduire les taux d'abattement de la DCO (Jotin et al ; 2012), mais dans ce cas, les électrodes seront attaquées plus rapidement, entraînant une consommation plus rapide des électrodes et de gaspiller d'une dépense énergétique plus importante. De plus quand le courant utilisé est trop élevé, il y a des risques de perde et gaspiller une grande partie de l'énergie en chaleur dans le Système (Chen ; 2004). Il est donc primordial de faire un compromis entre la dépense énergétique la plus efficace et le coût d'opération les plus bas. De plus une trop grande densité de courant provoque habituellement la coalescence des bulles de

Chapitre III : électrocoagulation

gaz, ce qui réduit l'efficacité de l'électrocoagulation (Anon ; 1996). D'où en diminuant le pouvoir de la flottation, la récupération des floccs formés est plus difficile et moins efficaces.

III.9.2. Effet de potentiel hydrogène (Ph)

Le pH détermine l'état du métal dans l'eau à traiter et conditionne à cet effet le rendement du processus. Étant donné que les réactions d'hydrolyse des ions fer, aluminium et cuivre dépendent du pH, ce dernier a un rôle important dans un procédé d'EC. Le pH de l'eau brute peut avoir un impact sur la formation des bulles de gaz et sur la solubilité des différents hydroxydes générés lors de l'électrolyse (Chen ; 2004). De plus, dans le cas où la solution à traiter possède une conductivité importante, l'effet du pH n'a pas autant d'impact sur la qualité du traitement. Par contre à des pH neutres, la conductivité est souvent plus variable ce qui entraîne une plus grande énergétique. Lorsque la conductivité est élevée, l'effet du pH n'est pas significatif (Guohua ; 2004). D'après Chen (2004), l'enlèvement des polluent est justement plus efficaces lorsque le pH est près de la neutralité. Pendant l'électrocoagulation, une hausse de pH est souvent remarquée. La hausse du pH des solutions initialement acides est due à la formation d'ions hydroxydes (OH⁻) lors de la réduction de l'eau à la cathode (Vick et al ; 1984). Cette hausse de pH permet la précipitation des hydroxydes métalliques (Rajeshwer et Ibanes ; 1997). En revanche, la production de protons H⁺ obtenus, d'une part, lors de la formation des hydroxydes métallique (Al(OH)₃ ou Fe (OH)₂ ou Cu(OH)₂. Et d'autre part, lors de l'oxydation de l'eau en l'oxygène, peut contribuer à diminuer le pH de l'eau traité (Chen, 2004). Donc cependant, les valeurs de pH très acides ou très basiques diminuent les performances du procédé d'EC avec une chute brutale du taux d'élimination de la DCO (Li et al., 2011).

En fait, à des valeurs de pH très basiques (pH >10), la charge électrostatique de la surface des colloïdes est modifiée, ce qui empêche leur déstabilisation (Drogui et al., 2008). De plus, certains hydroxydes de fer, d'aluminium ou de cuivre formés à des pH basiques portent des charges négatives inefficaces pour l'EC (Drogui et al., 2008).

III.9.3. Effet de la conductivité de la solution

C'est la conductivité du milieu qui permet un bon transfert ionique dans l'effluent. Ce dernier fait partie des facteurs qui ont une grande relation avec d'autres facteurs d'influence. La conductivité de la solution touche l'efficacité du courant, la tension et la consommation de l'énergie électrique dans une cellule électrolytique (Chen et al., 2000, Daneshvar et al., 2006).

Chapitre III : électrocoagulation

La conductivité du milieu doit être assez élevée pour assurer un bon transfert ionique dans l'effluent à traiter. L'augmentation de la conductivité permet d'optimiser la consommation énergétique et de réduire le temps de traitement (Ilhan et al., 2008, Khandegar et Sroha, 2013).

III.9.4. Influence de l'écart entre les électrodes

La distance inter-électrode est un paramètre pouvant influencer la qualité du traitement des eaux brutes. Cette distance peut varier selon le type d'eau à traiter et surtout selon sa conductivité. De plus, la distance entre les électrodes ne doit également tenir compte de l'encrassement possible et de facilité à nettoyer le système. Étant donné que la chute ohmique (liée à la résistance électrique) est directement liée à la distance inter électrodes, l'augmentation ou la réduction de cette distance peut influencer les performances du traitement. En effet, pour un courant électrique constant, l'augmentation de l'écart entre les deux électrodes cause une augmentation de la consommation énergétique et de la température du milieu, ce qui peut modifier l'efficacité du traitement. Par exemple Bouhezila et al (2011) ont observé une variation de 10% du taux d'abattement de la DCO en faisant varier la distance inter électrodes de 0,5 à 2,8 cm ce qui signifie l'effet de l'espacement entre les électrodes et comme Yu et al (2005) ont étudié l'effet de l'espacement entre les deux électrodes sur l'efficacité d'élimination du phosphore. Les résultats de cette étude ont prouvé que la meilleure efficacité d'élimination de ce polluant a été obtenue pour un espacement entre 1 et 2 cm. D'autre coté, il est possible en cas de la diminution en augmentant la concentration en électrolyte ou en rapprochant les électrodes.

III-10-Avantages et inconvénients du processus d'électrocoagulation

Comme tous les procédés de traitement des eaux, l'électrocoagulation possède des avantages et des inconvénients qui favorisent ou limitent ses domaines d'applications, plusieurs auteurs ont comparé ce procédé avec les procédés de coagulation chimique classiques. L'électrocoagulation présente plusieurs avantages (Nait Amara, 2011) :

- L'ajout de substances chimiques : n'est pas exigé dans le procédé d'électrocoagulation. Il peut s'avérer nécessaire d'augmenter légèrement la salinité de l'effluent à traiter pour accroître la conductivité électrique de l'effluent, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval. Les travaux de Miquel(1977), de Damien (1992) ont affirmé cet avantage (G. Poteaux, 1978).

Chapitre III : électrocoagulation

- Rovel(1947), Persin et Rumeau, (1989) ont montré l'efficacité du procédé d'électrocoagulation pour les pollutions dues à des colloïdes très fins.
- Avec d'autres procédés (coagulation chimique), ces pollutions imposent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées (Martell ; 1990).
- Poteaux (1978) a montré que les boues obtenues sont plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ces travaux ont montré une réduction du temps et des coûts de traitement des boues (E.V.Cenkin ; 1985).
- Persin et Rumeau (1989) ont affirmés l'importance du champ électrique entre les électrodes, il conduit à la destruction de certaines souches de bactéries. En utilisant des électrodes en titane, Patermarakis et Fountoukis (1990) ont confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore (Bichon ; 1991).
- L'électrocoagulation offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
- La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée (Persin et Rumeau ; 1989). Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisée et à la faible salinité du milieu (M. Bayramoglu ; 2016).

Les inconvénients majeurs de l'EC concernent principalement la conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes. En effet, la conductivité du rejet doit être suffisante pour permettre le passage du courant sans consommation excessive d'électricité (Yousuf et coll ; 2001, Mollah et coll ; 2004, Kim et coll., 2002, Malack et coll ; 2004, Yang et Dluhy ; 2002). Lorsque la conductivité de l'eau polluée est trop faible, un rajout du chlorure de sodium est généralement nécessaire. La présence de certains ions tels que les 24 chlorures, permet d'éviter le phénomène de passivation des électrodes d'aluminium (Donini et coll ; 1994, Yang et Dluhy ; 2002, Hu et coll ; 2003, Sheng et coll ; 2003). Par ailleurs, une présence importante d'ions calcium et hydrogénocarbonate provoque l'apparition d'un dépôt de tartre au niveau de la cathode, augmentant ainsi, la résistance de la cellule. Pour faire face à ce problème, la manière la plus simple est de réaliser une inversion périodique de la polarité (Persin et Rumeau ; 1989, Mollah et coll ; 2004, Donini et coll ; 1994.). Il est aussi important de prévoir un nettoyage mécanique périodique des électrodes à l'aide de solutions

Chapitre III : électrocoagulation

acides. La formation et le dépôt de tartre sur les électrodes représentent une part importante de la consommation électrique du procédé.

Il existe même un procédé électrochimique dont le but est de réaliser un détartrage de l'eau potable par dépôt du tartre sur la cathode (Bennajah, 2007).

Chapitre IV : Matériel et méthodes

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV-1 Objectif de l'étude

L'étude expérimentale de la coagulation-floculation permet de déterminer les concentrations optimales nécessaire à une réduction maximale de la turbidité d'une eau turbide plus précisément trouver le meilleure coagulant en terme d'efficacité , disponibilité et surtout non dangereux sur la santé humaine. Le but de notre travail est :

- Etudier l'efficacité des bios coagulants (Tanin, Cactus, Moringa Oleifera) et optimiser les quantités utilisées
- Comparer l'efficacité des bios coagulants à un coagulant chimique (Sulfate d'aluminium).
- Evaluer l'efficacité de l'électrocoagulation : étude de l'effet du temps de traitements, du potentiel électrique appliqué et de la nature des électrodes utilisés dans le traitement de cette eau.

IV-2 Zone et durée de l'étude

L'eau brute que nous avons étudiée est directement prélevée du barrage de Taksebt (eau de surface) dans des jerricans de trente litres (30 l), ce qui donne des caractéristiques semblable à cette eaux pour les différents essais réalisés de jar test et l'électrocoagulation (il faut bien agiter avant l'utilisation pour homogénéiser l'eau). Les prélèvements et l'étude ont été effectués pendant la période allant du 10 Mai au 26 Juin 2021.

Le barrage de Taksebt est un barrage de type remblai, il se trouve sur la rivière de Takhoukht et son prolongement, l'oued Aissi, au niveau d'Irdjen et Beni Aïssi dans la wilaya de Tizi-Ouzou, région de Kabylie en Algérie. Il a été construit entre 1993 et 2002, il a une hauteur de 76 m et une capacité de 180 millions m³ (Figure 13).



Figure 13 : Eau de surface du barrage Taksebt (Saboune, 2016)

Chapitre IV : Matériels et méthodes

Le barrage comprend une station de traitement, une station de pompage et des tunnels dont une canalisation de 95 km pour permettre le transfert de 180 millions m³/an.

IV-3 Etude de la bio coagulation

Pour la partie étude de la bio coagulation, tous les essais expérimentaux ont été opérés au laboratoire de traitement des eaux (G 03) du département des sciences agronomiques de l'université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU.

IV-3.1 Protocole expérimentale

IV-3-1-1 Matériel utilisé

Le matériels utilisé dans cette partie de l'étude est (figure 14) :

- Broyeur de marque sayona
- Etuve de marque nuve EN 300
- Balance de précision de marque PCE-BS 300
- Jar testde marque WISESTIR JAR TEST
- Turbidimètre de marque HYLH
- Verres de montre
- Bechers de 1l.
- Tamis de diamètre de 8 mm.



Broyeur



Etuve



Balance de précision



Four pasteur

Jar test

turbidimètre

Figure 14 : Matériel utilisé

IV-3-1-2 Produits utilisés

Nous avons utilisé des bios coagulants préparés au laboratoire avec le matériel nécessaire.

- Cladodes de Cactus
- Feuilles de Mimosa (Tanin)
- Graines de Moringa Oleifera
- Feuille de Moringa Oleifera
- Sulfate d'Aluminium.

IV-3-2 Préparation des coagulants

Nous avons effectué des séries d'essais de coagulation floculation en utilisant des bios coagulants : Cactus, Tanin, et Moringa Oleifera pour pouvoir faire une comparaison entre eux. Nous avons aussi utilisé les Sulfates d'Aluminium comme coagulants chimiques pour pouvoir faire une comparaison sur leur efficacité.

IV-3-2-1 Cactus

Pour la préparation du bio coagulant à base du cactus nous avons suivi les étapes cités ci après (figure 15) :

- Nous avons lavé les cladodes de cactus avec l'eau distillée (après avoir enlevé les épines).
- Couper les cladodes à l'aide d'un couteau en petits morceaux

Chapitre IV : Matériels et méthodes

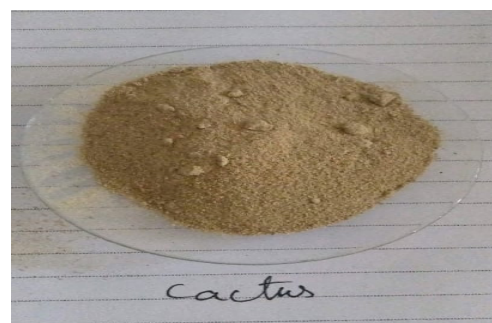
- Sécher les morceaux au soleil pendant deux jours puis dans une étuve à 105 °C pendant une heure.
- Broyer les morceaux de cactus pour obtenir une poudre.
- Tamiser la poudre et la conserver dans un bocal à fermeture hermétique étiquetée avec le nom du produit.



Cladode de Cactus



Morceaux de cactus après séchage



Cactus en poudre

Figure 15 : Etapes de préparation du bio coagulant à base de cladode de cactus

IV-3-2-2 Tanin

La préparation du biocoagulant à base de tanin se fait en suivant le protocole ci-après (Figure 16) :

- Séparer les feuilles et les tiges et les corses du bois.
- Laver les tiges, les feuilles avec l'eau de robinet.
- Sécher les tiges, les feuilles, les corses au soleil pendant 2 jours.
- Broyer les tiges, les feuilles, les corses pour obtenir une poudre.
- Tamiser la poudre et la conserver dans un bocal à fermeture hermétique étiquetée avec le nom du produit.



Feuilles de Tanin



Feuilles de Tanin après séchage



Poudre de Tanin

Figure 16 : Etapes de préparation du bio coagulant à base de tanin

IV-3-2-3 Moringa Oleifera

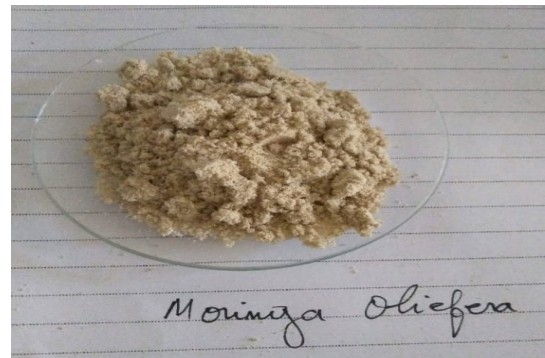
Le protocole de préparation du bio coagulant à base de Moringa se fait comme suit (Figure 17 et 18) :

➤ **Pour les graines :**

- Sécher les graines dans un four pasteur à 35 °C.
- Broyer les amandes pour obtenir une poudre.
- Tamiser la poudre avec un tamis et la conserver dans un bocal à fermeture hermétique étiquetée avec le nom du produit



Graines de Moringa Oleifera



Poudre de graines de Moringa Oleifera

Figure 17 : préparation de bio coagulant Moringa Oleifera à base des graines

➤ **Pour les feuilles**

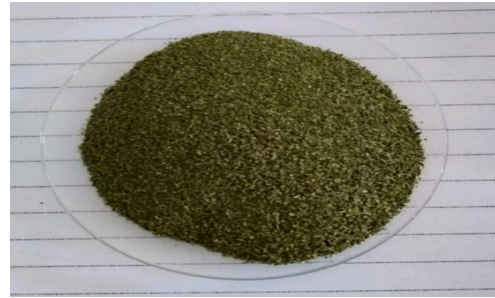
- Laver les feuilles de Moringa Oleifera avec l'eau de robinet.
- Sécher les feuilles au soleil pendant 2 jours.
- Broyer les feuilles pour obtenir une poudre.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

- Tamiser la poudre avec un tamis et la conserver dans un bocal à fermeture hermétique étiquetée avec le nom du produit.



Feuilles de Moringa Oleifera



Poudre de feuilles de Moringa Oleifera

Figure 18 : préparation de bio coagulant Moringa Oleifera a base de feuilles

IV-4 Jar test :

L'utilisation de jar test remonte à plusieurs décennies. Ces tests permettent d'évaluer (Mujawamariya 2012) :

- Le dosage de produits chimiques ajoutés ;
- Les temps nécessaires pour la floculation et la coagulation ;
- Les vitesses d'agitation du milieu.

Le Jar Test que nous avons utilisé, est de marque WISESTIR JAR TEST (figure1). Cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu dans une série de béchers remplis chacun de 1 litre d'eau et leur vitesse de rotation peut varier de (0 à 200 tr/min).

Afin de poursuivre le phénomène de la coagulation-floculation et l'optimisation des bios coagulants, Nous avons effectué des séries d'essais sur Jar test de laboratoire avec l'eau de surface on utilisant les biocoagulants (Tanin, Cactus puis Moringa Oleifera) on suivant ce protocole :

- On lave bien les béchers.
- On mesure la turbidité de l'eau brute à l'aide d'un turbidimètre.
- On remplit les six béchers avec de l'eau brute (1000 ml).
- On place chaque béchers sous l'agitateur et en submerge les palettes.
- On pèse des doses de 10 mg, 20 mg, 30 mg, 40 mg, 50 mg et 60 mg du bio coagulant à l'aide d'une balance de précision.
- On injecte le bio coagulant de différente dose dans chaque bécher.
- On allume le jar test à la vitesse de 150 tours pendant 5 min (agitation rapide).

Chapitre IV : Matériels et méthodes

- On réduit la vitesse à 30 Tr/min pendant 20 min (agitation lente).
- On arrête l'agitation, on retire les palettes avec précaution.
- On laisse l'eau décanter pendant deux heures
- On mesure la turbidité de l'eau après 1 heure puis après 2 heures de décantation après étalonnage du turbidimètre avec de l'eau ultra pure à chaque fois.

Nous avons aussi suivie le même protocole en utilisant les sulfates d'aluminium (coagulant chimique) à des concentrations de 10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 mg/l.

IV-5 Electrocoagulation

L'étude expérimentale de l'électrocoagulation s'est déroulée au sein de Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).

IV-5-1 Présentation de Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)

Le Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) a été créé en 1982 au sein du Commissariat aux Energies Nouvelles en tant que Centre de Développement des Techniques Avancées et se situe a Cité 20 août 1956 Baba Hassen, Alger (Figure 19).



Figure 19 : Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA)

C'est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST). Il a pour mission de mener des actions de recherche scientifique, d'innovation technologique, de valorisation et de formation dans les domaines des sciences et des technologies de l'information, des technologies industrielles et de la robotique, des dépôts et des traitements des matériaux, des applications et des technologies des lasers.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

A travers ses missions, le CDTA contribue activement au développement du savoir, à sa transformation en savoir-faire et en produits nécessaires au développement économique et sociétal.

IV-5-2 Matériels utilisés

Afin de procéder à l'essai expérimental, un dispositif expérimental a été réalisé par le montage des matériaux et d'appareil suivant :

- Un générateur de courant électrique de marque alimentation multiple ALR3002M
- Des fils électriques (connections entre générateur et électrode)
- La cellule électrochimique dans laquelle sont placés deux électrodes en parallèle entre lesquelles circule l'effluent à traiter (l'eau brute).

Le réacteur électrochimique ou électrolyseur permet de réaliser des transformations chimiques à l'aide du courant électrique (Figure 20).

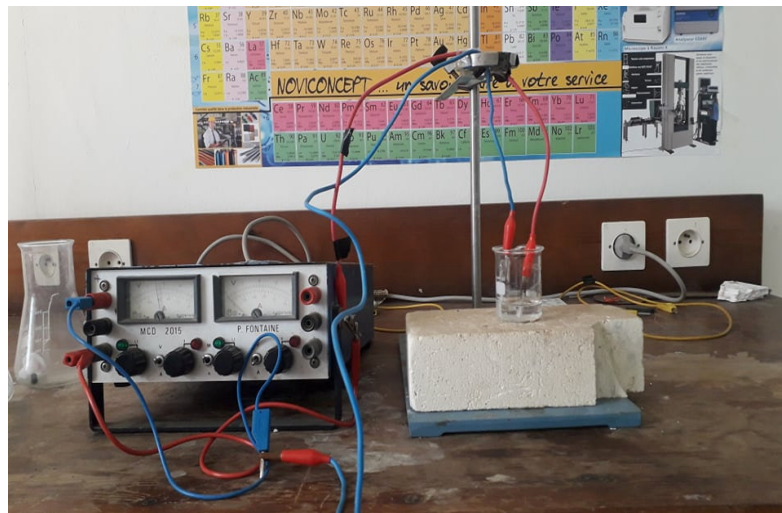


Figure 20 : Réacteur électrochimique

Le dispositif expérimental d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit, d'imposer un potentiel entre deux électrodes (Fer, Aluminium ou le Cuivre) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+}) susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation-floculation de la turbidité que l'on souhaite éliminer.

En plus de l'utilisation de :

- Turbidimètre de marque HYLH.

- Ultrason de marque ultrawash reverberi.
- Un appareil de marque Consort C863 pour la mesure des TDS, le pH et la résistivité.

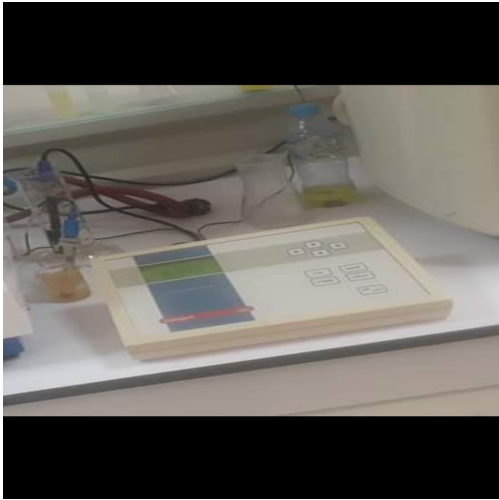


Figure 21 : pH mètre



Figure 22 : Ultrason

IV-5-3 Déroulement de l'expérience

Le dispositif expérimental d'électrocoagulation est composé de deux électrodes anodes et cathodes de fer (acier inoxydable) de mêmes dimensions (2.1 cm × 1 cm), d'Aluminium (1.9 cm × 1 cm) de Cuivre (2.5 cm × 2 cm) plongées dans un béccher de 50 millilitre (dans chaque essaie on traite 50 ml d'échantillon de l'eau de surface). La surface immergée de chaque électrode est de 2.1 cm², 1.9 cm² et de 5 cm² et la distance les séparant est de 2,5 cm. Ces électrodes sont branchées aux bornes d'une alimentation en courant continu (générateur) dont la tension est de 8 V, 12 V et de 18V.

La première étape du protocole est le nettoyage des électrodes avant l'utilisation :

- Les électrodes ont été prolongé dans un récipient contenant de L'acide fluorhydrique (Hf) (10%) jusqu'à 10 min.
- Retirer les électrodes de la solution Hf et les rincer avec de l'eau distillée pendant 5 min.
- Nettoyer les électrodes avec l'éthanol par ultrasons pendant 20 min.
- Retirer les électrodes de l'éthanol et les rincer avec de l'eau distillée pendant 10 min.
- Après les électrodes ont été séchées et conservé dans une boîte d'échantillons nettoyée.

Chapitre V : Résultats et Discussions

Chapitre V : Résultats et Discussions

V-1- Caractéristiques de l'eau étudiée

L'analyse de l'eau brute du barrage de TAKSEBT étudiée (Tableau 2) montre que l'effluent est neutre, son pH est de 7,37. Cette valeur faible de pH est conforme à celle des eaux de surface, qui est en général comprise entre 6 et 8.5 (Chapman & Kimstach, 1996).

Tableau 2 : Caractéristiques de l'eau brute étudiée

Paramètre	unité	résultat	JORAD	OMS
Ph	/	7.37	$\geq 6,5$ et ≤ 9	$\geq 6,5$ et ≤ 9
TDS	Mg/l	52.46	/	En dessous de 1000 mg/l
Turbidité	NTU	25.6	5	/
résistivité	K Ω /cm	12.92	/	400

V-2- Biocoagulation

V-2-1 -Détermination de la dose optimale des coagulants

Pour déterminer la dose optimale des coagulants à ajouter avec un meilleur abattement de la turbidité, nous avons réalisé des essais avec Jar Test sur les eaux brutes du barrage de Taksebt avec des doses croissantes en coagulant chimique (sulfate d'Aluminium) et en bios coagulants (Tanin, Cactus, Moringa Oleifera) fixées à 10, 20, 30, 40, 50 et 60 mg/l.

V-2-1-a-Tanin

Les résultats des essais sur jar test obtenus en utilisant le tanin comme biocoagulant sont illustrés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Dose optimale de tanin

Après 1 h de décantation						
Dose Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Turbidité (NTU)	5.5	5.3	7.1	7.9	8.1	10
Après 2 h de décantation						
Turbidité (NTU)	4.6	4.2	6	6.8	7.2	9.2

Chapitre V : Résultats et Discussions

Nous observons que la turbidité varie entre 4.2 et 5.5 NTU pour les concentrations de 10 et 20 mg/l. puis l'augmentation de la turbidité est proportionnelle à l'augmentation de la concentration dans l'intervalle de concentration 30 à 60 mg/l.

La dose optimale du tanin a rajouté pour une meilleure élimination de la turbidité de notre eau de surface est de 20 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 5.3 NTU après 1 h de décantation et 4.2 NTU après 2 h de décantation.

V-2-1-b-Cladode de Cactus

Les résultats des essais sur jar test obtenus en utilisant le tanin sont illustrés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Dose optimale de cactus

Après 1 h de décantation						
Dose Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Turbidité (NTU)	3.1	2.8	3.4	4.2	4.3	4.7
Après 2 h de décantation						
Turbidité (NTU)	2.6	2.5	2.4	2.9	3.2	3.4

Nous observons que la turbidité varie entre 2.4 et 2.8 NTU pour les concentrations de 20 et 30 mg/l. puis l'augmentation de la turbidité est proportionnelle à l'augmentation de la concentration dans l'intervalle de concentration 40 à 60 mg/l.

La dose optimale du cactus a rajouté pour une meilleure élimination de la turbidité de notre eau de surface est de 20 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 2.8 NTU après 1 h de décantation, et de 30 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 2.4 NTU après 2 h de décantation.

Chapitre V : Résultats et Discussions

V-2-1-c-Moringa Oleifera (graines)

Les résultats des essais sur jar test obtenus sont illustrés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Dose optimale de Moringa Oleifera (graines).

Après 1 h de décantation						
Dose Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Turbidité (NTU)	4.0	2.1	2.4	2.6	4.0	4.4
Après 2 h de décantation						
Turbidité (NTU)	2.0	1.8	1.6	2.2	3.0	3.0

Nous observons que la turbidité varie entre 1.6 et 2.1 NTU pour les concentrations de 20 et 30 mg/l. puis l'augmentation de la turbidité est proportionnelle à l'augmentation de la concentration dans l'intervalle de concentration 40 à 60 mg/l.

La dose optimale de moringa oliefera (graines) a rajouté pour une meilleure élimination de la turbidité de notre eau de surface est de 20 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 2.1 NTU après 1 h de décantation, et de 30 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 1.6 NTU après 2 h de décantation.

V-2-1-d- Moringa Oliefera (feuille)

Les résultats des essais sur jar test obtenus sont illustrés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Dose optimale de Moringa Oleifera (feuilles).

Après 1 h de décantation						
Dose Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Turbidité (NTU)	9.3	8.7	8.5	9.6	10	10.5
Après 2 h de décantation						
Turbidité (NTU)	6.9	7.4	7.6	9.7	9.8	10

Chapitre V : Résultats et Discussions

Nous observons que la turbidité varie entre 6.9 et 8.5 NTU pour les concentrations de 10 et 30 mg/l. puis l'augmentation de la turbidité est proportionnelle à l'augmentation de la concentration dans l'intervalle de concentration 40 à 60 mg/l.

La dose optimale de moringa oliefera (feuilles) a rajouté pour une meilleure élimination de la turbidité de notre eau de surface est de 30 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 8.5 NTU après 1 h de décantation, et de 10 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 6.9 NTU après 2 h de décantation.

V-2-1-e- Sulfate d'Aluminium

Les résultats des essais sur jar test obtenus sont illustrés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Dose optimale de Sulfate d'Aluminium

Après 1 h de décantation						
Dose Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Turbidité (NTU)	2.7	1.2	1.1	1.0	0.8	0.9
Après 2 h de décantation						
Turbidité (NTU)	2.3	1.2	1.0	0.6	0.9	1.0

Nous observons que la turbidité varie entre 0.6 et 0.8 NTU pour les concentrations de 40 et 50 mg/l. puis l'augmentation de la turbidité est proportionnelle à l'augmentation de la concentration dans l'intervalle de concentration 50 à 60 mg/l.

La dose optimale de sulfate d'aluminium a rajouté pour une meilleure élimination de la turbidité de notre eau de surface est de 50 mg/l, ou la turbidité diminue pour atteindre 0.8 NTU après 1 h de décantation, et de 40 mg/l ou la turbidité diminue pour atteindre 0.6 NTU après 2 h de décantation.

La dose de coagulant peut améliorer la qualité de l'eau traitée, mais aussi la détériorer (augmentation de la turbidité). Cette augmentation de la turbidité est due à une augmentation du résiduel de coagulant dans l'eau traitée. Si on prend le tanfloc par exemple, le mécanisme de neutralisation des charges pourrait être priorisé par rapport aux autres mécanismes, de telle

sorte qu'à partir d'une dose donnée (40mg/l de Tanfloc dans le cadre de leur étude) toutes les charges des particules seraient neutralisées. Ainsi, les doses de coagulation supérieures à la dose donnée apporteraient du Tanfloc inefficace à la coagulation (à cause de la restabilisation des particules), d'où l'augmentation du résiduel de Tanfloc (aouba ; 2017), et c'est ce qu'on a remarqué avec les autres produits utilisés.

V-2-2-Taux d'abattement de la turbidité avec les coagulants organiques et inorganiques :

La figure ci-dessous représente le taux d'abattement de la turbidité obtenu après les différents essais de traitement avec des coagulants organiques et inorganiques.

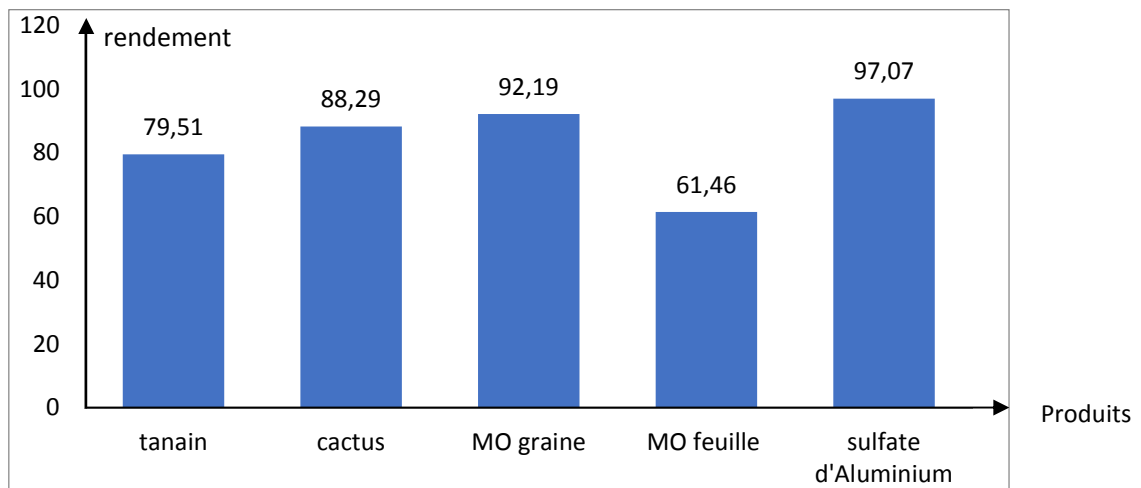


Figure 24 : Taux d'abattement de la turbidité avec les coagulants organiques et inorganiques

Exemple de calcul :

$$20.5 - 0.6 = 19.9$$

$$20.5 \longrightarrow 100\%$$

$$19.9 \longrightarrow x$$

$$x = 97.07$$

La figure 24, nous montre que tous les coagulants organiques utilisés ont un effet d'abattement sur la turbidité. L'utilisation du tanfloc permet une réduction de la turbidité initiale avec un taux de 79.5 %. Le taux d'abattement atteint les 88.29 % en utilisant le cactus comme coagulant. La MO en graine réduit la turbidité de 92.19 %, tandis que les feuilles la

Chapitre V : Résultats et Discussions

réduisant avec un taux de 61.46 %. En ce qui concerne le coagulant chimique (sulfate d'aluminium) le taux d'abattement atteint les 97.07 %.

En comparant ces résultats, nous remarquons que le coagulant chimique est le plus efficace (97.07 %) mais vu sa dangerosité vis-à-vis de la santé à long terme du consommateur, l'utilisation du cactus (88.29 %) et de la MO en graine (92.19 %) peut être une alternative de taille, du fait que ces produits bios non aucun effet toxicologique sur l'être humain et peuvent être consommés sans risque sanitaire, au contraire la MO est considérée comme complément alimentaire et apporte beaucoup de vitamine (voir anexe 1 sur les bien fait de MO).

- ❖ Selon les études qui ont été réalisés avec d'autre chercheurs ont trouvé des résultats suivants :

En ce qui concerne l'abattement de la turbidité avec le Tanfloc, plusieurs études ont été déjà réalisées sur la réduction de la turbidité. Ces études (Graham, et al. 2008, Sánchez-Martín, et al. 2009, Sánchez-Martín, et al ; 2010, Bongiovani, et al ; 2016) montrent que le Tanfloc permet la réduction d'au moins 60 % de la turbidité. Cette réduction est fonction de la qualité de l'eau brute, et de la dose. En outre, ces études ont obtenu de telles performances (au moins 60 % de réduction) sans aucun ajustement de pH et à partir de doses ≤ 15 mg/l de Tanfloc. Les quelques essais réalisés dans notre étude confirment effectivement que le Tanfloc permet de réduire jusqu'à 85 % de la turbidité sans ajustement du pH et avec des doses ≤ 15 mg/l de Tanfloc. Il semblerait que la réduction de la turbidité par le Tanfloc nécessite des doses inférieures à l'abattement de la MOD. Cela s'expliquerait par les mécanismes de coagulation. En effet, contrairement à la MOD qui serait enlevée par le mécanisme de neutralisation des charges par le Tanfloc, la turbidité serait réduite par les mécanismes de neutralisation des charges, et de pontage (Bolto, et al. 2007). Le Tanfloc agirait à la fois comme un coagulant (par son caractère cationique, à neutraliser les charges négatives des particules et comme un floculant (masse molaire élevée : $6.105 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) (Bolto, et al. 2007, Graham, et al. 2008), d'où le mécanisme de pontage qui permet de former de plus gros floes.

Nougbodé et al ; (2013) ont également évalué les propriétés du cactus en tant que coagulant naturel pour la clarification de l'eau, en utilisant une solution de *Opuntia dillenii* pour clarifier les eaux de surface très turbides (turbidité variant de 418 NTU à 186 NTU). Après avoir effectué des tests de floculation et de coagulation, les chercheurs ont découvert qu'*Opuntia dillenii* a été utile pour le traitement des eaux très turbides. La solution avait une

efficacité d'élimination variant de 89 % à 93 % pour la turbidité et les solides en suspension AyubKaranja et al ; 2017.

Rakotonirian et al ; (2015) ont également évalué les propriétés du M Oliefera en tant que coagulant naturel pour la clarification de l'eau, en utilisant sa poudre pour clarifier les eaux de surface très turbides (turbidité 403 NTU). Après avoir effectué des tests de floculation et de coagulation, les chercheurs ont découvert que MO a été utile pour le traitement des eaux très turbides. La solution avait une efficacité d'élimination de 98.7 % pour la turbidité.

Comme aussi ils ont évalué l'efficacité de sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$) en tant que coagulant inorganique pour la clarification de l'eau, après avoir effectué des tests de coagulations floculations, et ils ont montrés que le sulfate d'alumine a une efficacité d'élimination de 99 % de la turbidité des eaux de surface.

V-3 Electrocoagulation

V-3-1-Etude du traitement électrochimique de la turbidité

L'étude de l'élimination de la turbidité de l'eau pour la méthode électrochimique nécessite l'optimisation de la tension électrique à imposer lors de l'électrolyse afin de minimiser les pertes énergétiques. Nous allons voir comment la turbidité évolue en fonction des différents paramètres tels que la DDP (8, 12, 16 V), le temps de traitement (20, 25, 30 minute) et la nature de l'électrode (aluminium, fer et cuivre). Le volume de l'eau brute traitée est de 250 ml pour chaque expérience.

IV-3-2 Paramètres retenus sont :

- La densité de courant,
- La salinité,
- Le pH initial de la solution,
- La distance inter-électrodes,
- Le nombre d'électrodes,
- Le matériau d'électrodes.

Pour une intensité du courant de 8 V, 12 V et 16 V, l'évolution du pH, de la turbidité, de la résistivité, de la salinité et des TDS en fonction du temps d'électrolyse et du type d'électrode sont illustrées dans les tableaux suivant :

Chapitre V : Résultats et Discussions

- **Electrode en Aluminium**

Tableaux 8 : Résultats obtenus avec l'électrode d'Aluminium

Courant appliqué	Temps	20min	25min	30min
	Paramètre			
8 V	pH	7.49	7.15	7.11
	TDS (mg/l)	39.23	50	49.43
	Résistivité (kΩ/cm)	12.92	10.55	10.85
	Turbidité (NTU)	23.4	11.3	8.9
	Salinité	0	0	0
12 V	pH	7	7.09	6.96
	TDS (mg/l)	48.66	47.1	48.63
	Résistivité (kΩ/cm)	10.89	11.31	10.86
	Turbidité (NTU)	3.6	7.4	0.9
	Salinité	0	0	0
16 V	pH	6.92	6.88	7.07
	TDS (mg/l)	48.63	46.8	45.83
	Résistivité (kΩ/cm)	10.97	11.33	11.66
	Turbidité (NTU)	7	4.5	2.6
	Salinité	0	0	0

Nous observons que la turbidité varie entre 0.9 et 8.9 NTU pour des DDP de 8, 12 et 16 V et pour un temps de réaction de 30 min. La dose optimale obtenue avec l'électrode d'aluminium est estimé à 30 min avec une turbidité de 0.9 NTU et une densité de courant de 12 V.

Chapitre V : Résultats et Discussions

- **Electrode en fer**

Tableaux 9 : résultat obtenu avec l'électrode de Fer

Courant appliqué	Temps	20min	25min	30min
	Paramètre			
8 V	pH	6.95	7.01	6.86
	TDS (mg/l)	55.73	55.36	54.9
	Résistivité (kΩ/cm)	9.53	9.04	9.74
	Turbidité (NTU)	1.1	4.6	6.6
	Salinité	0.1	0.1	0.1
12 V	pH	7.04	6.81	7
	TDS (mg/l)	53.6	50.6	54.56
	Résistivité (kΩ/cm)	9.92	10.47	9.68
	Turbidité (NTU)	2.4	1.7	6.5
	Salinité	0.1	0.1	0.1

Nous observons que la turbidité varie entre 1.1 et 1.7 NTU pour des DDP de 8 et 12 V et pour des temps de réaction de 20 et 25 min.

La dose optimale obtenue avec l'électrode de fer est estimée à 20 min avec une turbidité de 1.1 NTU et une densité de courant de 12 V.

- **Electrode en cuivre**

Tableaux 10 : Résultat obtenu avec l'électrode de Cuivre

	Temps	20min	25min	30min
	Paramètre			
8 V	pH	6.58	6.36	6.70
	TDS (mg/l)	45.9	45.9	39.16
	Résistivité (kΩ/cm)	12.03	10.55	13.69
	Turbidité (NTU)	0.8	1.5	1.4
	Salinité	0	0	0
12 V	pH	6.45	6.30	6.62
	TDS (mg/l)	44.4	38.5	37.3
	Résistivité (kΩ/cm)	12.04	13.53	14.19
	Turbidité (NTU)	0.3	4	5.9
	Salinité	0	0	0

Nous observons que la turbidité varie entre 0.3 et 0.8 NTU pour des DDP de 8 et 12 V et pour un temps de réaction de 20 min.

La dose optimale obtenue avec l'électrode de cuivre est estimée à 20 min avec une turbidité de 0.3 NTU et une densité de courant de 12 V.

V-3-3-Influence du temps de traitement et de la DDP

Il est bien connu que la densité de courant détermine non seulement la dose du coagulant mais aussi le taux de production des bulles et la croissance des floes qui peuvent influencer l'efficacité du traitement par électrocoagulation. Par conséquent, l'effet de la tension électrique appliquée à la cellule sur l'élimination des MES a été étudié (Holt et al. 2002 ; Letterman et al. 1999).

Les tableaux 8, 9 et 10 montrent l'évolution de la turbidité de l'effluent traité avec les électrodes de fer, d'aluminium et de cuivre respectivement et aux trois DDP (8, 12 et 16 V). Nous constatons une baisse de la turbidité au cours du temps pour l'électrode d'aluminium. La turbidité diminue très rapidement en fonction du temps. Cette diminution est d'autant plus rapide que la densité de courant est élevée. Contrairement, pour les électrodes de fer et de cuivre, on remarque l'augmentation de la turbidité en fonction du temps.

Il semble que pour chaque type d'électrodes, un temps de traitement et une DDP donnés sont nécessaires pour que l'efficacité du traitement augmente significativement : pour l'électrode en aluminium un temps de traitement 30 min et une DDP de 12 V diminuent la turbidité à 0.9 NTU. Pour l'électrode de fer la turbidité atteint 1.1 NTU après 20 minutes de traitement avec une DDP de 12 V. Tandis que pour l'électrode de cuivre la turbidité diminue jusqu'à 0.3 NTU après seulement 20 minutes avec une DDP de 12 V aussi. Cela est attribué au fait que, à tension électrique élevée, la densité du courant au sein de la cellule s'élève également, le taux d'aluminium oxydé augmente, entraînant une grande quantité de précipité et l'élimination de plus en plus de polluants. En outre, il a été démontré que la densité des bulles augmente et leur taille diminue avec l'augmentation de la densité de courant (Khosla et al. 1991). La meilleure DDP est de 12 volts.

Toute nouvelle augmentation de la tension, au-delà de cette valeur, induit une augmentation relativement forte de la consommation des électrodes. Un comportement similaire a déjà été observé par Holt et al. (2002) et a été expliqué par le fait que, aux courants plus élevés, la formation des ions d'aluminium de fer et de cuivre est produite rapidement, par rapport aux processus de la coagulation, ce qui entraîne une baisse du rendement d'élimination de la turbidité. En outre, la suppression rapide des hydroxydes métalliques de la solution par

Chapitre V : Résultats et Discussions

flottation conduit à une réduction de la probabilité de collision entre les MES et le coagulant. Ces résultats suggèrent que 12 V est la différence de potentiel optimale pour le traitement des eaux de surface, car elle assure un taux d'élimination rapide de la turbidité.

Nous constatons que le temps d'électrolyse joue un rôle prépondérant et a un effet remarquable sur l'efficacité du traitement. Le taux d'élimination en turbidité augmente en fonction du temps d'électrolyse pour l'électrode en aluminium 30 min. Cette augmentation d'efficacité s'explique par une formation des floccs, dont la quantité augmente, et qui vont être entraînés vers la surface par les microbulles de gaz produites au cours de l'opération.

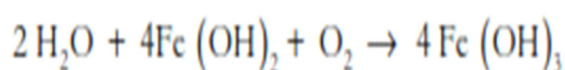
Nous remarquons aussi qu'une meilleure élimination de la turbidité peut être obtenue par diminution du temps d'électrolyse et une augmentation de la densité de courant. À titre d'exemple, une turbidité de 0.8 NTU est obtenue avec un temps d'électrolyse de 20 min, et une densité de courant de 8V avec l'électrode de cuivre.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés (Xueming Chen al. 2000 ; Adhoum et Monsel, 2004) qui ont montré que si la densité de courant diminue, le temps nécessaire pour obtenir la même efficacité augmente. Ce résultat expérimental est aussi expliqué par le fait que l'efficacité de traitement est principalement affectée par la quantité d'électricité mise en œuvre ($q = It$) ((Xueming Chen al. 2000). De même, pour un temps d'électrolyse donné, l'efficacité d'élimination augmente significativement avec l'augmentation de la densité de courant. Ainsi, pour un temps d'électrolyse de 20 min et une densité de courant de 12 V, nous avons un rendement de 99.8 %. Par contre, pour une densité de courant plus élevée 16 V et un temps d'électrolyse de 30 min ; nous avons un rendement de 96.48 %.

V-3-3-a- Pour la couleur

La figure 25 montre qu'au cours de l'électrocoagulation la couleur de l'eau devient blanche pour l'aluminium, couleur rouille pour le fer et bleu pour le cuivre.

Par exemple, en phase aqueuse, les ions Fe^{2+} sont oxydés en ions Fe^{3+} par l'oxygène dissous et on constate la formation d'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$ de couleur rouille, selon la réaction(Voir les réactions du chapitre 3) :



Ceci a été expliqué par des réactions d'oxydoréduction non totale des molécules organiques par Adhoum et Monser en 2004 ; Assas et al en 2002 ; Khoufia et al en 2007 et Hanafi et al. En 2009, par conséquent la formation d'autres molécules intermédiaires. Par contre, en augmentant la tension électrique, la décoloration devient totale. Nous constatons aussi l'apparition de bulles d'air dans l'anode comme le montre la figure 26.

V-3-3-b-Évolution du pH en fonction de la tension électrique

Le pH initial de l'eau est de l'ordre de 7.34 (neutre) ; après électrocoagulation, le pH fluctue légèrement pour les trois types d'électrodes avec la tension appliquée à la cellule (Figure 9) ; le pH final atteint pour chaque expérience reste compris entre 6.5 et 8.5, ce qui reste conforme aux normes de potabilisation algériennes et OMS, ce qui permet leur utilisation dans l'AEP sans ajustement.

V-3-3-c- Pour la résistivité

L'augmentation de potentiel est accompagnée par une diminution de la résistivité électrique finale de la solution (augmentation de la conductivité) qui serait due aux ions hydroxydes (OH-) libérés pendant le processus d'électrocoagulation.

V-3-4- Effet du matériau de l'anode sur la performance de l'électrocoagulation

Les anodes de Fer d'Aluminium et de cuivre ont d'abord été comparées dans les mêmes conditions afin de sélectionner le matériau anodique approprié pour le traitement des eaux de surface par électrocoagulation. Trois DDP de 8, 12, 16V, ont été comparées pour vérifier leurs effets sur l'élimination de la turbidité.

- Pour l'Aluminium le meilleur voltage qui a donné une bonne élimination de la turbidité est 12V après 30 minutes de réaction (0.9NTU).
- Pour le Fer le meilleur voltage qui a donné une bonne élimination de la turbidité est 8V après 20 minutes de réaction (1.1NTU).
- Pour le Cuivre le meilleur voltage qui a donné une bonne élimination de la turbidité est 12V après 20 minutes de réaction (0.3NTU).

Comme indiqué ci-dessus, étant donné qu'il existe une quantité définie d'ions métalliques nécessaires pour éliminer une quantité donnée de polluants, le voltage est le temps de réaction

affectent directement la quantité d'ions Fe^{2+} ou Al^{3+} ou Cu^{2+} libérés par l'anode et l'élimination des polluants.



Electrode en Aluminium

Electrode en acier inoxydable

Electrode en Cuivre

Figure 25 : Couleur des eaux traitées avec les différentes électrodes.



Figure 26 : Formation des bulles d'air.

IV-3- 5- Ions formés pour chaque électrode

Dans le cas d'électrode en Aluminium, le Al^{3+} produit à l'anode réagit avec l'eau pour former $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, suivi par $\text{Al}(\text{OH})_3$, le pH augmente, et enfin, les processus de polymérisation se produisent pour former $n[\text{Al}(\text{OH})_3]$.

Dans le cas des électrodes de fer, du fer ferreux Fe^{2+} se forme à l'anode, qui peut précipiter sous forme de $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$. Ensuite, le fer ferreux est oxydé en la forme ferrique (Fe^{3+}). Fe^{3+} peut précipiter sous forme d'oxyhydroxyde ferrique, $\text{FeO}(\text{OH})$, ou sous forme d'hématite.

Chapitre V : Résultats et Discussions

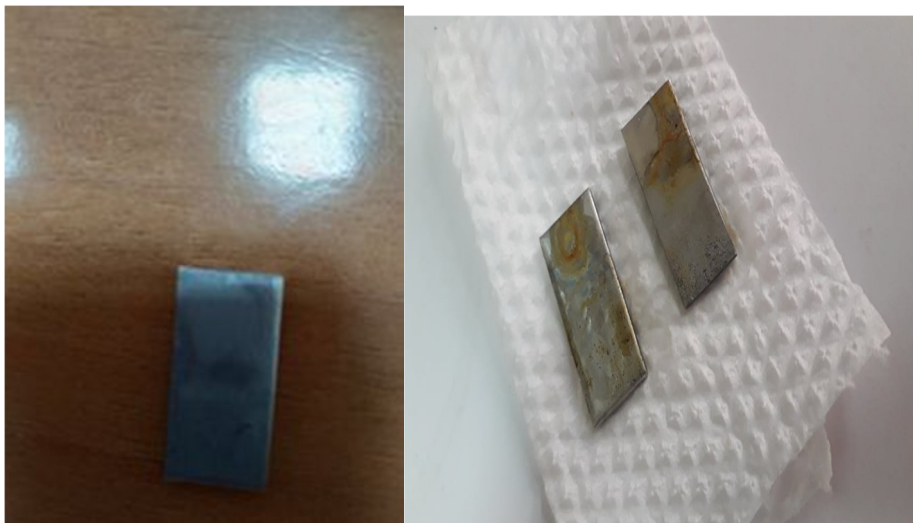
Dans le cas d'électrode en cuivre des Cu^{2+} se forme à l'anode pour former $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (voir les réactions chimiques dans le chapitre 3).



Avant traitement

Après traitement

Figure 27 : Electrode en Aluminium avant et après traitement.



Avant traitement

Après traitement

Figure 28 : Electrode en acier inoxydable avant et après traitement.



Avant traitement

Après traitement

Figure 29 : Electrode en Cuivre avant et après traitement.

V-3-4- Taux d'abattement de la turbidité par électrocoagulation

La figure ci-dessous représente le taux d'abattement de la turbidité obtenu avec différents électrodes.

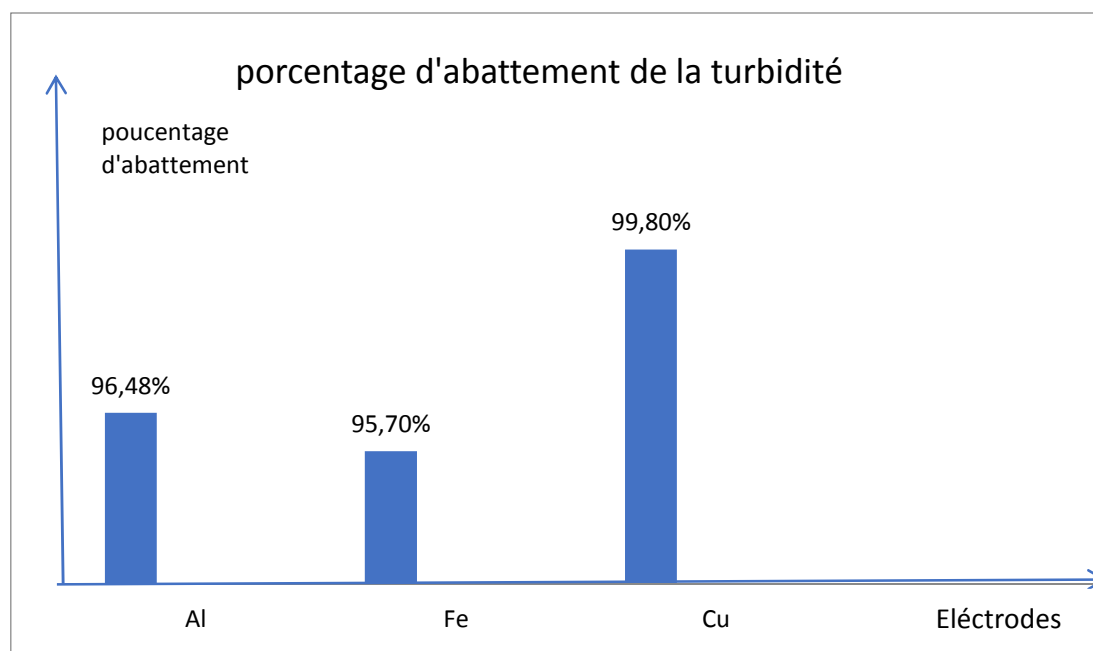


Figure 30: taux d'abattement de la turbidité pour chaque type d'électrode.

Comme l'illustre cette figure, les rendements d'élimination de la turbidité obtenus pour les électrodes Al, Fe et Cu sont respectivement de 96.48%, 95.7% et 99.8%.

Nous remarquons une légère diminution de la turbidité dans le cas de l'utilisation du fer. Ceci est expliqué par la présence des ions ferreux dans la solution qui s'oxydent dans le milieu en ions ferriques (Fe^{3+}). Chen et al ; (2000) ont expliqué la turbidité très importante pour le fer, du fait que l'hydroxyde de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) décante plus difficilement. En effet, de par leur très petite taille et leur faible capacité de gonflement en milieu aqueux, les microparticules

Chapitre IV : Résultats et Discussions

d'hydroxyde de fer ont tendance à rester en suspension. Ce résultat a été également observé par Nafaa et Lotfi (2004) et Zongo et al ; (2009), GOUSMI Nawel ; (2019).

❖ Selon les études qui ont été réalisées avec d'autres chercheurs sur l'EC en batch ont trouvé des résultats suivants :

-S .Ali et K. Sidali (2011), ont travaillé avec des électrodes en Aluminium et de Fer, et ils ont trouvé que le taux d'abattement de la turbidité avec les électrodes d'Al est de 98.30% et de 90.77% pour le fer. Goussemi ; (2019) a montré aussi que les rendements d'élimination de la turbidité atteints sont de 99.94%, et 98.30%, respectivement pour Al/Al et Fe/Fe. Cette élimination très importante de la turbidité est due au temps de coagulation de l'effluent avant de l'analyser.

-N. Abdul rahman et al ; (2021), ont travaillé avec les électrodes en cuivre et ils ont trouvé que le taux d'élimination de la turbidité été à 100%.

-Chavalparit et Ongwandee ont conclu que l'élimination de 55,43 % de la DCO, 98,4 % d'huile et de graisse et 96,59 % de solides en suspension ont été obtenus en utilisant un pH de 6,06, une tension appliquée de 18,2 V et temps de réaction de 23,5 minutes lors de l'utilisation de la conception Box-Behnken pour le biodiesel eaux usées Chavalparit, 2019.

-Hu et al. ont conclu qu'il existait une relation entre le débit et les matières en suspension dans un système d'électrocoagulation-flottation en continu avec électrodes en aluminium, l'efficacité d'élimination était diminuée lorsque le débit était supérieur à 800 ml/min, augmenté à 200 ml/min.

-Wang et al., ont déterminé qu'une efficacité d'élimination élevée du colorant simulé orange G pouvait être obtenue, lorsque le pH était de 4,5, la concentration de NaCl était de 0,75 g/L, l'espace entre les électrodes était de 10 mm, temps de traitement 10 minutes. Les auteurs n'observent aucune relation avec la tension appliquée. Phalakorkule et al., ont rapporté une étude pour le traitement du colorant réactif Reactive Blue 140 et du colorant dispersé II. Les résultats ont indiqué que la couleur a été réduite de 95% avec une consommation d'énergie de 1 kWh/m³ et une concentration de colorant de 100 mg/L pendant le traitement synthétique. Mollah et al., ont retiré 94,5% du colorant orange Eric Butler, 2011.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail a pour objectif l'amélioration de la qualité des eaux naturelles du barrage de Taksebt de la wilaya de TIZI OUZOU destinées à la consommation humaine. Ou nous avons particulièrement étudié le procédé de coagulation floculation qui a pour but l'élimination de la turbidité et de la matière organique, qui présentent un réel problème dans le traitement des eaux. Et ceux en remplaçant les coagulants chimiques habituels par des biocoagulant et aussi par coagulation électrochimiques.

Les essais exposés au cours de cette étude démontrent que l'eau du barrage de Taksebt présente une minéralisation moyenne, un pH légèrement basique (pH= 7.34) et une turbidité moyennement élevée de l'ordre de 25.6 NTU.

La coagulation floculation basée sur l'utilisation du sulfate d'aluminium comme coagulant a une grande performance sur la turbidité et le pouvoir d'éliminer les matières en suspensions colloïdales, les résultats de l'expérience ont donné un rendement très élevé en appliquant la dose optimale testé qui est de 97.07 %.

Les résultats des expériences ont donné des rendements très élevés par rapport à l'élimination de la turbidité en appliquant des biocoagulants à base des plantes (Cactus, Moringa Oleifera, Tanin) testés après optimisation des doses à appliquer par Jar Test. Ces rendements varient entre 79.51 % pour le tanin, 88.29 % pour le cactus, 92.19 % pour MO en graine et 61.46 % pour MO en feuille contre 97.07 % pour le sulfate d'aluminium. L'utilisation de biocoagulants est une technologie prometteuse pour le traitement des eaux de surface car elle est respectueuse de l'environnement et publiquement acceptée et a des performances fiables.

Dans les essais de l'EC notre recherche a comporté deux parties. La première s'est axée sur la concentration initiale de polluant ; la densité de courant et du temps de contact sur l'élimination de la turbidité. Tandis que, la deuxième s'est axée à l'étude de l'influence de la nature des électrodes sur les performances de la technique d'EC.

L'électrocoagulation est un procédé d'électrolyse à anodes solubles. En imposant un potentiel électrique entre les électrodes, et selon la nature des anodes, qui sont dans notre cas des plaques de fer, d'aluminium et de cuivre, des ions de fer (Fe^{3+}), d'aluminium (Al^{3+}) ou de cuivre (Cu^{2+}) sont libérés.

Les expérimentations nous ont permis d'étudier les cinétiques d'abattement de la turbidité en fonction des paramètres opératoires. Les résultats suivants ont été obtenus :

Conclusion générale

- Le procédé d'électrocoagulation a permis un abattement de la turbidité de 95.7 à 99.8 % (95.7 % pour l'électrode de fer, 96.48 % pour l'électrode d'aluminium et 99.8 % pour l'électrode de cuivre).
- La turbidité peut être presque totalement éliminée (< 1 NTU) par le traitement en utilisant une électrode de cuivre pendant 20 minutes (0.8 NTU pour un courant de 8 V et 0.3 NTU pour un courant de 12 V).
- La turbidité diminue en fonction du temps, de la charge électrique et de la nature de l'électrode utilisée (métal dissous). Cette baisse est d'autant plus importante que la densité de courant est élevée.

En égard à ce qui précède, l'électrocoagulation et la biocoagulation peuvent être considérées comme des techniques fiables de traitement de coagulation floculation des eaux de surface en vue de la production d'eaux potables ; vue que le rendement d'élimination de la turbidité avoisine et dépasse même les rendements obtenus en utilisant le coagulant chimique de référence (Sulfate d'aluminium) et restent conforme aux normes nationale et OMS qui fixent la turbidité acceptable pour une eau de consommation a une valeur ≤ 5 NTU.

Les références

-**Alem S, 2016** : Etude comparative entre coagulation et électrocoagulation, Faculté de Technologie ; Département d'Hydraulique. Université Abderrahmane Mira.

-**Ammar Kamel, Azdaou taous , 2017** : Utilisation des floculants naturels dans le traitement des eaux potables. specialite : chimie de l'environnement. universite mouloud mammeri de tizi-ouzou faculte des sciences departement de chimie.

-**Ayub Karanja, Li Fengting et Wilson Ng'ang'a, 2017** : resea rch article. Utilisation de cactus opuntia comme coagulant naturel : traitement de l'eau en développement des pays. Journal international de recherche avancée (IJAR).

-**Ahmed ammar Y, et Benhaddou M ; 2010** : étude expérimentale de la coagulation floculation par le sulfate d'alumine des matières en suspension. Mémoire d'ingénieur d'état en hydrogéologie. Université Abou Beker belkaid Tlemcen.

-**Bachi M et abdelli R ; 2005** : l'influence des paramètres physiques et chimiques sur la coagulation floculation et décantation, mémoire pour l'obtention de diplôme DEUA en hydraulique, département hydraulique, faculté des sciences de l'ingénieur. Université Abou Beker belkaid Tlemcen.

-**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.

-**Benaichata M., Boukerroui A., Assouli m; 2016** : coagulation flocculation test of djorf torba's water dam (bechar) using clay and lime: a comparative study. Département génie civil et hydraulique, Faculté des Sciences et Technologie, Université Tahri Mohamed Bechar. Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP) université de Bejaia. Larhyss Journal.

-**Bashir Adelodun, Matthieu Segun Ogunshina, Fidelis Odedishemi Ajibade, Taofeeq Sholagberu Abdulkadir, Hashim Olalekan Bakare, Kyung Sook Choi ;2020** : Études de modélisation cinétique et prévisionnelle de l'élimination des polluants organiques des eaux usées municipales à l'aide de la biomasse de *Moringa oleifera* comme coagulant.

- **Beltrán-Heredia J. Sánchez-Martín 2009 . Deseñamiento Volume 249, número 1 , 30** novembre 2009 , pages 353-358.
- Clara Delgado- Sánchez. 2017 ;** Nouvelles méthodes d'optimisation et de caractérisation de mousses à base de tanins pour l'isolation thermique du bâtiment. Universidad de Huelva. December.
- Chahmi gheidene Sarah, Tighezi Khadidja ; 2017.** Traitement des eaux par l'utilisation des gousses de la plante Moringa Oléifera ; université d'adrar faculté des sciences et de la technologie département des sciences de la matière.
- Cardot G ; 2005 :** Génie de l'environnement ; Les traitements de l'eau Procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus. Edition Ellipse. 2eme édition. Paris. France.302p.
- **Desjardins, R ; 1997 :** traitement des eaux ; édition de l'école polytechnique de Montréal, 2em édition revu et amélioré.
- **Dina T.MoussaMuftah H.El-Naas MustafaNasserMohammed J.Al-Marri; 2017:** A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges, Journal of Environmental Management, Article history. Pages 24-41.
- **Elias Assaad, 2016 :** étude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition, mémoire de la maîtrise en chimie, université du québec à montréal.
- **Ehsan Ali and ZahiraYaakob, 2012 :** Electrocoagulation for Treatment of Industrial Effluents and Hydrogen Production , livre : Electrolyse.
- Ezziane S ; 2007 :** traitement des eaux de rejet de l'unité CERAMIT « TENES » mémoire de magistère département des génies des procédés, faculté des sciences et sciences de l'ingénierie. Université Hassiba Ban Bouali, Chelef.
- Eric Butler, Yung-Tsé Hung, Ruth Yu-Li Yeh et Mohammed Suleiman Al Ahmad ; 2011 :** Électrocoagulation dans le traitement des eaux usées. Département de civile et Génie de l'environnement, État de Cleveland Université, Département de génie chimique, Université des sciences de Minghsin et Technologie, Hsin-Chu,304 Taïwan.

- **Gautam. S and G. Saini, 2020** : Use of natural coagulants for industrial wastewater treatment Department of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, Sharda University, Uttar Pradesh, India Global J. Environ.

Gousmi Nawel, 2019 : Etude de l'applicabilité de différents procédés électrochimiques et d'oxydation avancée pour le traitement du rejet de la Raffinerie d'Alger. Thèse de doctorat en sciences. Spécialité : génie des procédés option : génie de l'environnement ; université des sciences et de la technologie houari Boumediene.

-**Ghanem Hadjer Sai Ilham ; 2020** : Utilisation des bio-coagulants en traitement des eaux usées textiles. 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. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.

-**Hanafi, F., Sadif, N., Assobhei, O. & Mountadar, M ; 2009** : Traitement des margines par électrocoagulation avec des électrodes plates en aluminium. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 22 (4), 473–485.

-**Hernandez de lion; 2006** : supervision et diagnostic des procédés de production de l'eau potable, mémoire pour l'obtention de diplôme de docteur de l'institut nationale des sciences appliqué de Toulouse.

- **Haritiana Jeannelle Rakotoniriana, Nambinina Richard Randriana, Jean de Dieu Ramarosan, Frédéric Randrianarivelo, Augustin Martial Herihajaniavo, Lala Andrianaivo ; 2015** : Etude comparative des coagulants dans le traitement des eaux. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil.

-**Inoussa Zongo, 2009** : Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Institut National Polytechnique de Lorraine. Français. ffNNT.

-IG Ezemagu M.I. Ejimofor M.C.Menkiti ; 2020 : Environmental Advances. Etude turbidimétrique pour la décontamination d'effluents de peinture (PE) à l'aide de coagulant de graine de mucuna (MSC) : Conception statistique et modélisation de la coag-floculation. Environmental Advances.

-Jun Hou Zijun Yang ; Peifang Wang ;Chao Wang, Yangyang Yang ,Xun,Wang, 2018 :
Titre . Science of The Total Environment, Pages 264-2730.

- Kapse^aSR Samadder^b ; 2021 : *Moringa oleifera* à base de tourteau de graine de presse dégraissée biocoagulant pour le traitement du charbon effluent de l'usine d'enrichissement. Journal of Environmental.

-Khosla N.K., Venkachalam S.et Sonrasundaram P ; 1991 : Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation. J. Appl. Electrochem., 21, 986-990.

-Khoufia S., Fekia F et Sayadi S ; 2007 : Detoxification of olive mill wastewater by electrocoagulation and sedimentation processes. J. Hazard. Mater., 142, 58-67.

-Lamia Imine & Kahina Nait Amara. 2011 : élimination du nickel par électrocoagulation bipolaire ; université mouloud mammeri tizi ouzou faculté des sciences département de chimie.

-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). p.155-164.

-Malika Aoudjehane, Malika Rezzouk, Amara Kellil, Yves Aurelle et Christine Guigu, 2010 : Étude comparative de l'électrocoagulation et de la coagulation floculation vis-à-vis de la déstabilisation d'une émulsion d'huile de coupe. Revue des sciences de l'eau Journal of Water Science.

-Mounir Bennajah, 2007 : Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift ; École doctorale : Mécanique, énergétique, génie civil, procédés. Spécialité : Génie des procédés et de l'environnement.

-Médiatrice Mujawamariya ; 2012 : Optimisation de la décantation primaire par ajout de produits chimiques – Jar-Tests ; département de génie civil et de génie des eaux, Pavillon Adrien-Pouliot, Université Laval, 1065, av. de la médecine Québec, Canada.

-Mélanie Asselin, 2007 : utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargée en matière organique. Université du Québec institut national de la recherche scientifique centre eau, terre et environnement.

-Nora Aouba, 2017 : étude d'un coagulant organique naturel pour le traitement des eaux potable et usées : le tanfloc. mémoire maîtrise en génie des eaux (m. sc.) québec, canada.

- NSF International ANSI/NSF Standard 60.

-Nazeri Abdul Rahman1, Allene Albania Linus, Elisa Elizabeth Jihed, Umang Jata, Nurhidayah K. Muhd Firdaus Kumar, Adarsh Philip, Abdullah Yassin, Arif Parabi ; 2021 : Experimental Studies on Continuous Electrocoagulation Treatment of Peat Water in Sarawak with Copper Electrodes ; Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's Office ; The International Journal of Integrated Engineering.

- **Pierre Chevalier ; 2019** et les membres du Groupe scientifique sur l'eau de l'Institut national de santé publique du Québec ; Institut nationale de santé publique de Québec juin.

-Saiba Ali, Kourdali Sidali, 2011 : Élimination de l'acide humique par électrocoagulation à l'aide d'une anode sacrificielle en aluminium sous influence des paramètres opérationnelsFaculté des Sciences de l'Ingénieur, Laboratoire de Biochimie et de Microbiologie Industrielle, Département de Chimie Industrielle, Université Saad Dahlab de Blida.

- **Senigra A, Guesseir A, Necir O ; 2021** : Etude de l'élimination de la matière organique des eaux par l'électrocoagulation. Université d'El Oued Département d'Hydraulique et Génie Civil Faculté de Technologie.

-Saurabh Deshmukh, MN Hedaoo; 2019 : Traitement des eaux usées à l'aide d'un biocoagulant comme cactus Opuntia Ficus Indica , 2e Conférence internationale sur les nouvelles frontières en génie chimique, énergétique et environnemental (INCEEE).

-Selka M K, 2013 : Influence des particules argileuses sur la coagulation-floculation département hydraulique, Université abou bekr belkaid telemcen.

-Vasanthi Sethu, Anurita Selvarajoo, Lee Chee Wei, Pavitren Ganesan, Goh See Lim, Mok Xin Yuan; 2019 : Opuntia cactus as a novel bio-coagulant for the treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME). Department of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Nottingham Malaysia Campus, Progress in Energy and Environment. P 12.

- **Yves Mottot ; 2000** : conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 5 octobre 2000. Coagulants et flocculants

Annexes

Annexe 1

Les bienfaits de Moringa Oliefera

Tableau 11 : les valeurs nutritionnelles de moringa oliefera



Some antioxidants present in Moringa

Alanine	Delta 7-Avenasterol	Prolamine
Alpha-Carotene	Glutathione	Proline
Arginine	Histidine	Quercetin
Beta-Carotene	Indole Acetic Acid	Rutin
Beta-Sitosterol	Indoleacetonitrile	Selenium
Caffeoylquinic Acid	Kaempferol	Threonine
Campesterol	Leucine	Tryptophan
Carotenoids	Lutein	Xanthins
Chlorophyll	Methionine	Xanthophyll
Chromium	Nyristic Acid	Zeatin
Delta 5-Avenasterol	Palmitic Acid	Zeaxanthin

Vitamins

Vitamin A (Carotene)
Vitamin B1 (Thiamin)
Vitamin B2 (Riboflavin)
Vitamin B3 (Niacin)
Vitamin B6 (Pyridoxine)
Vitamin B7 (Biotin)
Vitamin C
Vitamin D
Vitamin E
Vitamin K

Minerals

Alpha-Carotene	Proline
Arginine	Quercetin
Beta-Carotene	Rutin
Beta-Sitosterol	Selenium
Caffeoylquinic Acid	Threonine
Campesterol	Tryptophan
Glutathione	Indoleacetonitrile
Histidine	Kaempferol
Indole Acetic Acid	Leucine

Essential Amino Acids

Phenylalanine	Tryptophan	Isoleucine	Lysine
Threonine	Valine	Leucine	Methionine

Non-essential Amino Acids

Alanine	Aspartic Acid	Glutamine	Histidine	Serine
Arginine	Cystine	Glycine	Proline	Tyrosine

Annexe 1

Tableau 12 : valeur nutritionnelle du *Moringa oleifera* (gousses, feuilles et graines)

Tableau 2. Valeur nutritionnelle du *Moringa oleifera*.^{*} Les gousses, les feuilles fraîches (cruées) et la poudre de feuilles sèches contiennent les quantités indiquées ci-dessous par portion de 100 grammes comestibles :

Élément analysé	Gousses	Feuilles	Poudre de feuille
Humidité (%)	86,9	75,0	7,5
Calories	26	92	205
Protéines (g)	2,5	6,7	27,1
Gras (g)	0,1	1,7	2,3
Glucides (g)	3,7	13,4	38,2
Fibres (g)	4,8	0,9	19,2
Minéraux (g)	2,0	2,3	-
Ca (mg)	30	440	2 003
Mg (mg)	24	24	368
P (mg)	110	70	204
K (mg)	259	259	1 324
Cu (mg)	3,1	1,1	0,57
Fe (mg)	5,3	7	28,2
S (mg)	137	137	870
Acide oxalique (mg)	10	101	1600
Vitamine A - β -carotène (mg)**	0,11	6,8	18,9
Vitamine B - choline (mg)	423	423	-
Vitamine B1 - thiamine (mg)	0,05	0,21	2,64
Vitamine B2 - riboflavine (mg)	0,07	0,05	20,5
Vitamine B3 - niacine (mg)	0,2	0,8	8,2
Vitamine C - acide ascorbique (mg)	120	220	17,3
Vitamine E - acétate d' α -tocophéryle (mg)	-	-	113
Arginine (mg)	90	402	1325
Histidine (mg)	27,5	141	613
Lysine (mg)	37,5	288	1325
Tryptophan (mg)	20	127	425
Phénylalanine (mg)	108	429	1388
Méthionine (mg)	35	134	350
Threonine (mg)	98	328	1188
Leucine (mg)	163	623	1950
Isoleucine (mg)	110	422	825
Valine (mg)	135	476	1063

Annexe 1

Annexe 2

Les normes de potabilité selon l'OMS

Tableau 13 : les normes de l'OMS

Paramètres généraux	Norme OMS (1993)	Normes UE (1998)
Matières en suspension	Pas de lignes directrices	Non mentionnées
DCO	Pas de lignes directrices	Non mentionnée
DBO	Pas de lignes directrices	Non mentionnée
Pouvoir oxydant		5,0 mg/L O ₂
Graisse/huiles	Pas de lignes directrices	Non mentionnées
Turbidité	Pas de lignes directrices ⁽¹⁾	Non mentionnée
pH	Pas de lignes directrices ⁽²⁾	Non mentionnée
Conductivité	250 microS/cm	250 microS/cm
Couleur	Pas de lignes directrices ⁽³⁾	Non mentionnée
oxygène dissous	Pas de lignes directrices ⁽⁴⁾	Non mentionnée
Dureté	Pas de lignes directrices ⁽⁵⁾	Non mentionnée
Conductivité électrique	Pas de lignes directrices	Non mentionnée

cations (ions positifs)	Norme OMS (1993)	Normes UE (1998)
Aluminium (Al)	0,2 mg/L	0,2 mg/L
Ammoniac (NH ₄)	Pas de lignes directrices	0,50 mg/L
Antimoine (Sb)	0,005 mg/L	0,005 mg/L
Arsenic (As)	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Baryum (Ba)	0,3 mg/L	Non mentionnée
Beryllium (Be)	Pas de lignes directrices	Non mentionnée
Bore (B)	0,3 mg/L	0,001 mg/L
Brome (Br)	Pas de lignes directrices	0,01 mg/L
Cadmium (Cd)	0,003 mg/L	0,005 mg/L
Chrome (Cr)	0,05 mg/L	0,05 mg/L
Cuivre (Cu)	2 mg/L	2,0 mg/L
Fer (Fe)	Pas de lignes directrices ⁽⁶⁾	0,2 mg/L
Plomb (Pb)	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Manganèse (Mn)	0,5 mg/L	0,05 mg/L
Mercure (Hg)	0,001 mg/L	0,001 mg/L
Molybdène (Mo)	0,07 mg/L	Non mentionnée
Nickel (Ni)	0,02 mg/L	0,02 mg/L
Azote (total N)	50 mg/L	Non mentionnée
Sélénium (Se)	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Argent (Ag)	Pas de lignes directrices	Non mentionnée
Sodium (Na)	200 mg/L	200 mg/L
Etain (Sn) inorganique	Pas de lignes directrices	Non mentionnée
Uranium (U)	1,4 mg/L	Non mentionnée
Zinc (Zn)	3 mg/L	Non mentionnée

anions (ions négatifs)	Norme OMS (1993)	Normes UE (1998)
Chlore (Cl)	250 mg/L	250 mg/L
Cyanure (CN)	0,07 mg/L	0,05 mg/L
Fluor (F)	1,5 mg/L	1,5 mg/L
Sulfate (SO ₄)	500 mg/L	250 mg/L
Nitrate (NO ₃)	(Voir azote)	50 mg/L
Nitrite (NO ₂)	(voir azote)	0,50 mg/L

Paramètres microbiologique	Norme OMS (1993)	Normes UE (1998)
Escherichia coli	Non mentionnée	0 in 250 mL
Enterococci	Non mentionnée	0 in 250 mL
Pseudomonas		
aeruginosa	Non mentionnée	0 in 250 mL
Clostridium		
perfringens	Non mentionnée	0 in 100 mL
bactérie coliforme	Non mentionnée	0 in 100 mL
Nbre de colonie à 22oC	Non mentionnée	100/mL
Nbre de colonie à 37oC	Non mentionnée	20/mL

Autres paramètres	Norme OMS (1993)	Normes UE (1998)
Acrylamide	Non mentionnée	0,0001 mg/L
Benzène (C ₆ H ₆)	Non mentionnée	0,001 mg/L
Benzo(a)pyrène	Non mentionnée	0,00001 mg/L
dioxyde de chlore (ClO ₂)	0,4 mg/L	
1,2-dichloroéthane	Non mentionnée	0,003 mg/L
Epichlorhydrine	Non mentionnée	0,0001 mg/L
Pesticides	Non mentionnée	0,0001 mg/L
Pesticides - Totaux	Non mentionnée	0,0005 mg/L
PAHs	Non mentionnée	0,0001 mg/L
Tetrachloroéthène	Non mentionnée	0,01 mg/L
Trichloroéthène	Non mentionnée	0,01 mg/L
Trihalométhanes	Non mentionnée	0,1 mg/L
Tritium (H ₃)	Non mentionnée	100 Bq/L
Chlorure de vinyle	Non mentionnée	0,0005 mg/L

(1) Desirée: Moins de 5 NTU
(2) Desirée: 6.5-8.5
(3) Desirée: 15 mg/l Pt-Co
(4) Desirée: Moins de 75% de la concentration de saturation

Résumé

Résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux procédés de coagulation dans le traitement des eaux de surface par voies électrochimique et biologique. Dans la biocoagulation nous avons testé des coagulants organiques, tel que le Cactus, Moringa Oleifera et le Tanin avec différentes concentrations. Le suivi de paramètres physico-chimiques à différents temps de décantation a permis de déterminer les conditions optimales et d'évaluer l'efficacité des traitements. Des résultats, il est ressorti qu'en fonction des caractéristiques des eaux, le temps de décantation compris entre 1 et 2 heures est suffisant pour éliminer presque la totalité des matières en suspension et des colloïdes. L'abattement de la turbidité obtenu était de 92,19 % pour MO en graine, celle du cactus 88,29 % ; le tanin (79,51 %) et MO en feuilles (61,46 %) pour un temps de décantation de 2 heures. Pour l'électrocoagulation: le pH, la densité du courant, le temps de contact, la concentration initiale et la distance inter électrode ont été étudiés en utilisant les lames d'électrodes de fer, d'aluminium et du cuivre. Les expériences ont été réalisées dans un réacteur en batch. Dans le souci d'étudier la performance des différentes électrodes sur l'élimination de la turbidité, les électrodes de fer, d'aluminium et de cuivre ont été choisies. Les résultats de ces expériences ont montrés que le cuivre est plus efficace avec un abattement de la turbidité de 99,21 %, suivie de l'aluminium (96,48 %) et du fer (95,70 %).

Mots clés : Biocoagulation, Electrocoagulation, Coagulation.

Abstract

In this study, we were interested in coagulation processes in surface water treatment by electrochemical and biological means. In biocoagulation we tested organic coagulants, such as Cactus, Moringa Oleifera and Tannin with different concentrations. The monitoring of physico-chemical parameters at different settling times allowed to determine the optimal conditions and to evaluate the efficiency of the treatments. The results showed that, depending on the characteristics of the water, the settling time of between 1 and 2 hours is sufficient to eliminate almost all the suspended matter and colloids. The turbidity removal obtained was 92.19% for seed MO, 88.29% for cactus MO, 79.51% for tannin and 61.46% for leaf MO for a settling time of 2 hours. For electrocoagulation: pH, current density, contact time, initial concentration and inter-electrode distance were studied using iron, aluminium and copper electrode blades. The experiments were carried out in a batch reactor. In order to study the

performance of the different electrodes on turbidity removal, iron, aluminium and copper electrodes were chosen. The results of the experiments showed that copper was most effective with a turbidity removal of 99.21%, followed by aluminium (96.48%) and iron (95.70%).

Keywords : Biocoagulation, Electrocoagulation, Coagulation.

ملخص

اهتمنا في هذه الدراسة بعمليات التخثر لمعالجة المياه السطحية بالوسائل الكهروكيميائية والبيولوجية ، وفي التخثير الحيوي اختبرنا المخثرات العضوية مثل الصبار والمورينجا الأوليفيرا والتانين بتركيزات مختلفة. جعلت مراقبة المعلمات الفيزيائية والكيميائية في أوقات الاستقرار المختلفة من الممكن تحديد الظروف المثلى وتقييم فعالية العلاجات. من النتائج ، تبين أنه اعتمادًا على خصائص الماء ، فإن وقت الترسيب بين ساعة وساعتين كافٍ لإزالة كل المواد المعلقة والغرويات تقريبًا. نسبة تقليل التعكر كانت 92.19% لبذور المورينجا أوليفيرا ، وبذور الصبار 88.29%. التانين (79.51%) وأوراق المورينجا أوليفيرا (61.46%) لمدة ساعتين. الهدف من هذه التقنية هو تحسين إزالة العكارة من المياه السطحية بطريقة التخثير الكهربائي. في الواقع ، تمت دراسة معاملات التشغيل مثل: الأس الهيدروجيني ، وكثافة التيار ، ووقت التلامس ، والتركيز الأولي ، والمسافة بين الأقطاب الكهربائية باستخدام ألواح الحديد والألومنيوم والنحاس. أجريت التجارب في مفاعل دفعي. من أجل دراسة أداء الأقطاب الكهربائية المختلفة في إزالة التعكر تم اختيار أقطاب الحديد والألمنيوم والنحاس. أظهرت نتائج هذه التجارب أن النحاس أكثر كفاءة مع تقليل التعكر بنسبة 99.21% ، يليه الألمنيوم (96.48%) والحديد (95.70%).

..الكلمات المفتاحية: التخثير الحيوي ، التخثير الكهربائي ، التخثر