



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University – Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم هندسة الطرائق
Process Engineering Department of



Department of Process Engineering

The Date

Ref :/U.M/F.S.T/2023

قسم هندسة الطرائق

التاريخ :

رقم : / ج.م.ك.ع.ت//2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DEMASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés de l'environnement

Option : Génie des procédés de l'environnement

Thème

Elimination de la turbidité des eaux usées par le jus de cactus :

Opuntia ficus indica

Présenté par

1- BOUKSARA Zahira

2- MENAD Kheira

Soutenu le 21/06/ 2023 devant le jury composé de :

Président :	MOHAMED SEGHIR Zahira	MBC	Université de Mostaganem
Examineur :	MEZOUAGH Amina	MBC	Université de Mostaganem
Encadreur:	KELLADI Malika	MBC	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier le bon Dieu pour nous avoir donné force, courage, patience et volonté pour mener à terme ce modeste travail.

Nous voudrions exprimer notre sincère gratitude à Madame KHELLADI Malika, pour la confiance qu'il a bien voulu nous accorder. Nous la remercions sa grande disponibilité, sa patience, son soutien chaleureux et ses conseils avisés. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour ses critiques constructives d'une rigueur absolue.

Nos vifs remerciements s'adressent également à toute l'équipe de laboratoire de l'environnement, particulièrement Monsieur Ali, et les techniciens qui nous ont acceptés au sein de leur laboratoire, et ils nous ont beaucoup aidés.

Nous remercions aussi les membres de Jury Dr MOHAMED SEGUIR Zahira et Mme MEZOUAGH Amina pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail en tant que présidente et examinatrice. Sans oublier Madame MEKIBES Zohra cheffe de département de génie des procédés et l'ensemble des enseignants(es) de leur soutien et leur compassion envers nous pendant ces dernières années.

Merci à toute la famille Bouksara et la famille Menad, particulièrement nos parents, notre joie et raison de vivre, Nos frères, sœurs, et proches qui nous ont accompagné et fortement encouragée pendant notre parcours.

Nous exprimons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en sens de reconnaissance et de respect :

*-A ma mère CHRIFA et mon père TOUATI pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à
mon*

Égard

-A Moon grand frère CHAREF

-A Moon petit frère TITOU

-A ma sœur NADIA

- A mon binôme ZAHIRA

-A toute ma famille

-A tous mes amis

-A tous les promotions Master Génie Chimique et Génie des Procédés D'environnement

KHEIRA

Dédicace

Je dédie ce travail à : A mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler .je demande à dieu d'avoir pitié de toi, père, et de te protéger, mère.

A celle que j 'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet, celle qui n'a cessée de m'encourager et de me conseiller : Aziza, et bien sur mon grand frère Hadj m'a soutenu dans ma vie et mes études, merci pour vos efforts et votre confiance.

A mes frères Fayçal, Habibe, Abdel Mouncif, seifeddinne, Ayoub.

A toute ma famille, et mes amis, A mon binôme KHeira. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pur que se projet soit possible, je vous dis merci.

ZAHIRA

تركز هذه الدراسة الحالية على إعداد وتطبيق مادة عضوية جديدة قابلة للتحلل البيولوجي غير ملوثة واقتصادية تعتمد على الصبار الطبيعي المتاح لتصفية المياه. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو استبدال المنتجات التجارية التقليدية مثل المخثرات الكيميائية والبوليمرات العضوية الاصطناعية (الأيونية أو الموجبة أو غير الأيونية) (التي ثبت أنها غير كافية أو غير ناجحة أو مكلفة للتنفيذ والتي يمكن أن تلبى معايير الجودة. يجب أن يقلل استخدام هذا الجيل الجديد من المواد الحيوية من تكلفة معالجة المياه في سياق التنمية الصحية والبيئية والمستدامة تم تقييم فعالية هذا المنتج الجديد من خلال "اختبار الجار تاست"، لفحص بعض العوامل للتخلص من تعكر المياه. اظهرت النتائج بوضوح انخفاض درجة المياه العكرة.

Abstract:

This present study deals with the preparation and application of a new biodegradable, non-polluting and economical bioflocculant based on available natural cactus cladodes (Opuntia Ficus Indica) for water clarification. The main objective of this work is to replace conventional commercial products such as chemical coagulants (FeCl₃, Al₂ (SO₄)₃) synthetic organic polymers, proving inadequate, unsuccessful or expensive to apply and to be able to meet increasingly stringent standards. The use of this new generation of biomaterials should reduce the cost of water treatment in a health, environmental and sustainable development context, the efficiency of this new-gelled product is evaluated through a Jar Test, by examining some parameters deemed useful in eliminating turbidity. These parameters are turbidity.

The present results showed overall and clearly that the maximum reduction in the turbidity of synthetic water is obtained for a very low volumetric.

Key words: Bio-flocculant, Pricklypear, settling, coagulation/floculation

Résumé

Cette présente étude porte sur la préparation et l'application d'un nouveau bio-floculant biodégradable, non polluant et économique à base de cladodes de cactus naturels disponibles (*Opuntia Ficus Indica*) pour la clarification de l'eau. L'objectif principal de ce travail est de remplacer les produits commerciaux classiques tels que les coagulants chimiques (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), polymères organiques synthétiques, s'avérant inadéquats, infructueux ou coûteux à mettre en oeuvre et pouvant répondre à des normes de plus en plus sévères. L'utilisation de cette nouvelle génération de biomatériaux devrait réduire le coût du traitement de l'eau dans un contexte sanitaire, environnemental et de développement durable, l'efficacité de ce nouveau produit est évaluée à travers un « Jar Test », en examinant certains paramètres utiles pour éliminer la turbidité.

Les résultats ont montré clairement que la réduction maximale de la turbidité de l'eau usée est obtenue pour un rapport volumétrique très faible

Mots clés: *Bio-floculant, Opuntia Ficus Indica, decantation, coagulation/floculation*

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralité sur les eaux usées	2
I.1 Définition des eaux usées	3
I.2 Les différents types des eaux usées	3
I.2.1 Eaux usées domestiques	3
I.2.2 Les eaux usées industrielles	3
I.2.3 Les eaux agricoles	4
I.2.4 Les eaux pluviales	4
I.3 Les différents polluants dans les eaux usées	4
I.3.1 Pollution physique	4
I.3.2 Pollution chimique :	5
I.3.3 Pollution par le phosphore	6
I.3.4 Pollution par l'azote	6
I.3.5 La pollution microbiologique	6
I.4 les caractéristiques des eaux usées	6
I.4.1 les paramètres physiques	6
a) La température	6
b) Les matières en suspension (MES)	7
c) La turbidité	7
d) La conductivité	7
I.4.2 Les paramètres chimiques	7
a) Le potentiel Hydrogène (pH)	7
b) Demande chimique en oxygène (DCO)	7
c) Teneurs en azote et en phosphore	8

I.4.3	Les paramètres biologiques	8
a)	Bactérie	8
b)	Helminthe	8
c)	Virus	9
d)	Protozoaire	9
I.5	Objectifs du traitement des eaux usées	9
	CHAPITRE II:Coagulation/floculation	11
II.1	Introduction	12
II.2	les particules mises en jeu (les colloïdes)	12
II.3	Théorie de la double couche	13
II.3.1	Potentiel Zeta	14
II.4	Définition de La coagulation/floculation	14
II.5	Principe de la coagulation/floculation	14
II.5.1	La coagulation	15
Les modes de déstabilisation des particules colloïdales		15
II.5.1.1	La compression de la double couche	15
II.5.1.2	Adsorption et neutralisation des charges	15
II.5.1.3	Emprisonnement et piégeage	16
II.5.1.4	Adsorption et pontage	16
II.5.2	Facteurs affectant la coagulation/ floculation	17
a)	Influence du paramètre pH	17
b)	Influence de la dose du coagulant	17
c)	Influence de la température	17
d)	Influence de la turbidité	18
e)	Influence de la vitesse d'agitation	18
II.6	Les types de coagulation	18
II.6.1	La coagulation chimique	18

II.6.2	L'électrocoagulation	18
II.6.3	La bio floculation	18
II.7	Types de floculation	19
II.7.1	Floculation physique	19
II.7.2	Floculation péri cinétique	19
II.7.3	Floculation Ortho cinétique	19
II.7.4	Floculation chimique	19
II.8	Floculants utilisés	20
II.8.1	Floculants organiques	20
II.8.2	Floculants minéraux	20
II.8.3	Floculants de synthèse	20
II.8.4	Mise en œuvre de la coagulation/floculation	20
II.9	Décantation	21
II.9.1	Définition	21
II.9.2	Types de décantation	21
CHAPITRE III : Généralités sur le figuier de barbarie		23
III.1	Figue de barbarie dans le monde végétal	24
III.2	Morphologie	24
III.3	Le Figuier de barbarie en Algérie	25
III.4	Position systématique du figuier de barbarie	27
Chapitre IV: Partie expérimentale		28
IV.1	Introduction	29
IV.2	Matériels et méthodes	29
IV.3	Les appareils utilisés	29
IV.4	Echantillonnage	32
IV.5	Méthode de préparation du biofloculant	32
IV.5.1	La récolte de la plante	32

IV.5.2	Préparation de la poudre de cactus	33
IV.5.3	Préparation le jus de cactus	34
IV.6	Optimisation des paramètres de coagulation par le sulfate d'aluminium	35
IV.6.1	Optimisation du pH	35
IV.6.2	Optimisation de la dose du coagulant	36
IV.7	Optimisation des paramètres de coagulation par le jus de cactus	36
IV.7.1	Optimisation du pH	36
IV.7.2	Optimisation de la dose du coagulant naturel (jus de cactus)	37
IV.8	Optimisation des paramètres de coagulation/floculation par la poudre de cactus	37
IV.8.1	Optimisation du pH	37
IV.8.2	Optimisation de la dose du coagulant (la poudre de cactus)	37
IV.9	Résultats et discussion	38
IV.9.1	Caractéristiques des eaux usées synthétiques	38
A.	traitement des eaux synthétiques (polluant inorganique)	39
IV.10	Coagulation/floculation par le sulfate d'aluminium	39
IV.11	Coagulation/floculation par le jus de cactus	40
IV.12	Coagulation/floculation par le coagulant poudre de cactus	42
B.	traitement des eaux synthétiques (polluant organique)	44
IV.13	Coagulation/floculation par le sulfate d'aluminium	44
IV.14	Coagulation/floculation par le jus de cactus	46
IV.15	Coagulation/floculation avec la poudre de cactus	47
	Conclusion	50
	Référence bibliographique	51

Liste des figures

Figure II.1: Potentiel électrique de particules colloïdales.....	13
Figure II.2: Mécanisme de la coagulation / Flocculation	15
Figure II.3: Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation.....	16
Figure II.4: Adsorption et pontage à l'aide de polymères.	17
Figure II.5: Origine du figuier de barbarie	24
Figure III.1: Schéma illustrant les différentes parties du figuier de Barbarie.....	25
Figure III.2: Fiquier de barbarie (<i>Opuntia ficus indica</i>) de la région de Mesra , Mostaganem	26
Figure III.3: Variété d' <i>Opuntia ficus-indica</i> épineuse : mois mai(A)/ mois avril (B)	26
Figure IV.1: Le jar-test	30
Figure IV.2: Turbidimètre HI 88713 (HANNA)	30
Figure IV.3: pH- mètre type HANNA 211	31
Figure IV.4: balance électronique.....	32
Figure IV.5: Champ de cactus (figue de barbarie) dans la région de Mesra (Mostaganem).....	33
Figure IV.6 :Les étapes de préparation de la poudre de cactus:	34
Figure IV.7:Les étapes de préparation du Jus de cactus	35
Figure IV.8::Variation de la turbidité en fonction de temps à différentes valeurs de pH.....	39
Figure IV.9:Variation de la turbidité en fonction de temps en différentes dose de sulfate d'aluminium.....	40
Figure IV.10:Effet de la température sur la conservation du coagulant	41
Figure IV.11:Variation de la turbidité en fonction du pH et du temps.....	41

Figure IV.12:la variation de la turbidité en fonction de temps de déférent dose de jus	42
Figure IV.13:Variation de la turbidité en fonction du temps à différents pH.....	43
Figure IV.14:la variation de la turbidité en fonction de temps en différent est dose de la poudre de cactus	44
Figure IV.15:la variation de la turbidité en fonction de temps en différentes valeurs de pH.....	45
Figure IV.16:la variation de la turbidité en fonction de temps en différentes dose de sulfate d'aluminium.....	46
FigureIV. 17:la variation de la turbidité en fonction du temps à différentes valeurs de pH.....	46
Figure IV.18:Variation de la turbidité en fonction du temps à différentes dose de jus de cactus.....	47
Figure IV.19:Variation de la turbidité en fonction du temps à différentes valeurs de pH.....	48
Figure IV.20:Variation de la turbidité en fonction du temps à différentes doses de poudre de cactus.....	49

Liste des tableaux

Tableau I.1: objectifs des différentes étapes de traitement des eaux usées[14].....	10
Tableau IV.1: Classe de turbidité usuelle (NTU).	31
Tableau IV.2:les caractéristiques des eaux usées :	38

Introduction générale

L'augmentation rapide de l'industrialisation, de l'urbanisation et de la population au cours des dernières décennies a provoqué une augmentation spectaculaire de la demande en eau de surface, ainsi que des détériorations importantes de la qualité de l'eau dans le monde entier [1].

La pollution des eaux, définie comme étant une dégradation physique, chimique, ou biologique défavorable provoquée par l'activité humaine, perturbe des conditions de vie et des équilibres aquatiques ne sont pas encore conscients de la gravité de ce problème [2].

Le procédé de coagulation/floculation offre divers avantages pour le traitement des eaux usées industrielles et municipales, notamment la sensibilité réduite aux charges toxiques et aux quantités plus élevées de matières organiques, la facilité d'utilisation, l'économie d'énergie, etc. [1].

Le but de la coagulation repose sur la déstabilisation des particules en suspension par injection et dispersion de produits chimiques. Par la suite, la floculation favorise au moyen d'un mélange les contacts entre les particules déstabilisées pour former un floc facilement éliminable par décantation [1].

Ces produits chimiques appelés coagulants peuvent avoir des effets nocifs tant sur la santé humaine que sur l'environnement. Le sulfate d'aluminium est le coagulant le plus largement utilisé en raison de sa disponibilité et de son prix [1].

La recherche de produits alternatifs devient une nécessité. Dans un contexte de santé, d'environnement et de développement durable ; nous concentrerons notre étude sur l'intégration de produits biodégradables dans le processus de traitement de l'eau [1].

Pour cela nous avons choisi de travailler sur la valorisation des cladodes de cactus (Figue de barbarie) disponibles localement dans la ville Mostaganem, Algérie

Chapitre I : Généralité sur les eaux usées

I.1 Définition des eaux usées

Les eaux résiduaires urbaines, ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants provenant essentiellement de l'activité humaine suite à une utilisation domestique, industrielle ou agricole [2]. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau. La pollution de l'eau survient lorsque des matières sont déversées dans l'eau qui en dégrade sa qualité, ce qui rend son utilisation dangereuse et perturbe le milieu aquatique. Le traitement des eaux usées est une alternative susceptible de résoudre les différents problèmes de pollution des milieux aquatiques. Ce chapitre a pour objectif de donner une idée sur les origines des eaux usées, leurs systèmes d'évacuation, ainsi que les différentes techniques utilisées pour leur épuration [1].

I.2 Les différents types des eaux usées

I.2.1 Eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont constituées essentiellement d'excréments humains, des eaux ménagères de vaisselle chargées de détergents, de graisses appelées eaux grises et de toilette chargées de matières organiques azotées, phosphatées et de germes fécaux appelées eaux noires [3].

I.2.2 Les eaux usées industrielles

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles sont chargées en différentes substances chimiques organiques et métalliques. Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :

- des graisses (industries agroalimentaires) ;
- des hydrocarbures (raffineries) ;
- des métaux (traitements de surface, métallurgie) ;
- des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries)
- de l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques) ;
- des matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs)

Avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, les eaux usées industrielles doivent faire l'objet d'un traitement. Elles ne sont mélangées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des stations d'épurations [3].

I.2.3 Les eaux agricoles

L'agriculture est une source de pollution des eaux non négligeable car elle apporte les engrais et les pesticides. Elle est la cause essentielle des pollutions diffuses. Les eaux agricoles issues de terres cultivées chargés d'engrais nitrates et phosphates, sous une forme ionique ou en quantité telle, qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés par les plantes, conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues[3].

I.2.4 Les eaux pluviales

Les eaux de pluie ruissellent dans les rues où sont accumulés polluants atmosphériques, poussières, débris, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules. Les eaux de pluies, collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement et acheminées vers une station d'épuration, sont souvent drainées directement dans les rivières entraînant ainsi une pollution intense du milieu aquatique [3].

I.3 Les différents polluants dans les eaux usées

I.3.1 Pollution physique

On parle de ce type de pollution quand le milieu pollué est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Elle regroupe trois types de pollutions : mécanique, thermique, radioactive.

a) Pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les eaux résiduaires industrielles, ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension MES [4].

b) Pollution thermique

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries, aciéries.); ont une température de

l'ordre de (70 à 80) °C. Elle diminue jusqu' à (40 à 45) °C lorsqu'elle contacte les eaux des milieux aquatiques entraînant un réchauffement de l'eau, qui influe sur la solubilité de l'oxygène [5].

c) Pollution radioactive

C'est celle occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets qui trouvent leur source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ces formes (installations et centrales d'exploitation de mine d'uranium, traitement des déchets radioactifs). Les éléments radioactifs s'incorporent dans les molécules des organismes suivants. Plus on s'élève dans l'échelle alimentaire plus les organismes sont sensibles aux rayonnements [6].

I.3.2 Pollution chimique :

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle, domestique et agricole. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories :

- * Organique (hydrocarbures, pesticides, détergents.).
- * Minérale (métaux lourds, cyanure, azote, phosphore...) [7].

a) Pollution organique

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...).

Ils provoquent une consommation d'oxygène dissous de ces eaux, en entraînant la mort des poissons par asphyxie et le développement (dépôts de matières organiques au fond des rivières) de fermentation anaérobie (putréfaction) génératrices de nuisances olfactives [5].

b) Pollution minérale

Les métaux lourds

Un grand nombre d'industries utilisent et rejettent des quantités importantes de métaux lourds, ce qui les rend une véritable menace pour l'environnement. Ces polluants ont un fort impact toxicologique sur nos sources hydriques.

Parmi ces métaux toxiques, on peut citer : le plomb, le mercure, le chrome, le cadmium et l'arsenic. Les métaux lourds se caractérisent par leur persistance, leur toxicité et leur pouvoir d'accumulation dans le milieu naturel, et par conséquent la présence de ces derniers dans l'environnement peut être nuisible à plusieurs variétés d'espèces vivantes.

Par ordre décroissant de toxicité spécifique, les métaux sont classés comme suit :

Hg > Cr > Ti > Mo > Cu > Ni > Pb > Zn.

La toxicité des métaux lourds a conduit les pouvoirs publics à diminuer les émissions en fixant des teneurs [8].

I.3.3 Pollution par le phosphore

Le phosphore a pour origine les industries du traitement de surfaces des métaux, les laveries industrielles des fabrications, d'engrais agroalimentaire [9]. Comme l'azote, le phosphore est un élément nutritif, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques [10].

I.3.4 Pollution par l'azote

Les activités industrielles, peuvent être à l'origine des rejets plus ou moins riches en azote (élément nutritif) issu des fabrications d'engrais, des cokeries, et des industries chimiques et agroalimentaires. L'azote existe sous deux formes : la forme réduite qui regroupe l'azote ammoniacal (NH_3 ou NH^+) et l'azote organique (protéine, créatine, acide urique). Plus une forme oxydée en ions nitrites (NO^{2-}) et nitrates (NO_3) [10].

I.3.5 La pollution microbiologique

L'eau peut contenir des microorganismes pathogènes (virus, bactéries, parasites) ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (industrie, utilisation domestique...) [11].

I.4 Les caractéristiques des eaux usées

I.4.1 Les paramètres physiques

a) La température

La température est un facteur écologique important des milieux aqueux, influencée par les conditions environnementales liées à la position géographique de la localité, à la géologie des terrains traversés, l'hydrologie et surtout au climat. Elle joue un rôle dans la solubilité des sels et des gaz, donc la détermination de la conductivité électrique, du pH et détermine le taux et la vitesse des réactions de dégradation. [9].

b) Les matières en suspension (MES)

Il s'agit de matières qui ne sont ni solubles ni colloïdales, d'origine organique ou minérale. Les matières volatiles en suspension (MVS) représentent la fraction organique des matières en suspension, elles constituent environ 70-80% de MES pour les eaux usées urbaines, les matières minérales (MM) elles représentent la présence des sels, silices et poussières).

La détermination des matières en suspension (MES) dans les eaux usées se fait par filtration sur membrane, soit par centrifugation [9].

c) La turbidité

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les micro-organismes. Une faible part de la turbidité peut être due également la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. On mesure ici la résistance qu'elle oppose par l'eau au passage de la lumière pour lui donner une valeur [12].

d) La conductivité

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm². L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m). Cette dernière permet d'apprécier globalement l'ensemble des produits en solution dans l'eau [12].

I.4.2 Les paramètres chimiques

a) Le potentiel Hydrogène (pH)

Le pH est un paramètre qui permet de mesurer l'alcalinité ou le basic. Sa mesure doit s'effectuer sur place de préférence par la méthode potentiométrique. La mesure électrique, quoique délicate, peut seule donner une valeur exacte, car elle est indépendante du potentiel d'oxydoréduction, de la couleur du milieu, ou de la turbidité et des matières colloïdales [13].

b) Demande chimique en oxygène (DCO)

Elle représente la teneur totale de l'eau en matières organiques biodégradables ou pas présente dans l'eau. Nous noterons cependant que certains composés chimiques ne sont pas

oxydés complètement par cette méthode, comme par exemple l'azote organique. Le principe repose globalement sur la recherche d'un besoin d'oxygène Del 'échantillon pour dégrader la matière organique. Mais dans ce cas, l'oxygène est fourni par un oxydant puissant [13].

c) Teneurs en azote et en phosphore

Les teneurs en azote et en phosphore sont également des paramètres très importants.

Les rejets excessifs de phosphore et d'azote contribuent à l'eutrophisation des lacs et des Cours d'eau. Ce phénomène se caractérise par la prolifération d'algues et la diminution de L'oxygène dissous, ce qui appauvrit la faune et flore des eaux superficielles (cours d'eau, lacs, etc.[13].

d) Demande biochimique en oxygène (DBO)

Elle correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer par oxydation, et avec l'intervention des bactéries, les matières organiques de l'eau usée.

La DBO est un phénomène évolutif dans la mesure où elle permet d'étudier le comportement d'une charge organique (et plus généralement celui d'un échantillon), il est évident qu'il ne peut y avoir de détermination de DBO que lorsque les micro-organismes présents sont capables d'assimiler les matières organiques de l'échantillon.

La DBO5 c'est la consommation d'oxygène à 20°C et dans l'obscurité d'un échantillon préalablement ensemencé pendant cinq jours, temps qui assure l'oxydation biologique d'une fraction des matières organiques carbonées [13].

I.4.3 Les paramètres biologiques

a) Bactérie

Les bactéries sont des micro-organismes unicellulaires, de différentes formes (sphérique, cylindriques, incurvées...), dont la taille est de l'ordre de quelques microns (de 0,5 à 5 μm), à l'exception des bactéries filamenteuses de tailles souvent supérieures (de 10 à plus de 500 μm) et peuvent être pluricellulaires [13].

b) Helminthe

Ils constituent un groupe de parasites que l'on retrouve très fréquemment et en grand nombre dans les eaux usées. Les helminthes survivent dans l'eau, sous forme de kystes minuscules, visibles à la loupe.

Une fois absorbés, avec l'eau ou les aliments, les kystes se transforment dans les intestins en parasites adultes et se multiplient, entraînant divers types de manifestations cliniques et de graves anémies qui s'accompagnent de malnutritions redoutables surtout chez les enfants. Les helminthes les plus fréquemment rencontrées sont les *Ascaris lombricoïdes*, les oxyures et les giardias [13].

c) Virus

Les virus sont présents eux aussi en quantité dans les effluents urbains (poliovirus, adénovirus, hépatite A, etc.) mais y sont rarement recherchés. En revanche, ces analyses sont un peu plus fréquentes dans les eaux superficielles, bien que cela n'apporte pas beaucoup d'informations supplémentaires par rapport au germe [13].

d) Protozoaire

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitement des eaux usées. On peut citer parmi ceux-ci *Entamoebahistoltyica*, responsable de la dysenterie amibienne ou encore *Giardia lamblia* [13].

I.5 Objectifs du traitement des eaux usées

L'objectif principal du traitement des eaux usées est de réduire ou éliminer les contaminants présents dans les effluents avant leur rejet dans le milieu récepteur et respecter ainsi les exigences de rejet environnemental. Selon l'origine des eaux usées, une chaîne de traitement se remise en place afin d'atteindre des cibles préétablies. Typiquement, le procédé de traitement des eaux usées sera composé de plusieurs étapes : prétraitement, primaire, secondaire et tertiaire, et lorsque c'est nécessaire une étape avancée peut s'ajouter [1].

Tableau I.1: objectifs des différentes étapes de traitement des eaux usées [14]

Les étapes de traitement	Objectifs de traitement
<p>Traitement préliminaires ou prétraitement</p>	<p>De nature mécanique, ils sont semblables à ceux de l'eau potable (dégrillage, dessablage, déshuilage et dégraissage)</p>
<p>Traitement primaire</p>	<p>Il s'agit d'une décantation, habituellement sans coagulation chimique préalable, ayant pour but d'éliminer les matières organiques séparables par sédimentation.</p>
<p>Traitement secondaires</p>	<p>Ce sont des traitements biologiques aérobies, analogues à ceux qui ont lieu dans les étangs, mais à rendement élevé.</p>
<p>Traitement tertiaires</p>	<p>Ils ont pour but de compléter plus ou moins l'épuration selon les normes de qualité applicable aux eaux épurées ou selon les utilisations de ces eaux, absents ou peu nombreux dans le cas des rejets en rivière, ils deviennent en revanche multiples s'il s'agit d'affiner l'eau au vue d'une réutilisation.</p>

CHAPITRE II: Coagulation/floculation

II.1 Introduction

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, puisque leur concentration est très stable, ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres [15].

Le présent chapitre a pour but la présentation de la théorie du procédé de coagulation/floculation utilisé dans le domaine de l'élimination la turbidité des eaux usées, nous allons détailler sur ses principes, son but, l'influence des différents paramètres réactionnels sur l'efficacité du traitement et les différents coagulants et adjuvants utilisés pour éliminer la turbidité.

II.2 Les particules mises en jeu (les colloïdes)

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

- état de suspension qui regroupe les plus grosses particules
- état colloïdal.
- état dissous des sels minéraux et des molécules organiques.

Cette classification résulte de la taille des particules. Les colloïdes présentent un diamètre compris entre 1 μm et 1 nm. Leur rapport surface/volume leur confère des propriétés d'adsorption des ions présents dans l'eau. Ce phénomène explique en partie l'existence de charges électriques à leur surface. Ces charges, souvent négatives, engendrent des forces de répulsion inter colloïdales. Celles-ci permettent d'expliquer la grande stabilité de ces particules mises en solution. Leur densité, qui peut atteindre 2,5, ne modifie pas la valeur de leur vitesse décantation. L'origine des colloïdes est très diverse. On peut citer l'érosion des sols, la dissolution des substances minérales, la décomposition des matières organiques, le déversement des eaux résiduaires urbaines et industrielles ainsi que les déchets agricoles [1].

On distingue deux catégories de colloïdes en fonction de leur affinité vis-à-vis de l'eau :

- **Les colloïdes hydrophiles** dont les particules sont entourées par une enveloppe de molécules d'eau fixées à la matière solide par des liaisons physico-chimique avec des groupements -OH,-NH₂,-COOH, et totalement ou partiellement ionisés c'est le

cas des protéines, des détergents synthétique, des savons...ces colloïdes sont caractérisés par leur grande stabilité [16].

- **Les colloïdes des hydrophobes** qui n'ont aucune affinité pour l'eau et dont la stabilité est due à la charge électrique développée par des particules qui engendre une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération.

-entre ces deux catégories de colloïdes. On peut trouver tous les comportements intermédiaires possibles [16].

II.3 Théorie de la double couche

Généralement, les colloïdes sont chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. D'après Helmholtz, une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble c'est-à-dire de la couche fixée. Selon Gouy Chapman, la couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à une plus grande distance, autrement dits, la couche diffuse. La théorie de Stern combine les deux théories précédentes et considère la formation d'une double couche : la première formée d'ions du liquide mais adhérente au colloïde, la seconde diffuse dans le liquide environnant. Comme illustré sur la figure 1, le potentiel subit une première chute significative dans la couche fixée, puis diminue plus lentement à mesure que la distance augmente jusqu'à son annulation au point isoélectrique [17].

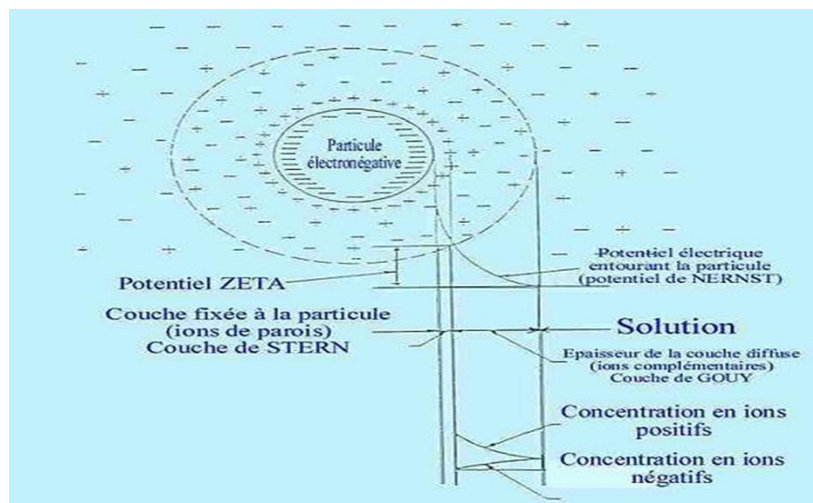


Figure II.1: Potentiel électrique de particules colloïdales.

II.3.1 Potentiel Zeta

Le potentiel électrostatique diminue au fur et à mesure où l'on s'éloigne de la particule. Le potentiel Zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules ayant un potentiel Zêta négatif se déplacent en direction de l'électrode positive. Le potentiel Zêta est important, car il définit le comportement électrocinétique des particules, et par voie de conséquence, leur stabilité dans la solution. L'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leur agglomération [18].

II.4 Définition de La coagulation/floculation

La coagulation/floculation est un procédé physico-chimique visant la déstabilisation des particules colloïdales présente dans l'eau. Puis formation de flocs par absorption et agrégation. Les flocs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite [1] :

- **La coagulation** : est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques amenant une suspension stable de particules de très petite taille en solution, les colloïdes, à se séparer en deux phases distinctes.
- **La floculation** : est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques menant à l'agrégation de particules stabilisées pour former des flocons ou « flocs ». Ce phénomène est réversible, c'est à dire que l'on peut casser ces agrégats, par exemple en agitant fortement le liquide, pour retrouver la solution de colloïdes initiale.

II.5 Principe de la coagulation/floculation

Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est - à - dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques. La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un flocc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration [15].

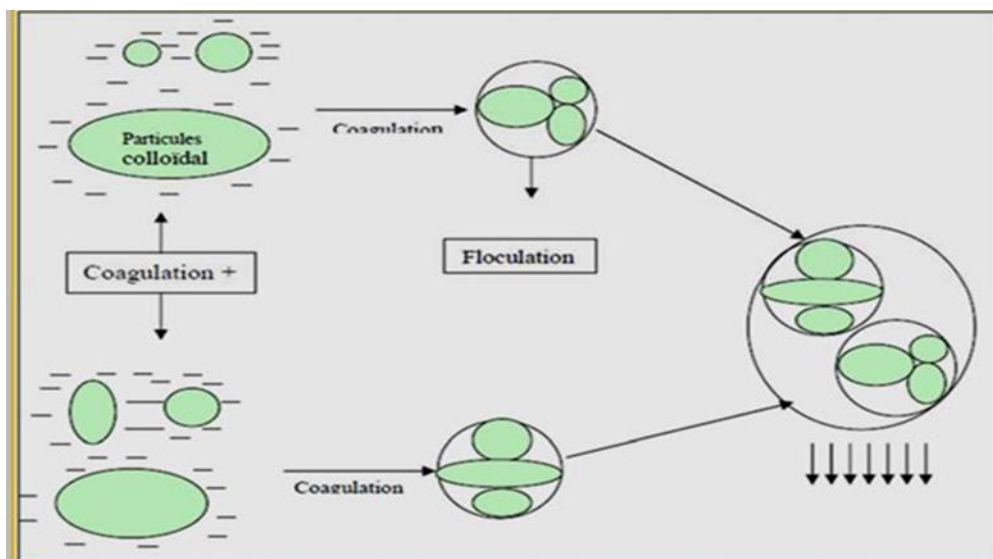


Figure II.2: Mécanisme de la coagulation / Floculation

II.5.1 La coagulation

II.5.1.1 Les modes de déstabilisation des particules colloïdales

Quatre mécanismes sont proposés pour expliquer la déstabilisation des particules et leurs agglomérations [19] :

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

II.5.1.1.1 La compression de la double couche

L'augmentation de la force ionique de l'eau réduit le volume et l'épaisseur de la couche diffuse. Les forces de répulsion sont considérablement réduites alors que les forces d'attraction de Van der Waals ne sont pas affectées [18].

Les concentrations nécessaires des ions Na^- , Ca^{2+} et Al^{3+} varient approximativement dans des rapports de $1 : 10^{-2} : 10^{-3}$ respectivement à cause de leur valence différente [18].

II.5.1.1.2 Adsorption et neutralisation des charges

Ce mécanisme repose sur l'ajout suffisant de cations, afin de neutraliser la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface. Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut résulter en une adsorption trop importante de cations et

inverser la charge des particules qui devient alors positive [18]. Les particules seraient ainsi ré stabilisées [18].

II.5.1.1.3 Emprisonnement et piégeage

Des particules dans un précipité Lorsque des quantités suffisantes de coagulant comme le $Al_2(SO_4)_3$ ou le $FeCl_3$ sont ajoutées, ils forment un précipité possédant généralement une charge positive. Le pH de l'eau doit se situer dans une plage où la solubilité des sels est minimale [18]. Le précipité formé, appelé floc, entre en contact avec les particules de charge négative et les emprisonne. Les particules sont ensuite entraînées lors de la décantation [18].

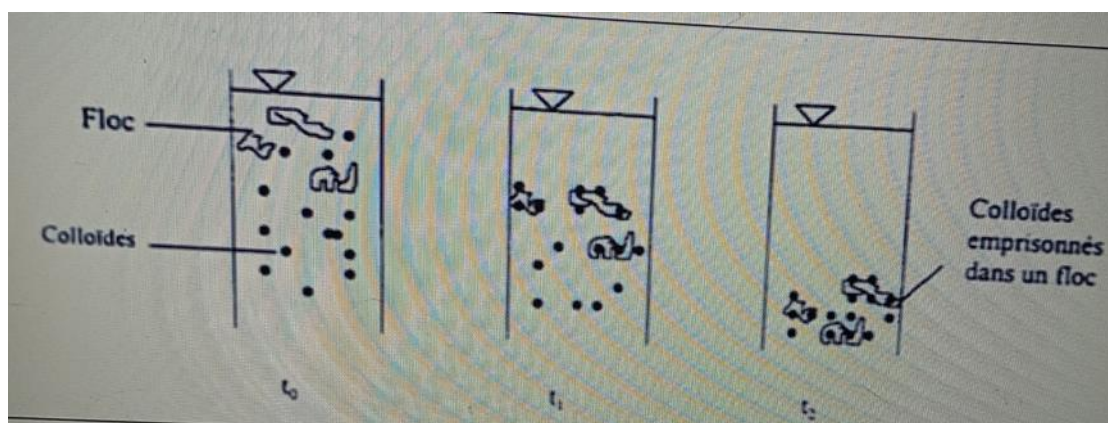


Figure II.3: Emprisonnement des particules dans les floccules pendant la décantation

II.5.1.1.4 Adsorption et pontage

Entre les particules Ce mécanisme implique l'utilisation de polymères cationiques, non-anioniques ou anioniques, ayant une masse moléculaire élevée et une structure longitudinale. Un polymère en présence d'un colloïde l'adsorbe à une de ses extrémités à l'aide d'un de ces groupes fonctionnels. Les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde. Ce mécanisme permet donc l'agglomération des particules par pontage des polymères. Par contre, une concentration de polymères trop élevée peut ré-stabiliser les colloïdes [18].

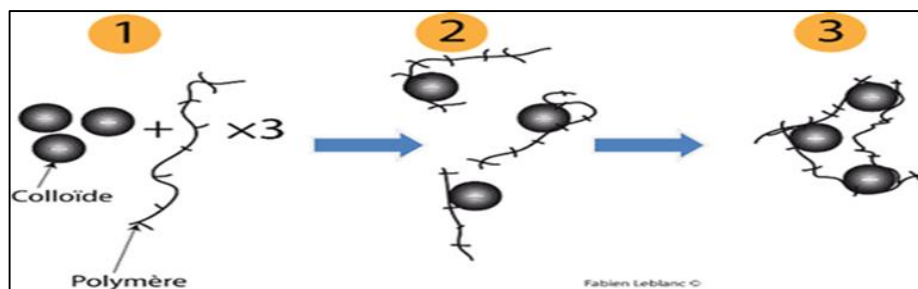


Figure II.4: Adsorption et pontage à l'aide de polymères.

II.5.2 Facteurs affectant la coagulation/ floculation

Pour optimiser le processus de coagulation et de floculation, des variables pertinentes telles que le pH, la dose de coagulation, la température et la vitesse de mélange doivent être prises en compte [20].

a) Influence du paramètre pH

Le pH a un effet fondamental sur la coagulation. Notez que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le pH de l'eau. Cette différence doit être prise en compte afin de ne pas s'écarter de la plage optimale pour le dépôt de coagulation[20].

b) Influence de la dose du coagulant

La quantité de réactif ne peut être déterminée facilement, sauf après plusieurs expériences afin que la dose optimale de coagulation puisse être déterminée et malaxée en utilisant un test de laboratoire, connu sous le nom de "jar-test. La dose de réactif est un paramètre qui doit être pris Le coagulant est généralement fortement acide et a tendance à être acide. "Réduire le pH de l'eau. Pour atteindre le pH optimal, un acide ou une base peut être ajouté. Un surdosage de coagulants entraîne un recollage des particules et augmente les coûts d'exploitation, tandis que des doses insuffisantes conduisent à une qualité insuffisante de l'eau traitée[20].

c) Influence de la température

La température joue un rôle important dans le processus de coagulation, la température plus basse entraîne une augmentation de la viscosité de l'eau, car une série de difficultés surviennent au cours du processus : le processus de coagulation est ralenti, la masse se stabilise et la plage de pH optimale diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution est de changer le coagulant en fonction des saisons[20].

d) Influence de la turbidité

La turbidité affecte le bon fonctionnement du processus de coagulation. En fonction d'une zone de turbidité spécifique, l'augmentation de la concentration de particules doit être suivie d'une augmentation de la dose de coagulant, et lorsque la turbidité de l'eau est très faible, on peut augmenter la concentration de particules en ajoutant de l'argile[20].

e) Influence de la vitesse d'agitation

Lorsque le coagulant est ajouté à l'eau, une agitation rapide doit être effectuée afin de disperser la solution et son homogénéité, car une agitation sévère empêche l'accumulation de particules, tandis qu'une agitation prolongée systématique déstabilise le système de solution. Il recueille et rompt les liaisons entre le coagulant et la surface des particules[20].

II.6 Les types de coagulation**II.6.1 La coagulation chimique**

Le processus de coagulation consiste à ajouter de l'aluminium ou du fer à l'eau ces matériaux sont appelés coagulation et ont une charge positive, cette charge du coagulant neutralise la charge négative des particules dissoutes et en suspension dans l'eau. Lorsque cette réaction se produit les particules sont liées les uns aux autres ou coagules, les particules plus grosses ou plus lourdes se trouvent au fond de la source d'eau et c'est ce qu'on appelle le processus de sédimentation [20].

II.6.2 L'électrocoagulation

C'est une méthode alternative de séparation pour la floculation par coagulation qui permet la formation de cation minéraux in situ par électrolyse, et cette concentration se traduit par des espèces colloïdales proches de l'anode, puis les cations coagules interagissent avec les particules colloïdales chargées négativement et permettent à leur charge d'être neutralisée et stabilisée. La floculation est préférée en déplaçant des particules colloïdales sous l'influence d'un champ électrique [20].

II.6.3 La bio floculation

La bio floculation est une nouvelle technologie permettant de collecter des particules extrêmement fines et elle diffère des procédés bien connus comme la bio-sorption la bioaccumulation et la biotransformation. Dans la bio floculation, les particules sont très petites et solides. Pour les autres procédés, les minéraux se dissolvent et les ions sont adsorbés ou accumulés [20].

II.7 Types de floculation

II.7.1 Floculation physique

Elle consiste à augmenter par la création d'une différence de vitesse entre les particules colloïdales déstabilisées, la probabilité des contacts entre ces particules afin de les agglomérer en floccs denses ensuite de les décanter (Bour sali, 2011). Deux mécanismes assurent la mobilité des particules : le mouvement brownien (floculation péri cinétique) ; et le brassage mécanique (floculation ortho cinétique) [21].

II.7.2 Floculation péri cinétique

Par le mouvement brownien ; le mouvement aléatoire des particules causée Occasionnellement des collisions. Ce mécanisme est plus efficace que la sédimentation différentielle mais il demeure lent et produit de petits agglomérats. Au cours du processus de floculation lui-même, le mouvement Brownien a de moins en moins d'effet sur le mouvement des particules dont la taille augmente progressivement. Cette augmentation accroît aussi l'influence de la barrière énergétique et ceci réduit encore le Contact péri-cinétique dès que le diamètre de particules dépasse $1\mu\text{m}$ [21].

II.7.3 Floculation Ortho cinétique

Ce type de floculation est fonction de l'énergie dissipée dans le fluide. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules. La vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps et est caractérisée par les particules. Par l'agitation mécanique, c'est la méthode la plus efficace, mais trop d'agitation peut briser les agrégats au lieu de les créer. La coagulation n'est pas utilisée dans le procédé Bayer, mais elle est très importante dans plusieurs autres domaines, notamment dans le traitement des eaux[21].

II.7.4 Floculation chimique

C'est la floculation qui est provoquée par l'agitation de l'eau. Cette agitation facilite l'agrégation des particules par augmentation de la probabilité de collisions entre ces particules. Elle consiste en une agglomération par pontage des particules colloïdales déchargées à l'aide de certains produits chimiques appelés flocculants [21].

II.8 Flocculants utilisés

Les polymères emprisonnent les matières colloïdales agglomérées et forme ainsi des flocons volumineux qui se déposent par gravité. Ils sont ajoutés après la coagulation pour augmenter d'avantage la taille et la cohésion des flocs. Les flocculants peuvent être de trois natures différentes [21].

II.8.1 Flocculants organiques

Ils sont hydrosolubles et qui peuvent voir une charge anionique ou, cationique ou neutre. On peut citer exemple l'amidon, les alginates ou les polysaccharides [21].

II.8.2 Flocculants minéraux

Ce sont des produits chimiques qui agissent par adsorption ou par neutralisation sur une eau brute qui ne contient pas assez de matières en suspension. Les floculations connus sont à base de la silice activée, certaines argiles colloïdales comme la bentonite ou le charbon actif en poudre, certains hydroxydes à structure polymère comme l'alumine ou l'hydroxyde ferrique et le sable [21].

II.8.3 Flocculants de synthèse

Ce sont des produits fabriqués à partir de monomères à très haute masse moléculaire. Ces polymères ont un rendement supérieur aux polymères naturels. Ils sont classés suivant leur iconicité [21]:

- a) Anionique : conçu à partir polymère d'acrylamide et l'acide acrylique
- b) Neutre : conçu à partir de polyacrylamides
- c) Cationique : conçu à partir d'acrylamide et de méthacrylate de diméthylamino-éthyle ou d'acrylate de diméthylamino-éthyle.

II.9 Mise en œuvre de la coagulation/floculation

Il faut associer dans un temps assez court, deux phases distinctes et incompatibles. En effet, les conditions de mise en œuvre de la coagulation sont différentes de celles de la floculation. On distingue les deux phases suivantes [22] :

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

Dans un premier temps, un mélange rapide est nécessaire pour disperser les additifs dans la totalité du volume d'eau à traiter. L'injection se fait dans une zone de turbulence créée par

des chicanes ou par mélange mécanique avec des hélices. La deuxième phase favorise les contacts entre les particules de floes sans les léser. Le mélange doit être néanmoins assez énergétique pour engendrer des différences de vitesse dans le bassin nécessaire à la rencontre des particules [22].

II.10 Décantation

II.10.1 Définition

C'est un procédé utilisé pratiquement dans toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux. Il a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules sont en général des particules de floe ou des particules résultant de la précipitation qui a lieu lors des traitements d'adoucissement. Les particules s'accumulent au fond du bassin de décantation d'où on les extrait périodiquement. L'eau clarifiée, située près de la surface, est dirigée vers l'unité de filtration [15].

II.10.2 Types de décantation

Selon la concentration en solides et la nature des particules (densité et forme), on distingue quatre types de décantation : la décantation de particules discrètes, la décantation de particules floculantes, la décantation freinée et la décantation en compression de boue [15].

Type I : Décantation de particules discrètes Ce type de décantation (dite discrète ou individuelle) est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est indépendante de la concentration en solides ; c'est pourquoi les lois classiques de Newton et de Stokes s'appliquent ici. On retrouve ce type de décantation dans les dés sableurs [15].

Type II : Décantation de particules floculantes Ce type de décantation est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques de ces particules (forme, dimension, densité et vitesse de chute) sont donc modifiées pendant le processus. On retrouve ce type de décantation dans les décanteurs des usines de traitement des Eaux et dans les décanteurs secondaires des usines d'épuration [15].

Type III : Décantation freinée Ce type de décantation est caractérisé par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche de particules

et, par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant. On retrouve ce type de décantation dans la partie profonde des décanteurs [15].

Type IV : Décantation en compression de boue Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures. Dans cette zone, le phénomène de consolidation est relativement lent. On retrouve ce type de décantation dans les épaisseurs de boues par gravité [15].

CHAPITRE III : Généralités sur le figuier de barbarie

III.1 Figue de barbarie dans le monde végétal

Le figuier de Barbarie est une plante originaire des zones tropicales du continent Sud-Américain, en particulier du Mexique. Il a été introduit au Nord et au Sud de l'Afrique et tout au long du bassin méditerranéen vers le 16ème siècle, comme pour beaucoup d'autres espèces végétales et animales [23].

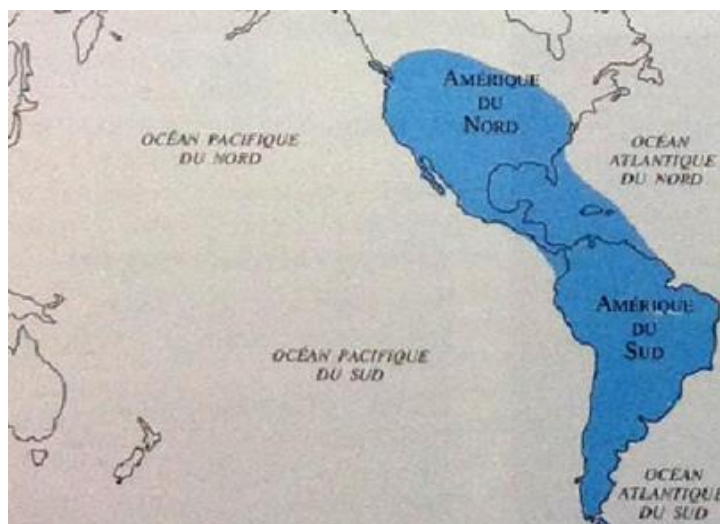


Figure III.1: Origine du figuier de barbarie

Le figuier de Barbarie qui est une plante xérophyte, produit des fruits comestibles et du fourrage pour le bétail. Ses raquettes sont riches en eau et éléments nutritifs Plusieurs noms sont attribués au figuier de barbarie afin de donner une parfaite présentation de cette plante [23]:

- Nom scientifique : *Opuntia ficus indica*
- Nom berbère : El hendi, sabara, karmoussnsarra
- Nom français : Fiquier de barbarie, le nopal, figuier d'inde
- Nom anglais : Pricklypear

Il est appelé aussi, Cactus-raquette, oponce, figue de chrétien

III.2 Morphologie

Le figuier de barbarie est un arbre à tiges aplaties, appelées cladodes érigées ou retombantes. Elles peuvent être couvertes d'épines ou non, La racine est superficielle, caractérisée par une grande capacité d'absorption d'eau, L'article ou cladode sont des fausses tiges, ayant une longueur de 30 à 50cm et une largeur de 15 à 30cm (Figure III.2)La

couleur des cladodes est vert mat. Ils ont la grande capacité d'emmagasiner l'eau, Leurs fleurs ont une couleur jaune à jaune orangée, ayant une longueur de 7 à 10cm sur 3 à 6cm de diamètre. Elle apparaît au sommet des articles terminaux, Les fruits se trouvent à l'extrémité des cladodes. Leurs caractéristiques varient suivant les espèces à savoir : la taille, le poids, la forme ainsi que la couleur [23].



Figure III.2: Schéma illustrant les différentes parties du figuier de Barbarie

III.3 Le Fiquier de barbarie en Algérie

Les espèces de cactus les plus largement répandues dans les pays du Maghreb, sont *Opuntia dillenii*, *Opuntia vulgarise*, *Opuntia compressa* et *Opuntia ficus indica*. Cette dernière est la principale espèce qui produit les fruits comestibles. Deux formes d'*Opuntia ficus indica* (L.) (Figure 2) poussent dans plusieurs steppes algériennes étudiées par Chaouche et Abdul-Hussain, (2008): une inerme et une épineuse (Figure 3) [23].

-Les formes inermes présentent des différences au niveau de leurs pores, de la couleur du fruit et de la période de fructification. Les dimensions et le poids du fruit est influencés par la période sèche et par la période de précipitation [23].

-Les formes épineuses font partie de trois étages bioclimatiques différents et elles diffèrent entre elles par la couleur de la chaire et par la présence des épines [23].



Figure III.3: Fiquier de barbarie (*Opuntia ficus indica*) de la région de Mesra, Mostaganem



Figure III.4: Variété d'*Opuntia ficus-indica* épineuse : mois mai(A)/ mois avril (B)

III.4 **Position systématique du figuier de barbarie**

La position systématique du figuier de barbarie est la suivante [23] :

Famille : Cactaceae

Sous-famille : Opuntioideae

Ordre : Caryophyllales

Sous-ordre : Portulacineae

Genre : Opuntia,

Espèce : O. Ficus indica(L.)

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1 Introduction

Le travail expérimental de ce mémoire a été réalisé au niveau du laboratoire du département de génie des procédés, Faculté des sciences et technologie à l'université de Abed El Hamid Ibn Badis, durant la période comprise entre avril et mai l'année 2023. L'objectif de l'étude consiste au traitement d'une eau synthétique par un procédé physicochimique (la coagulation/floculation). Afin de satisfaire cet objectif, on a choisi le jar-test pour effectuer les expériences. Il s'agit de faire une comparaison de l'efficacité entre un coagulant industriel (dans notre cas le sulfate d'aluminium) et un floculant d'origine naturelle ou bio-floculant, extrait de jus de cactus. Le contrôle du degré de clarification de l'eau se fait à l'aide d'un turbidimètre.

IV.2 Matériels et méthodes

Les expériences que nous avons effectuées nécessitaient des produits chimiques et naturels ainsi que du matériel de laboratoire.

IV.2.1 Les produits chimiques et naturels utilisés

Les produits utilisés pour la coagulation sont :

- Le sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$),
- le jus et la poudre de cactus,
- Acide Hydrochlorique Hcl pour ajuster le pH,
- les additifs : - un polluant organique et un polluant inorganique.

IV.3 Les appareils utilisés

• Jar-test

Le Jar-test que nous avons utilisé, est de marque « stuart » à 6 agitateurs. Les pales sont de types planes (fig.IV.1)



Figure IV.1: Le jar-test

- **le turbidimètre**

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. Elle traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...).

Le turbidimètre permet de mesurer la quantité de lumière diffusée à angle droit par un faisceau lumineux traversant l'échantillon. Les résultats sont directement exprimés en NTU.



Figure IV.2: Turbidimètre HI 88713 (HANNA)

Tableau IV.1: Classe de turbidité usuelle (NTU).

<i>Turbidité < 5 NTU</i>	Eau Claire
<i>5 < turbidité < 30 NTU</i>	Eau légèrement trouble
<i>Turbidité > 50 NTU</i>	Eau trouble

- **Le pH mètre**

C'est un appareil de mesure constitué d'une électrode de pH que l'on plonge dans la solution dont on veut connaître l'acidité, son pH s'affiche alors sur l'écran. L'électrode doit être bien rincée à l'eau du robinet, puis à eau distillée et enfin à l'eau à analyser avant chaque mesure. L'appareil doit être régulièrement étalonné pour que les mesures soient correctes.



Figure IV.3 : pH- mètre type HANNA 211

- **Balance électronique** :Elle sert à peser la masse du produit utilisé (poudre et polluants)



Figure IV.4: balance électronique.

IV.4 Echantillonnage

Deux types d'échantillons d'eau ont été étudiés : eau contenant un polluant organique, et une eau contenant un polluant inorganique.

- **Echantillon 1**

Dans un bécher contenant 500mL d'eau distillée, on ajoute 0.5g de polluant organique.

- **Echantillon 2**

Dans un bécher contenant 500 ml d'eau distillée, on ajoute 0.5g de polluant inorganique.

IV.5 Méthode de préparation du biofloculant

IV.5.1 La récolte de la plante

Les cladodes de cactus ont été collectés au cours du mois d'avril dans la région de Mesra, une des communes de la Wilaya de Mostaganem (Algérie). Cette région est caractérisée par une température moyenne de 25⁰C.⁵



Figure IV.5: Champ de cactus (figue de barbarie) dans la région de Mesra (Mostaganem).

IV.5.2 Préparation de la poudre de cactus

Après avoir retiré les épines à l'aide d'une paire de ciseau, les cladodes ont été rincés à l'eau de robinet puis à l'eau distillée. Ensuite coupés en petits dés et pesés. L'ensemble a été placé dans une étuve à 60°C. Le suivi du poids sec a été effectué jusqu'à obtention d'un poids constant. Les morceaux séchés ont été broyés à l'aide d'un broyeur de cuisine et la poudre obtenue a été tamisée en utilisant un tamis de 80 μm (fig.IV.6).

La poudre de raquettes ainsi obtenue est conservée dans un bocal hermétique à une température ambiante. Cette poudre fine sera ultérieurement utilisée pour le procédé coagulation/floculation.



Figure IV.6: Les étapes de préparation de la poudre de cactus

IV.5.3 Préparation le jus de cactus

Après avoir enlevé les épines, les cladodes ont été nettoyés, découpés en petites tranches et peser et enfin être mélangé dans un mixeur pour avoir le jus qui sera conservé dans un flacon en verre stérilisé hermétiquement fermé.



Raquette de cactus



Morceaux de cactus



Filtration de jus cactus



Jus de cactus dilué 10%

Figure IV.7 : Les étapes de préparation du Jus de cactus

IV.6 Optimisation des paramètres de coagulation par le sulfate d'aluminium

IV.6.1 Optimisation du pH

Pour obtenir le pH optimal, les étapes suivantes ont été suivies :

Dans une série de béchers :

- Introduire 500 mL d'eau synthétique,
- Varier le pH de la solution entre (5 et 9) en ajustant avec le HCl.
- Ajouter une dose de 0.1 g de sulfate d'aluminium dans chaque bécher,

- Agitation rapide (250tr/min) pendant 3 min (coagulation),
- Agitation lente (40tr/min) pendant 20 min(floculation),
- décantation pendant 2h.
- Prélever à l'aide d'une pipette un volume d'environ 10ml pour mesurer la turbidité, chaque 30min.

IV.6.2 Optimisation de la dose du coagulant

Dans une série de béchers :

- Introduction de 500 ml de l'échantillon.
- Ajout de coagulant avec des doses croissantes de 0.1 à 0.5g de sulfate d'aluminium,
- Fixer le pH à la valeur optimale obtenue,
- Agitation rapide (250 t/min) pendant 3 min (coagulation)
- Agitation lente (40t/min) pendant 20 min (floculation)
- décantation pendant 2h.
- Prélever à l'aide d'une pipette un volume d'environ 10ml pour mesurer la turbidité, chaque 30min.

IV.7 Optimisation des paramètres de coagulation par le jus de cactus

IV.7.1 Optimisation du pH

Pour avoir le pH optimal de coagulation, les étapes suivantes ont été suivies :

Dans une série de béchers :

- Introduire 500 ml d'eau synthétique,
- Varier le pH de la solution entre (5 et 9) en ajoutant le Hcl.
- Ajouter une dose de jus de cactus de 2ml.
- Agitation rapide (250tr/min) pendant 3 min (coagulation).
- Agitation lente (40tr/min) pendant 20 min(floculation).

-Laisser décanter pendant 2h.

- Prélever à l'aide d'une pipette un volume d'environ 10mL pour mesurer la turbidité et ceci chaque 30min.

IV.7.2 Optimisation de la dose du coagulant naturel(jus de cactus)

Dans une série de béchers :

- Introduire 500 mL de l'échantillon (eau synthétique).

- Ajout de coagulant en doses croissantes de 0.4ml à 2mL.

- Le pH est fixé à la valeur optimale.

- Agitation rapide (250 t/min) pendant 3 min (coagulation)

- Agitation lente (40t/min) pendant 20 min (floculation)

--décantation pendant 2h.

-- Prélèvement à l'aide d'une pipette un volume du surnageant d'environ 10mL pour mesurer la turbidité, chaque 30min.

IV.8 Optimisation des paramètres de coagulation/floculation par la poudre de cactus

IV.8.1 Optimisation du pH

Pour optimiser le pH de la coagulation/floculation par ajout de la poudre de cactus, on a :

- Introduit 500 mL de l'échantillon (eau synthétique),

- Varié le pH de la solution entre (5 et 9) en ajoutant le Hcl,

-Ajouté une dose fixe de la poudre de cactus (0.1g) et on passe à :

-L'agitation rapide (250tr/min) pendant 3 min (coagulation),

-Agitation lente (40tr/min) pendant 20 min(floculation),

-Après décantation pendant 2h, on a prélève à l'aide d'une pipette un volume d'environ 10ml pour mesurer la turbidité, chaque 30min.

IV.8.2 Optimisation de la dose du coagulant (la poudre de cactus)

Dans une série de béchers :

- Introduction de 500 mL de l'échantillon.
- Ajout de coagulant en quantités croissantes à partir de 0.1g jusqu'à 0.5g avec un pH fixé à la valeur optimale obtenue.
- Agitation rapide (250 t/min) pendant 3 min (coagulation)
- Agitation lente (40t/min) pendant 20 min (floculation)
- décantation pendant 2h.
- Prélèvement, à l'aide d'une pipette un volume d'environ 10ml pour mesurer la turbidité, chaque 30min.

IV.9 Résultats et discussion

IV.9.1 Caractéristiques des eaux usées synthétiques

Les eaux synthétiques préparées à partir d'un polluant organique et inorganique présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.2:les caractéristiques des eaux usées :

<i>Paramètre</i>	Eau avec le polluant organique (échantillon A)	Eau avec le polluant inorganique (échantillon B)
<i>Température</i>	22°C	22°C
<i>Turbidité</i>	971 UTN	458 UTN
<i>pH</i>	10.20	10.52

Après analyse, nous avons constaté que le polluant organique provoque une turbidité élevée égale à 971 NTU par rapport au polluant inorganique dont la turbidité est de 458NTU. Par contre le pH de l'échantillon B est légèrement augmenté 10.52 et celui de l'échantillon A est de 10.20.

A. traitement des eaux synthétiques (polluant inorganique)

IV.10 Coagulation/floculation par le sulfate d'aluminium

• Optimisation du pH

Dans le but d'étudier l'effet du pH de coagulant (Sulfate d'aluminium) sur le processus de la coagulation/ floculation, des séries d'essais ont été effectuées à plusieurs valeurs de pH allant de 5 à 9 à dose fixée de sulfate d'aluminium 0.1 g. Le choix du pH optimal du coagulant sera jugé en fonction de l'abattement de la turbidité. Les résultats sont illustrés dans de le graphe.

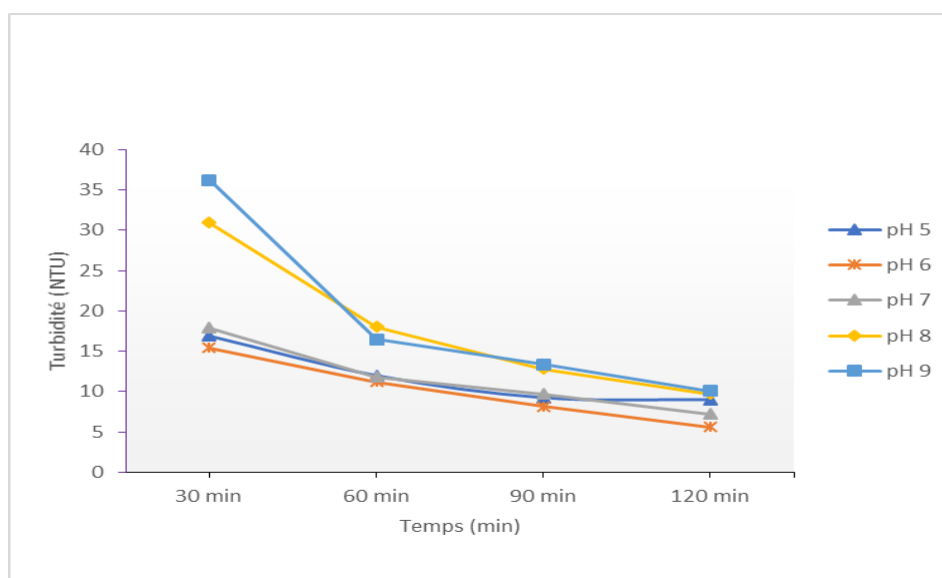


Figure IV.8 : Variation de la turbidité en fonction de temps à différentes valeurs de pH

- l'évolution de la turbidité en fonction de temps et à différents pH montre que le pH 6 est optimal. La turbidité diminue de 971 NTU à 15.4 NTU après une décantation de 30mn et à 5.63 NTU après 120mn. Les pH 8 et 9 s'avèrent les moins efficaces.

• Détermination de la dose optimale de sulfate d'aluminium

Dans le but d'étudier l'effet de la dose de coagulant (Sulfate d'aluminium) sur le processus de la coagulation/floculation, des séries d'essais ont été effectuées à plusieurs doses de coagulant allant de 0.1 à 0.5g à pH 6. Le choix de la dose optimale du coagulant sera jugé en fonction de l'abattement de la turbidité.

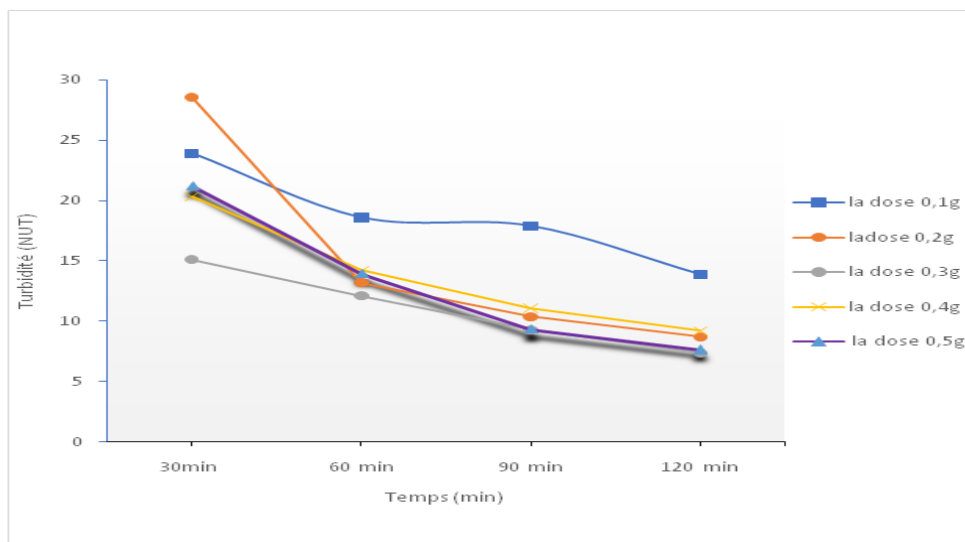


Figure IV.9 :Variation de la turbidité en fonction de temps en différentes dose de sulfate d'aluminium

Selon les résultats obtenus, nous avons constaté que la dose optimale du coagulant (sulfate d'aluminium) est 0.3 g. A cette dose, la turbidité diminue pour atteindre 15.1 NTU et 7.39 NTU après respectivement 30 mn et 120mn.

IV.11 Coagulation/floculation par le jus de cactus

Une étude a été menée sur l'effet de la température sur la conservation du coagulant jus de cactus.

Les résultats ont montré qu'à température ambiante du laboratoire (22°C) le pH augmente progressivement de 4.63 à 7.19.

Par contre, le jus de cactus conservé à 4°C présentait un pH généralement constant qui varie entre 4.72 et 4.63 (fig.IV.10).

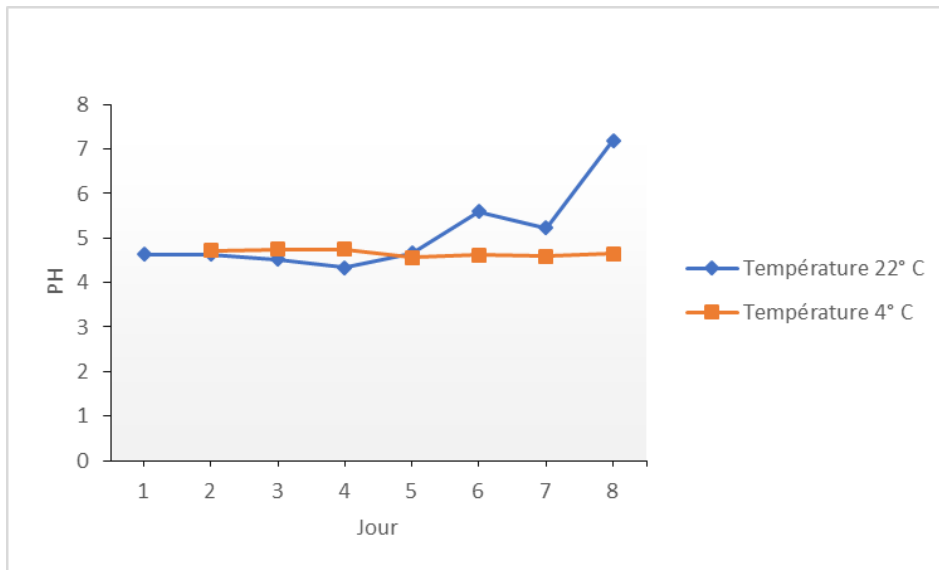


Figure IV.50 :Effet de la température sur la conservation du coagulant

- **Optimisation du pH**

Plusieurs pH allant de 5 à 9 ont été testé avec une dose fixe de coagulant soit 2ml.

La variation de la turbidité en fonction du temps avec des différentes valeurs de pH appliquées est représentée dans le graphe suivant :

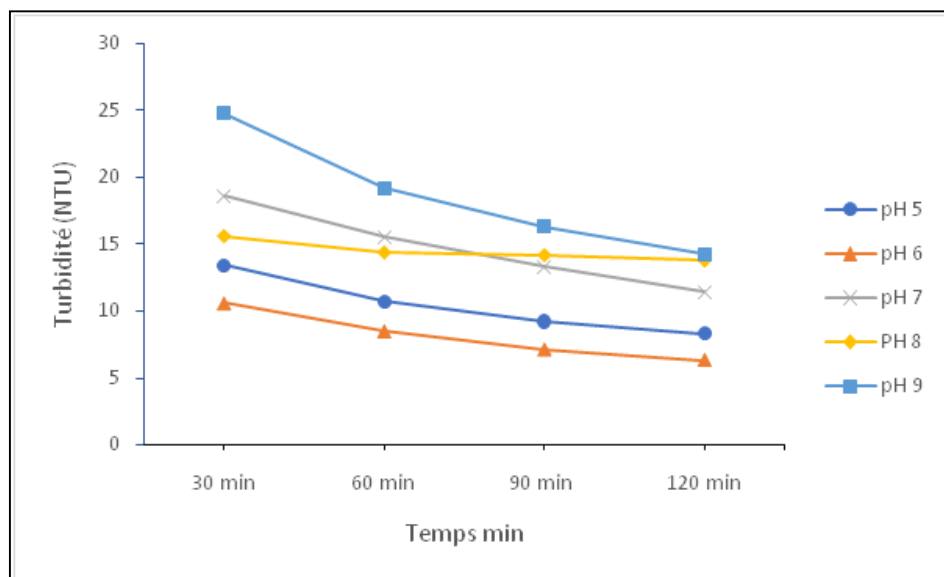


Figure IV.11 :Variation de la turbidité en fonction du pH et du temps

Les résultats obtenus montrent que la turbidité a baissé de 458 NTU (turbidité initiale) à des valeurs comprises entre 13.4NTU, 10.6NTU, 18.6NTU, 15. 6NTUet 24.8NTU pour les pH 5, 6, 7, 8 et 9 après une décantation de 30mn. Un abattement remarquable a été obtenu à pH 6 après une décantation de 120mn, soit 6 NTU.

- **Optimisation de la dose du coagulant (de jus de cactus)**

Des séries d’essais ont été effectuées à plusieurs doses de coagulant (0.4mL, 0.8mL, 1.2mL, 1.6mL, 2mL) à pH fixée à 6. Le choix de la dose optimale du coagulant sera jugé en fonction de l’abattement de la turbidité. Les résultats obtenus représentée dans le graphe suivants :

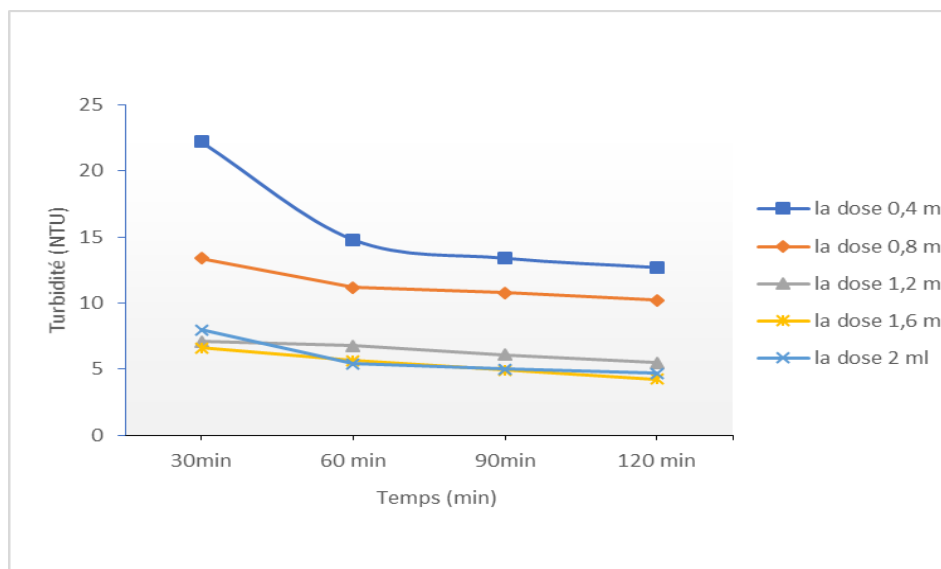


Figure IV.12 :la variation de la turbidité en fonction de temps de défèrent dose de jus

Selon les résultats obtenus, nous remarquons que la turbidité a diminué de 458 NTU à 6.59 NTU après 30mn de décantation et à 4.24 NTU après 120mn. Donc la dose optimale du coagulant pour l’abattement de la turbidité est de 1.6mL.

IV.12 Coagulation/floculation par le coagulant poudre de cactus

- **Détermination du pH optimal**

Afin d’étudier l’effet du pH du coagulant (poudre de cactus) sur le processus de la coagulation/floculation, une multitude d’expériences ont été effectuées à des valeurs de pH variant de 5 à 9 à dose coagulant (poudre de cactus) fixée à 0.1 g. les résultats sont illustrés représentée dans le graphe suivants :

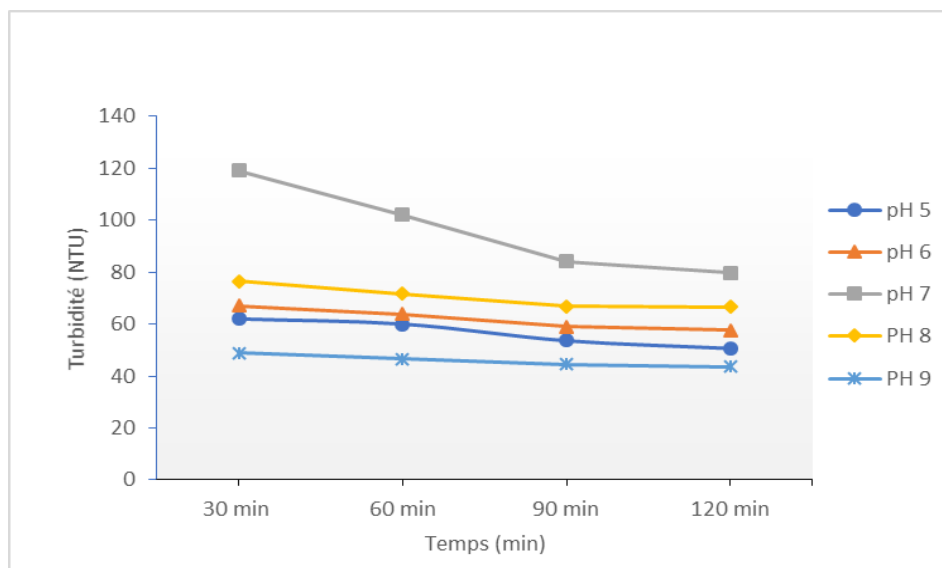


Figure IV.63 :Variation de la turbidité en fonction du temps à différents pH

- **Détermination de la dose optimale du coagulant (la poudre de cactus)**

Plusieurs essais ont été effectués à plusieurs doses de coagulant allant de 0.1 à 0.5 g à pH fixé à la valeur 9 et ceci pour étudier l'effet de la dose de la poudre de cactus comme coagulant sur l'abattement de la turbidité. Les résultats de la variation de la turbidité en fonction du temps avec des différentes doses appliquées sont représentés dans le graphe suivant :

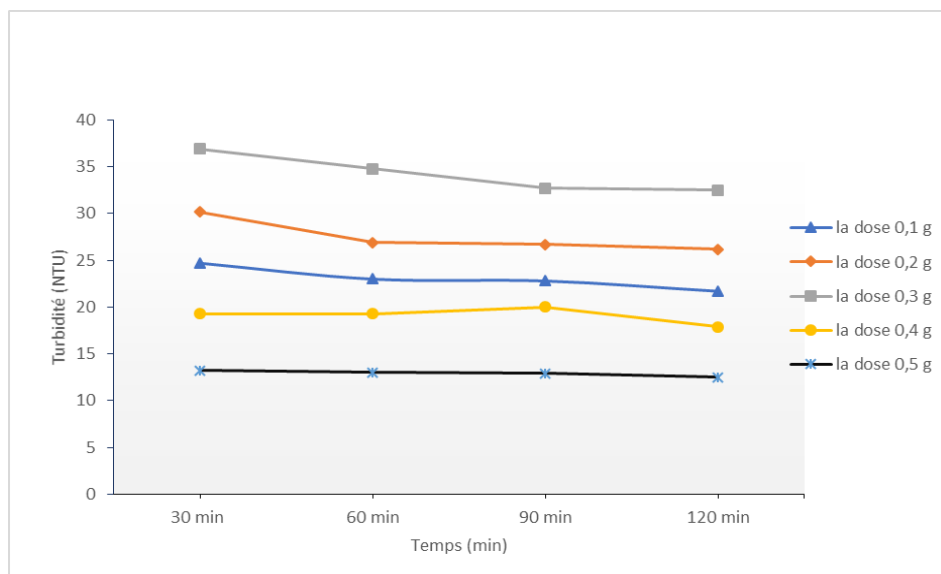


Figure IV.14 :la variation de la turbidité en fonction de temps en différent est dose de la poudre de cactus

D'après les résultats obtenus, la poudre de cactus comme bio floculant n'a pas d'effet significatif. Nous avons remarqué une légère régression de la turbidité pour les 5doses.

B. traitement des eaux synthétiques (polluant organique)

IV.13 Coagulation/floculation par le sulfate d'aluminium

- **Optimisation du pH**

Nous avons procédé de la même manière que pour les eaux synthétiques (polluant inorganique). La variation de la turbidité en fonction de temps avec des différentes valeurs de pH appliquées est représentée dans le graphe suivant :

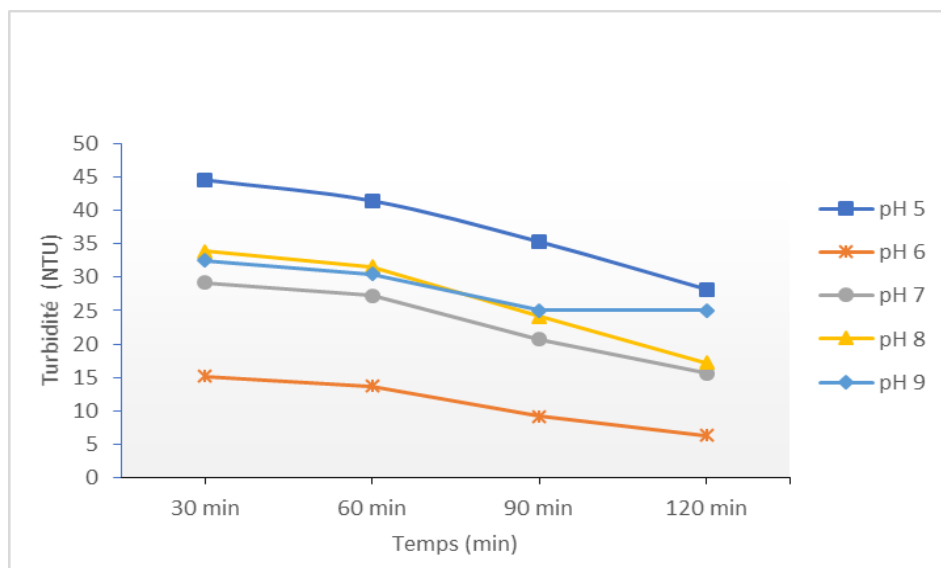


Figure IV.15 :la variation de la turbidité en fonction de temps en différentes valeurs de pH.

-L'allure de la courbe représentant l'évolution de la turbidité en fonction du temps à différentes valeurs de pH, montre que la turbidité a beaucoup diminué par rapport au reste des valeurs de pH, et nous concluons que le pH optimal est 6.

- **Détermination de la dose optimale de sulfate d'aluminium**

Les résultats de la variation de la turbidité en fonction de la dose du coagulant sont illustrés dans le graphe suivant.

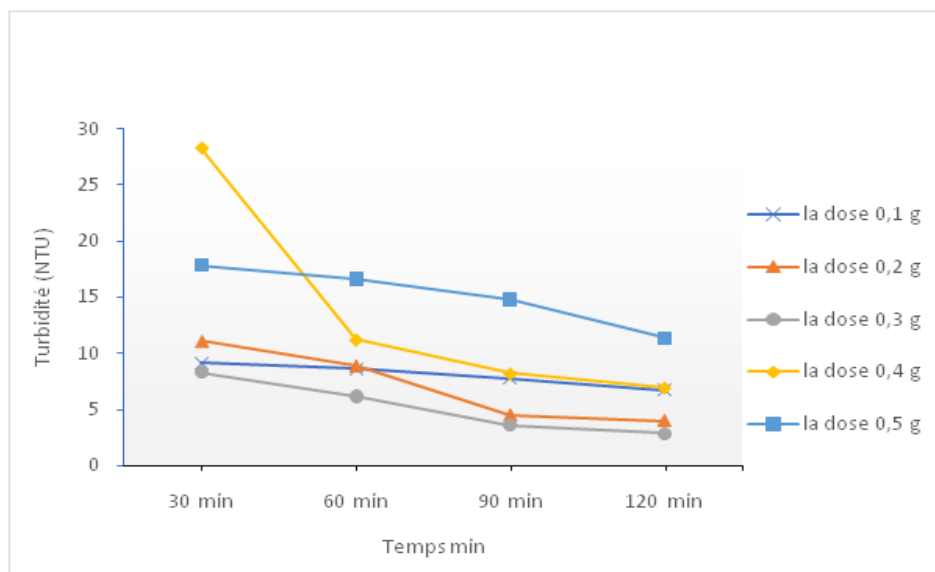


Figure IV.16 :la variation de la turbidité en fonction de temps en différentes dose de sulfate d'aluminium

A pH optimal égal à 6, la dose 0.3g du sulfate d'aluminium se montre plus efficace pour l'abattement de la turbidité qui a atteint 2.85 NTU.

IV.14 Coagulation/floculation par le jus de cactus

- Détermination du pH optimal du bio floculant (jus de cactus)

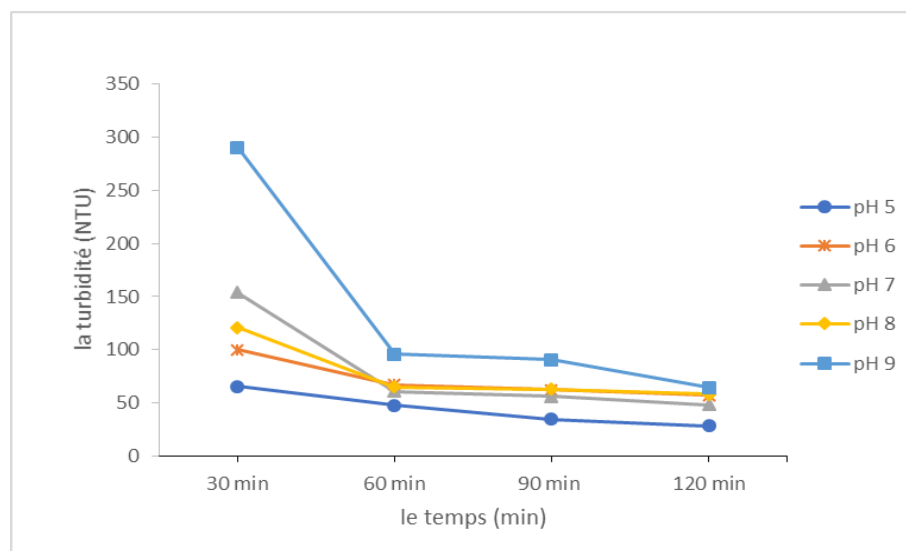


Figure IV.17 :la variation de la turbidité en fonction du temps à différentes valeurs de pH

Selon l'allure des courbes, nous constatons que le pH 5 représente le pH optimal. La turbidité atteint 65.5 NTU après une décantation de 30mn.

- **Optimisation de la dose de jus de cactus**

Après une série d'expériences utilisant plusieurs doses de biofloculant variant entre 0.4 et 2mL, nous avons obtenu des résultats qui sont illustrés dans le graphe suivant :

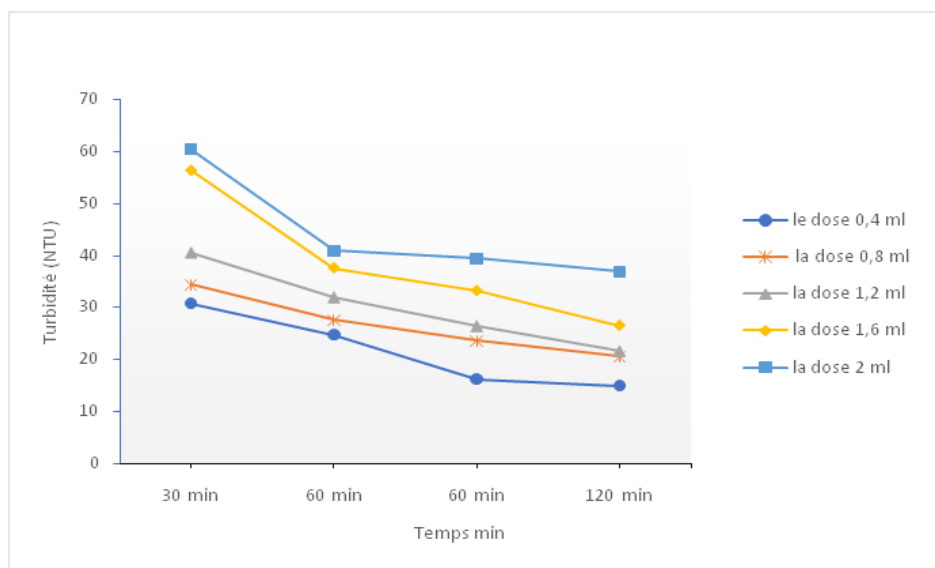


Figure IV.18 :Variation de la turbidité en fonction du temps à différentes dose de jus de cactus

La coagulation/floculation à pH optimal 5 montre que la turbidité des eaux diminue régulièrement après différents temps de décantation. Seulement, la dose 0.4 mL s'avère la dose optimale pour l'abattement de la turbidité.

IV.15 Coagulation/floculation avec la poudre de cactus

- **Détermination du pH optimal**

Les mêmes étapes que pour les eaux synthétiques (polluant inorganique) ont été suivies pour le traitement des eaux synthétiques (polluant organique).

La variation de la turbidité en fonction de temps avec les différentes valeurs de pH appliquées est représentée dans le graphe suivant :

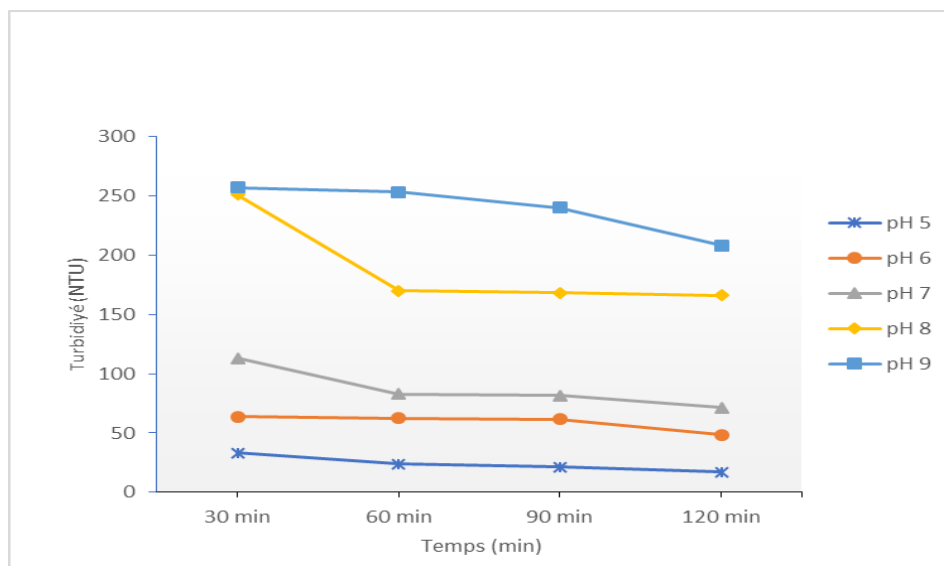


Figure IV.19 :Variation de la turbidité en fonction du temps à différentes valeurs de pH

Les résultats enregistrés montrent que les pH 8 et 9 ne sont pas efficaces pour le traitement des eaux. Par contre, le pH 5 s'avère optimal avec une turbidité de 33.4 NTU après une décantation des eaux de 30mn.

- **Optimisation de la dose du bio floculant (la poudre de cactus)**

Les résultats de la variation de la turbidité en fonction du temps avec des différentes doses appliquées sont mentionnés dans le graphe suivant :

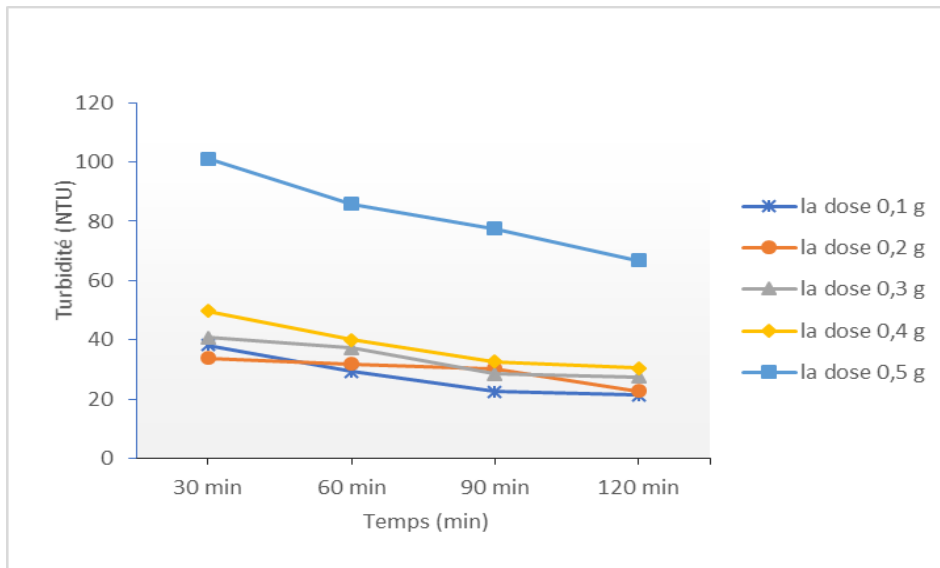


Figure IV.20 :Variation de la turbidité en fonction du temps à différentes doses de poudre de cactus

L'allure de la courbe montre que les doses 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g et 0.4 g agissent efficacement sur la coagulation/floculation avec une dose optimale de 0.2 g. A l'inverse de la dose 0.5g où la turbidité est de 101 NTU après une décantation de 30mn.

Conclusion

Le procédé de coagulation/floculation est un procédé physico-chimique largement utilisé pour le traitement des eaux usées et potables où des produits chimiques nuisibles pour la santé humaine et l'environnement sont utilisés. Pour cela, nous avons opté pour substituer ces produits conventionnels par des produits écologiques.

Les résultats présentés dans cette étude permettent de mieux appréhender l'efficacité, le potentiel technique et environnemental, du procédé coagulation/floculation avec un biofloculant biodégradable, à base de cladodes de cactus (*Opuntia Ficus Indice*).

- L'application du biofloculant (jus de cactus) sur les eaux synthétiques (polluant inorganique) a donné des résultats appréciables à pH6, où la turbidité a diminué de 458NTU à 4.24 NTU et 12.5 à pH 9 en utilisant la poudre de cactus.

- De même la turbidité de l'eau avec le polluant organique, a diminué de 971 NTU à 14.9 NTU à pH 5 en utilisant le jus de cactus et 21.4NTU pour la poudre, à pH5.

- Le jus d'*Opuntia ficus indica* se montre l'agent de coagulation/floculation le plus efficace par rapport à la poudre du même végétal et le coagulant conventionnel.

-L'efficacité du processus de coagulation/floculation avec le biofloculant de figue de barbarie est mentionnée dans plusieurs travaux de recherche et confirmée par la présente étude en utilisant la figue de barbarie de notre région.

Référence bibliographique

[1] **YASMINE MERAH, AND KHELIFIROMILA, 2022** : Traitement des eaux turbides par un bio-floculant figue de barbarie, mémoire de fin d'étude de génie de l'environnement, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahim - Bordj Bou Arreridj, ALGERIE.

[2] **GHERARA, NABILA ,2019** : Étude des performances de la station d'épuration des eaux usées de la région HAUD BERKAOUI, Mémoire master Académique de génie chimie. Université Kasdi Merbah-ouaregla, ALGERIE.

[3] **METAHRI, MOHAMMED SAÏD, 2012** : Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes : cas de la STEP est de la ville de Tizi Ouzou, Thèse de doctorat de génie Agronomie, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Algérie.

[4] **BEN MABROUK, GHADA, and SAMAHMELLAK, 2020** : Traitement des eaux usées par les fibres Alfa et l'argile, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master académique en chimie de l'environnement, université Mohamed Boudiaf Msila.

[5] **KADI MOHAMED LOTFI, and Ahmed MEDIANI, 2017** : Traitement des eaux usées industrielles de la raffinerie de SBAA Adrar, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en chimie de l'environnement, Université Ahmed Draia-ADRAR.

[6] **DJAFRI, OUSSAMA, 2017** : Évaluation des caractéristiques physico-chimiques des eaux usées industrielles issues par la raffinerie de Sbaa-Adrar, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en chimie de l'environnement, Université Ahmed Draia-ADRA.

[7] **BOUSSADIA FATMA ZAHRA and HADJER AMALI, 2018** : Traitement des eaux usées de l'entreprise Algal+ par méthode électrochimique (électrocoagulation), mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master académique, Université Mohamed BOUDIAF de Msila.

[8] **BENALLAL, RATIBA, FARIDA DEBOUB, and S. REBOUH, 2014** : "Traitement des eaux usées riches en métaux lourds (Fe^{2+} Cu^{2+}) par adsorption solide-liquide en mode

batch. «Thèse de master de Pollution Chimique et Gestion Environnementale, université Dr. Yahia Farés de Médéa.

[9] ABD-ELWAHID AMROUNE CHOURAYH, BENMOHAMED MOHAMED TAHER, TOUATIALA EDDINE, 2022 : Etude de la station de traitement des eaux usées de l'usine Lafarge ciment de Msila, mémoire de fin d'étude UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.

[10] MEHAMMEDIA AMMAR, TOUATI TLIBA KHALIFA, 2020 : "Evaluation de l'efficacité de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de Guelma, Mémoire du Projet de fin d'étude, université 08 Mai 1945.

[11] BELHADJIHICHAM et OUASSINI MOUMENI, 2016 : Etude des performances épuratoires d'une station d'épuration des eaux usées de l'industrie textile : cas de la STEP de Sebdo, Projet de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de Master en Hydraulique, université Abou BEKRBELKAID Tlemcen.

[12] CHITTI KAHINA, 2016 : Elaboration de cartes thématiques pour la gestion des stations d'épuration en Algérie, mémoire du projet de fin d'étude, École Nationale Polytechnique.

[13] BOUBEKKI THINHINAN et HAYAT BOUDJEMA, 2016 : Contrôle du rendement épuratoire de la station d'épuration de Baraki «Alger, Mémoire de fin de cycle En vue d'obtention du diplôme de Master de Traitement et valorisation des ressources hydriques, Université Mouloud Mammeri.

[14] MOHAND-SAID OUALI, cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux. Institut de Chimie Industrielle, centre universitaire de Mostaganem.

[15] livre : RAYMOND DESJARDINS: le traitement des eaux ,2édition revue, édition de l'école polytechnique de Montréal ,1988.

[16] livre : J.P.BECHAC, P.BOUTIN, B.MERCIER, P.NUER : Traitement des eaux usées, édition EYROLLES, 1983

[17] RATARAZO LAZA N-DRAIBE RAZAFINIMA, 2014, contribution à l'optimisation du traitement de l'eau du bassin minier de Rio Tinto QMM avec l'extrait du cactus opuntia ficus indic, mémoire de fin d'étude, mention génie des procédés chimique et industriels, université, D'Antananarivo école supérieure polytechnique.

[18] **HAMDAD BACHIRA, RAHEM AICHA, 2015**, utilisation du *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux, mémoire de fin d'étude, sciences et génie de l'environnement, université, brouira, Algérie.

[19] **YAKHLEF SARA, 2022**, étude comparative entre le traitement des eaux usées par coagulation-floculation et le procédé d'épuration appliqué au niveau de la STEP Guelma, mémoire de fin d'étude, génie de procédés des matériaux, université Guelma Algérie.

[20] **AMIRA IMANE, BETTAYEB CHAYMA ,2021** : optimisation de quelques paramètres de pollution des eaux usées utilisation un biomatériau, mémoire de fin d'étude, génie de procédé de l'environnement, université, Ouargla, Algérie.

[21] **BOUHADI RIM, ARIOUA SOMIA, KAICHE BESMA, 2021** : traitement des eaux usées par le procédé coagulation-floculation en utilisant des coagulants à base Dessel d'aluminium ($Al_2 (SO_4)_3 \cdot AlCl_3$), mémoire de fin d'étude, chimie de l'environnement, université Msila Algérie.

[22] **GHANEM HDJER, SAI ILHAM ,2020** : utilisation des bio-coagulants en traitement des eaux usées textiles, mémoire de fin d'étude, biodiversité et enivrement.

[23] **BENKIKAIA BESMA, CHEBIRA IMENE ,2015** : Production de substances bioactives par aspergilles repens sur milieu à base d'extrait de figues de barbarie (*Opuntia-indica*), mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, biotechnologie fongique /fermentation et production de substances fongique, université des frères Mentouri Constantine Faculté des Sciences de la Nature et de Vie