



REPUBLIQUE ALGERIENNE DE MOCRATIQUE ET
POPULAIRE



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE -BLIDA 1-

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement

MEMOIRE DE MASTER

Filière: Hydraulique

Spécialité : Sciences de l'Eau

Thème:

**Utilisation des floculants industriels et d'un bio-floculant
dans le traitement d'une eau chargée en colorant**

Présenté par :

M^{elle}. HAMAIDI Ahlem

Devant les membres du jury:

M^r. GUENDOUZ. A	Professeur	Univ. BLIDA 1	President
M^r. KHOULI. M.R	MCA	Univ. BLIDA 1	Examinateur
M^r. EDOUAOUEDA	MCA	Univ. BLIDA 1	Examinateur
M^{me}. ANSER. M	MCA	Univ. BLIDA 1	Promotrice

Promotion: 2014/2015

Dédicace

Je dédie ce travail à:

Mes parents

A mes frères Oussama, Mohamed Monsef et ma sœur Nesrin.

Et surtout a mon fiancé HOU Mohamed

A mes oncles, tantes, cousins et cousines.

Spécial dédicace à ma copine BOUHEDIR

Newel, ma mère « Souaad » et mon père « Taieb »
qui ont ma bien aidés le long de mon parcours

universitaire.

Tous les membres de ma promotion.

A mes amis : Kawether, Fahima, Noura, Rym,

Amira et surtout a mes 2 grandes familles:

« HAMAJDI » et « BOUHEDIR »

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur BENSAFIA Djillali, chef de département de sciences de l'eau et de l'environnement, pour sa disponibilité, sa gentillesse et ses précieuses directives tout au long de la réalisation de ce travail.

Je voudrais adresser toute ma gratitude à ma promotrice Mme ANSER Malika de ce mémoire, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, ses compétences scientifiques, ses encouragements dans mes moments de doute et la confiance qu'il m'a accordés m'ont permis de mener à bien ce travail et ils ont contribué à alimenter ma réflexion. Je tiens encore à lui exprimer ma profonde gratitude pour son aide et tous ses précieux conseils.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance sincère à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les étudiants du Département de Chimie Industrielle ainsi que le technicien Mr. Rachid pour sa gentillesse et son aide. Je remercier aussi Mr. MOULOUDJ Mahfoud de l'ANRH qui pour son aide de ramener l'eau distillée. Je remercier Mr AOUABED A, professeur au département de Chimie industrielle.

Je remercie mes très chers parents, « Taieb » et « Souaad », qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redétable d'une éducation dont je suis fier ».

Mes plus grands remerciements vont bien évidemment HOU Mohamed, mon fiancé qu'est l'inspecteur de la protection des forêts. Ta tendresse m'a toujours portée et ta finesse intellectuelle m'a fourni un cadre de vie extrêmement stimulant. J'ai même envie de dire que tu es « Co-encadré » cette thèse tellement. Pour tout cela et pour cette année passionnante, du fond du cœur : MERCI BEAUCOUP!

Je remercie mes frère Oussama et Mohamed Monsef, ma sœur Nesrin pour leur encouragement et leur aide au long de mes études, et tout particulièrement au cours de ce travail.

Enfin, je remercie tous mes Ami(e)s que j'aime, Sarah, Djallel, Abdelkrim, Samir et Lillia, pour leurs encouragements et pour l'ambiance agréable tout au long des années d'étude et en particulier à Newel pour sa présence dans les moments difficiles et grâce à qui j'ai passé d'excellents moments.

Introduction générale :

De nos jours, la protection de l'environnement est un problème majeur pour l'humanité. Un volet important et vital concerne la préservation des ressources en eaux, en effet ces dernières sont menacées par une pollution diffuse et multiforme aggravée par le progrès dans le bien être de l'homme, une industrialisation sauvage et une démographie galopante.

La contamination des eaux par des polluants d'origines diverses est un problème d'actualité ; dans l'industrie de textile en particulier, les eaux résiduaires sont l'une des plus importantes sources de pollution des eaux superficielles et des nappes souterraines, surtout envers les terres agricoles (qualité de la récolte) et sur la faune et la flore [1].

En fait, les différents colorants utilisés causent de sérieux problèmes en raison de leur stabilité et de leur faible biodégradabilité. Ainsi, il est nécessaire de traiter ces rejets avant qu'ils soient déversés dans le milieu naturel.

Plusieurs travaux publiés en vue de déterminer un rendement important de décoloration portent sur les techniques de traitement biologiques (traitements aérobies et anaérobies), sur la coagulation-flocculation, l'osmose inverse, l'oxydation, la réduction chimique ou la dégradation photo catalytique. Cependant, du fait de la composition très variable de ces eaux et à cause de la complexité de la manipulation des produits chimiques, la plupart de ces méthodes conventionnelles commencent à s'avérer insuffisantes pour un traitement simple et efficace et nécessitant une consommation élevée en réactifs [2].

La présente recherche vise à améliorer le rendement de décoloration par le procédé de coagulation-flocculation en combinaison avec un nouveau bio-flocculant extrait du cactus algérien. Notre objectif est de diminuer l'apport en réactifs chimique par l'ajout d'un bio-flocculant (poudre de cactus ou jus de cactus). Ce travail rentre aussi dans le développement durable des ressources naturelles de l'Algérie car ce procédé utilise un flocculant naturel.

La première partie consiste en une synthèse bibliographique composée du premier chapitre, consacré généralement à la pollution d'une eau chargée en colorant textile et leur procédé de traitement avec des aspects toxicologiques et écologiques (les dangers des rejets textiles, l'eutrophisation). Les différents flocculant industriels et les bio-flocculant sont évoqués dans le deuxième chapitre. Enfin un troisième chapitre portant sur le procédé de coagulation flocculation qui définit les particules colloïdales ainsi que le mécanisme de déstabilisation des suspensions colloïdales.

La deuxième partie composée du quatrième et dernier chapitre englobant la partie expérimentale, qui concerne le traitement d'une eau chargée en colorant (Bleu Cibacette (BC)) par le procédé de coagulation-flocculation. En utilisant des flocculants industriels : FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ et la chaux et un bio-flocculant qui est la poudre ou le jus de cactus.

Enfin, le manuscrit est achevé par une conclusion générale, résumant les principaux résultats de notre expérimentation.

Résumé :

Cette étude consiste à utiliser des floculants de nature chimique, à savoir le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique et la chaux et un nouveau floculant naturel biodégradable à base de poudre et de jus de cactus algérien dans un procédé physico-chimique (coagulation-flocculation), pour traiter une solution synthétique colorée par un colorant utilisé dans l'industrie textile : bleu de cibacette. Le rendement du procédé est évalué par la mesure de l'absorbance. Les résultats obtenus mettent en évidence une efficacité du double dosage des floculants chimiques et du jus de cactus. En effet, le sulfate d'aluminium à **10 mg/l** couplé avec **1,6 ml** de jus de cactus entraîne un rendement optimal de **85,9 % à pH 8**. De même, le chlorure ferrique à **10 et à 20 mg/l** couplé respectivement à **1,8 ml** et à **1 ml** de jus de cactus a permis d'obtenir des rendements optimaux de **82,52 %** et de **88,3 % à pH_{initial}**. Enfin, la chaux à **30 mg/l** combinée avec **1,6 ml** de jus de cactus a donné un rendement optimal de **70,12 %**. En comparant avec les résultats obtenus avec les floculants chimiques seuls, nous constatons que les doses des produits chimiques sont très élevées. A titre d'exemple, le rendement optimal obtenu avec le sulfate d'aluminium est de **87,09 %** avec une concentration optimale de **100 mg/l d'Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O à pH 8**.

Par contre, la poudre de cactus n'a pas donné de résultats intéressants.

Mots-clés : la densité optique ; coagulation-flocculation ; bleu de cibacette ; coagulants chimiques ; bio-floculant ; opuntia ficus indica ;

ملخص

هذه الدراسة هو استخدام المرسب الكيميائية، وهي كبريتات الألمنيوم وكلوريد الحديديك والجير وقابلة للتحلل الطبيعي مسحوق جديد مقرها وعصير الصبار الجزائري في عملية الفيزيائية والكيميائية لعلاج حل الاصطناعية الملوونة مع صبغة المستخدمة في صناعة الغزل والنسيج: الأزرق سبياسات. يتم تقييم العائد من هذه العملية عن طريق قياس الامتصاصية. أظهرت النتائج كفاءة جرعة مزدوجة من المرسب الكيميائية وعصير الصبار. في الواقع، كبريتات الألمنيوم ملغ **10 / ل** يقترن مع **1.6** مل من عصير الصبار بسبب العائد الأمثل **85.9 %** في درجة الحموضة **8**. وبالمثل، فإن كلوريد الحديديك في **10** و **20** ملغ / لتر إلى جانب التوالي إلى **1.8** مل و **1** مل من عصير الصبار والحصول على عوائد أفضل من **82.52 %** و **88.3 %** على الحموضة الابتدائية. وأخيرا، فإن الجير إلى **30** ملغ / ل جنبا إلى جنب مع **1.6** مل من عصير الصبار أعطى الأداء الأمثل من **70.12 %**. مقارنة مع النتائج التي تم الحصول عليها مع المرسب الكيميائية فقط، نجد أن جرعات من المواد الكيميائية مرتفعة جدا. على سبيل المثال، كانت الكفاءة المثلثى التي تم الحصول عليها مع كبريتات في درجة الحموضة **8** الألمنيوم **87.09 %** مع تركيز الأمثل من **100** ملغم / لتر.

للسليفات، فإن مسحوق الصبار لا تعطي نتائج مثيرة للاهتمام.

كلمات البحث: الكثافة البصرية، التكتل. الأزرق سبياسات. التخثر الكيميائية؛ المكتل الحيوي؛ اوينتا فيكيس انديكا

Summary:

This study is the use of chemical flocculants, namely aluminum sulfate, ferric chloride and lime and a new natural biodegradable flocculant based powder and Algerian cactus juice in a physico-chemical process (coagulation flocculation) for treating colored synthetic solution with a dye used in the textile industry: cibacette blue. The yield of the process is assessed by measuring the absorbance. The results show a double dosage efficiency of chemical flocculants and cactus juice. Indeed, aluminum sulfate **10 mg / 1** coupled with **1.6 ml** of cactus juice causes optimum yield **85.9%** at pH **8**. Similarly, the ferric chloride at **10** and **20 mg / 1** coupled respectively to **1.8 ml** and **1 ml** of cactus juice was obtained optimum yields of **82.52%** and **88.3%** to **pH_{initial}**. Finally, the lime to **30 mg / L** combined with **1.6 ml** of cactus juice gave optimum performance of **70.12%**. Comparing with the results obtained with the only chemical flocculants, we find that the doses of chemicals are very high. For example, the optimal efficiency obtained with aluminum sulphate was **87.09%** with an optimal concentration of **100 mg / 1 Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O at pH 8**.

For cons, the cactus powder did not give interesting results.

Key words: optical density, coagulation-flocculation; Blue cibacette; chemical coagulants; bio-flocculant; *Opuntia ficus indica*;

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I:

Généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

I.1. Introduction.....	2
I.2. Classification selon l'origine de la pollution :.....	2
I.2.1. Pollution urbaine.....	2
I.2.2. Pollution agricole :.....	2
I.2.2.1. Utilisation des engrais en agriculture.....	2
I.2.2.2. Utilisation des pesticides en agriculture.....	2
I.2.3. Pollution industrielle :.....	2
I.2.3.1. Description succincte de l'industrie textile.....	3
I.3. Les effluents textiles.....	3
I.4. Nature des effluents textiles :.....	4
I.4.1. Composition des effluents textiles.....	4
I.4.2. Impact des effluents textiles sur l'environnement.....	4
I.5. Les colorants :.....	5
I.5.1. Définition d'un colorant.....	5
I.5.2. Généralité sur les colorants.....	5
I.5.3. Utilisation des colorants.....	6
I.5.4. classification des colorants :.....	6
I.5.4.1. Classification technique :.....	6
a. Les colorants naturels.....	6
b. Les colorants synthétiques.....	6
I.5.4.2. Classification chimique :	7
a. Les colorants azoïques.....	7
b. Les colorants anthraquinoniques.....	7
c. Les colorants triphénylméthanes.....	7
d. Les colorants indigoïdes.....	8
I.5.4.3. Classification tinctoriale :.....	8
a. Les colorants réactifs.....	8
b. Les colorants de cuve.....	9
c. Les colorants dispersés.....	9
d. Les colorants directs.....	9

e. Les colorants à mordants.....	9
f. Les colorants au soufre.....	9
I.5.5. Mécanisme de fixation des colorants.....	9
I.5.6. Colorants textiles, Environnement et santé :.....	10
I.5.6.1. Les dangers potentiels.....	10
I.5.6.2. Les dangers à long terme.....	10
I.5.7. Méthodes de traitement :.....	10
I.5.7.1. Méthodes biologiques de traitement:.....	10
a. Traitement aérobie.....	10
b. Traitement anaérobie.....	10
I.5.7.2. Méthodes physiques:.....	11
a. Adsorption sur charbon actif et autres matériaux.....	11
b. Filtration sur membrane.....	11
I.5.7.3. Méthode physico-chimique: coagulation – flocculation.....	11
I.5.7.4. Méthodes chimiques de traitement des textiles.....	11
I.5.8. Législation sur l'environnement.....	11
I.6. Conclusion.....	12

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée.

II.1. Introduction.....	13
II.2. Définition d'un coagulant et floculant.....	13
II.3. Les types des floculant et coagulants :.....	13
II.3.1. Les coagulants de type sels métalliques.....	13
a) Sulfate Ferreux - $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ -.....	13
b) Oxyde de Calcium - CaO -(lime).....	13
c) Alun - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14\text{H}_2\text{O}$ -.....	13
d) Chlorure ferrique - FeCl_3 -.....	13
❖ Les avantages.....	14
❖ Les inconvénients.....	14
II.3.2. Les coagulants de type sels métalliques polymérisés.....	15
a) Les avantages.....	15
b) Les inconvénients.....	15
II.3.3. Les floculant de type polymères (poly électrolytes) synthétiques.....	15
a) Les avantages.....	15
b) Les inconvénients.....	16

II.3.4. Les coagulants d'origine naturelle.....	16
II.3.4.1. Les polymères d'origine biologique.....	16
a) Alginates.....	16
b) Amidons.....	16
c) Autres composés.....	16
II.3.4.2. Extrait de graines de <i>Moringa oleifera</i>	16
a) Caractéristiques générales.....	17
b) Différentes formes du floculant.....	17
c) Les différentes <i>Moringaceae</i>	18
d) Bactériologie : Le <i>Moringa</i> purifie-t-il l'eau?.....	18
e) Intérêt du <i>M. oleifera</i> comme floculant.....	18
f) Les avantages.....	18
g) Les inconvénients.....	19
II.3.4.3. Le cactus.....	19
a) Appellation et origine.....	19
b) Description botanique de la plante.....	19
c) Présentation de la plante.....	20
d) Classification.....	20
e) Domaine d'utilisation de la plante.....	21
f) L'importance du cactus dans le monde et sa situation au Maroc.....	21
g) L'adaptation du cactus à la sécheresse.....	21
h) Importance économique et écologique.....	22
i) L'utilisation de cactus dans le domaine d'épuration et de traitement des eaux.....	22
II.4. La toxicité des coagulants et floculants.....	23
II.5. Conclusion.....	24

Chapitre III :
La coagulation-flocculation

III.1. Introduction.....	25
III.2. Coagulation/flocculation.....	25
III.3. Les particules mises en jeu : Les colloïdes.....	26
III.3.1. Généralités.....	26
III.3.2. Les particules colloïdales.....	26
III.3.3. Les types des colloïdes.....	26

III.3.4. Structure des colloïdes.....	27
III.4. But de la coagulation – floculation.....	28
III.5. Phénomène de la coagulation.....	28
III.5.1. Compression du double couche.....	29
III.5.2. Adsorption et neutralisation des charges.....	30
III.5.3. Emprisonnement des particules dans un précipité.....	30
III.5.4. Adsorption et pontage.....	31
III.5.5. Facteurs influençant la coagulation.....	31
III.5.5.1. Influence du pH.....	31
III.5.5.2. Influence des sels dissous.....	31
III.5.5.3. Influence de la température de l'eau.....	31
III.5.5.4. Influence du coagulant.....	32
III.5.5.5. Influence du mélange.....	32
III.5.5.6. Influence De la turbidité.....	32
III.5.5.7. Coagulation de la couleur.....	33
III.6. Phénomène de la floculation.....	33
III.6.1. Théorie de la floculation.....	33
III. 6.1.1. Floculation péri cinétique.....	33
III.6.1.2. Floculation ortho cinétique.....	34
III.6.2. Nature des floculant.....	34
III.6.3. Processus de la floculation.....	34
III.7. Technologie de la coagulation –floculation.....	34
III.7.1. Stratégie.....	34
III.7.2. Choix du coagulant.....	35
III.8. Le jar test.....	35
III.9. Conclusion.....	36

Chapitre IV:
Etude expérimentale

IV.1. Introduction.....	37
IV.2. Matériels et produits utilisés.....	37
IV.2.1. Dispositif expérimental.....	37
IV.2.2. Produits utilisées.....	38
IV.2.3. Effluent synthétique.....	38
IV.3. Protocole expérimental.....	39
IV.3.1. Préparation de la solution synthétique.....	39

IV.3.2. Préparation de la solution de coagulants et floculant chimiques et naturels.....	39
IV.3.3. La méthode de coagulation-flocculation.....	41
IV.3.4. Technique d'analyse.....	42
a) Mesure de pH.....	42
b) Mesure de l'absorbance.....	42
IV.3.5. Expression des résultats.....	43
✓ Rendement de l'absorbance du procédé:.....	43
IV.4. Résultats expérimentaux et interprétation.....	43
a) Détermination de λ_{\max} du colorant BC.....	43
b) Le cas de coagulant d'$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$.....	44
✓ Le rendement et la variation de pH.....	44
✓ L'ajustement du pH.....	45
✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le rendement.....	46
✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le pH.....	48
✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le rendement d'absorbance.....	48
✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le pH.....	51
Conclusion (b).....	52
c) Le cas de coagulant de $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$.....	52
✓ Le rendement et la variation de pH.....	52
✓ L'ajustement du pH.....	53
✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le rendement d'absorbance.....	55
✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le pH.....	56
✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le rendement d'absorbance.....	56
✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le pH.....	58
Conclusion (c).....	59
d) Le cas de coagulant de CaO.....	59
✓ Le rendement et la variation de pH.....	59
✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le rendement d'absorbance.....	60
✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le pH.....	61

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le rendement d'absorbance.....	62
✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le pH.....	63
Conclusion (d).....	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.	
Annexes.	

Liste des figures:

<u>Figure I.1:</u> Structures des colorants.....	5
<u>Figure I.2:</u> Structure d'un colorant azoïque.....	7
<u>Figure I.3:</u> Structure d'un colorant anthraquinoniques.....	7
<u>Figure I.4:</u> Structure d'un colorant triphénylméthane.....	8
<u>Figure I.5:</u> Structure d'un colorantindigoïdes.....	8
<u>Figure II.1 :</u> Les composantes de la plante.....	20
<u>Figure III.1:</u> Coagulation/flocculation.....	25
<u>Figure III.2:</u> Représentation du colloïde hydrophile.....	27
<u>Figure III.3:</u> Distribution ionique autour d'un colloïde.....	27
<u>Figure III.4:</u> Coagulation – Flocculation.....	28
<u>Figure III.5:</u> Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules.....	29
<u>Figure III.6:</u> Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules, après compression de la double couche.....	30
<u>Figure III.7:</u> Photo de jar test.....	35
<u>Figure IV.1:</u> Solution synthétique.....	39
<u>Figure IV.2:</u> Cactus de centre de Baheli.....	39
<u>Figure IV.3:</u> Les étapes de préparation de jus de cactus.....	40
<u>Figure IV.4:</u> Les étapes de préparation de poudre de cactus.....	41
<u>Figure IV.5:</u> Protocol expérimental.....	42
<u>Figure IV.6:</u> La courbe d'absorbance du BC.....	42
<u>Figure IV.7:</u> L'influence d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 18 H_2O sur le rendement d'élimination de colorant et sur la variation du pH.....	44
<u>Figure IV.8:</u> L'effet d'ajustement de du pH sur le rendement d'élimination du colorant du pH_f (conc=100 mg/l).....	45
<u>Figure IV.9:</u> Diagramme d'équilibre de l'aluminium dissous.....	45
<u>Figure IV.10:</u> L'effet de mélange de poudre de cactus avec l' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ d'élimination.....	47
<u>Figure IV.11:</u> L'effet de mélange de poudre de cactus avec l' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sur le pH.....	48
<u>Figure IV.12:</u> L'effet de jus de cactus avec l' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sur le rendement d'absorbance.....	49

<u>Figure IV.13:</u> Structure de l'acide polygalacturonique (les sites de neutralisation des colloïdes polluants P).....	50
<u>Figure IV.14 :</u> L'effet du jus de cactus avec l' Al₂(SO₄)₃ sur le pH	51
<u>Figure IV.15:</u> La solution synthétique après traitement par Al₂(SO₄)₃	52
<u>Figure IV.16:</u> Le rendement d'élimination de colorant et la variation du pH	53
<u>Figure IV.17:</u> L'effet d'ajustement de pH sur le rendement d'élimination du colorant.....	54
<u>Figure IV.18:</u> Diagramme d'équilibre du fer dissous.....	54
<u>Figure IV.19:</u> L'effet de poudre de cactus avec le FeCl₃ sur le rendement d'absorbance.....	55
d'absorbance.....	55
<u>Figure IV. 20 :</u> L'effet de mélange de poudre de cactus avec FeCl₃ sur le pH	56
<u>Figure IV.21:</u> L'effet de jus de cactus avec FeCl₃ sur le rendement d'absorbance.....	57
<u>Figure IV.22:</u> L'effet du jus de cactus avec FeCl₃ sur le pH	58
<u>Figure IV.23:</u> La solution synthétique après traitement par FeCl₃	58
<u>Figure IV.24:</u> Le rendement d'élimination de colorant et la variation du pH	59
<u>Figure IV.25:</u> L'effet de poudre de cactus avec le CaO sur le rendement d'absorbance.....	60
<u>Figure IV.26:</u> L'effet de poudre de cactus avec le CaO sur le pH	61
<u>Figure IV.27:</u> L'effet de jus de cactus avec CaO sur le rendement d'absorbance.....	62
<u>Figure IV.28:</u> L'effet du jus de cactus avec le CaO sur le pH	63

Liste des tableaux :

<u>Tableau IV.1:</u> rassemble les réactifs utilisés au cours des essais expérimentaux.....	38
<u>Tableau IV.2:</u> Propriétés physico-chimiques du jus utilisé.....	40
<u>Tableau IV.3 :</u> Composition de mucilage des raquettes d' <i>Opuntia</i>	50

Annexes :

Annexe 1: La densité optique de colorant ***BC*** avec longueur d'onde de ***420-890 nm***.

Annexe 2: Le cas de coagulant ***Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O***.

Annexe 3: Le cas de coagulant ***FeCl₃, 6H₂O***.

Annexe 4: Le cas de coagulant ***CaO***.

Annexe 5: Le cas de bio-floculant (jus et poudre de cactus).

Annexe 6:

✓ **Tableau I-2 :** Présentation de différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés.

✓ **Tableau I-3 :** valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents textiles.

Annexe 7: Caractéristique de quelques coagulants.

Annexe 8: Matériels et produits utilisés.

Liste des abréviations:

1N : *1 fois normale.*

Abs : *Absorbance*

Abs_D : *Absorbance après décantation.*

Abs_C : *Absorbance après centrifugation.*

Al : *Aluminium.*

BC : *Bleu de cibacette.*

CaO : *la chaux.*

C₀ : *la concentration initiale.*

DBO₅ : *demande biologique en oxygène.*

DCO : *demande chimique en oxygène.*

DL₅₀ : *un indicateur quantitatif de toxicité.*

F₀ : *floculation ortho cinétique.*

Fe : *le Fer.*

F_p : *floculation péri cinétique*

MES : *matière en suspension*

MO : *matière organique*

MM : *Teneur en matière minérale.*

MS : *Matière sèche.*

PACl : *le chlorure de poly aluminium*

PH : *Potentiel d'Hydrogène*

R(%) : *Rendement d'élimination de colorant*

λ_{max} : *Longueur d'onde au maximum d'absorption du colorant.*

NTU : *Unité de Turbidité Néphéломétrique.*

SOTRADAL : *Soieries Traditionnelles d'Algérie, SPA.*

Chapitre I :

généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

1.1. Introduction :

Les colorants et adjuvants utilisés par les industries textiles peuvent constituer une menace sérieuse pour l'environnement car leur présence dans l'eau, même à des quantités très faibles, est très visible et indésirable ; par conséquent, leur présence dans les systèmes aquatiques réduit la pénétration de la lumière et retarde ainsi l'activité photosynthétique [3].

Ce chapitre a pour objectif de définir les colorants textiles, de présenter leurs impacts et voir les méthodes biologiques, physiques et chimiques nécessaire à leur traitement.

1.2. Classification selon l'origine de la pollution :

Selon l'origine de la pollution, on distingue trois catégories :

1.2.1. Pollution urbaine :

Ce sont les eaux des habitations et des commerces qui entraînent la pollution urbaine de l'eau. Les polluants urbains sont représentés par les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération notamment des rejets industriels rejetés par les entreprises en quantités variables selon l'importance de l'agglomération et son activité [4].

1.2.2. Pollution agricole :

L'agriculture, l'élevage, l'aquaculture et l'aviculture sont responsables du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterraines. Ces contaminants comprennent à la fois des sédiments provenant de l'érosion des terres agricoles, des composés phosphorés ou azotés issus des déchets animaux et des engrains commerciaux, notamment des nitrates.

1.2.2.1. Utilisation des engrais en agriculture : La modernisation de l'agriculture et son intensification ont été généralement accompagnées d'une utilisation abusive et non rationnelle des engrais azotés, notamment.

1.2.2.2. Utilisation des pesticides en agriculture: Les pesticides sont utilisés en agriculture pour protéger les cultures et les récoltes contre les insectes prédateurs afin d'augmenter les rendements. Le lessivage de ces produits phytosanitaires utilisés en agriculture entraîne la contamination des eaux par des substances toxiques (pesticides). Par ailleurs, les pesticides ne sont pas biodégradables [5].

1.2.3. Pollution industrielle :

Le développement accéléré des techniques industrielles modernes a engendré une pollution très importante. En effet, celle-ci est devenue plus massive, plus variée et plus insidieuse. Devant

Chapitre I : généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

l'extrême diversité de ces rejets, une investigation propre à chaque type d'industrie est nécessaire.

Il est donc primordial d'être parfaitement informé sur les procédés de fabrication et le circuit des réactifs et des produits. Il est évident que les effluents déversés sans traitement approprié entraînent des changements indésirables dans le milieu récepteur et des pollutions très néfastes.

A ce propos, parmi les grandes industries polluantes, l'industrie textile occupe une place suffisamment importante pour être prise en compte.

1.2.3.1. Description succincte de l'industrie textile :

L'industrie textile possède une chaîne de transformation partant de matières fibreuses jusqu'à des produits semi-ouvrages ou entièrement manufacturés [6]. Elle présente l'avantage de représenter une filière complète qui va de la matière brute au produit fini livrable au consommateur [7].

Les fibres textiles sont des substances susceptibles d'être transformées en fil, puis en tissu, bonneterie, dentelle, corde et ficelle. Elles peuvent provenir du règne animal, végétal, minéral ou chimique [8].

1.3. Les effluents textiles :

Parmi les industries consommatrices d'eau en grande quantité, on trouve celle du textile avec celle de la tannerie en tête de liste. Les secteurs de teintures, de l'impression ou du finissage du textile y occupent une place de choix. Ces activités génèrent une pollution importante en eaux résiduaires (tab I.1 présente les différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés) [9]. (Voir annexe 6)

Selon un rapport publié en **2000** par la Fédération des industries de textile, la consommation en pigment et colorants de ce secteur en Algérie dépasse les **4012** tonnes annuellement, la consommation de produits chimiques auxiliaires atteint **16 356** tonnes/an.

L'alimentation en eau des unités de textile ayant des activités de teintures et d'impression, se fait à partir des réseaux de distribution publics, avec un total de **4 808 700 m³/an** et à partir de puis ou de forages privés, avec un total de **763 000 m³/an** [10].

Les eaux résiduaires de l'industrie de textile présentent généralement des problèmes de couleur, de température relativement élevée et de concentration élevées de **DBO₅**, de **DCO**, de solides en suspension, ainsi que de toxicité et de conductivité élevées.

Chapitre I : généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

1.4. Nature des effluents textiles :

1.4.1. Composition des effluents textiles :

Les effluents textiles qui proviennent des diverses étapes du procédé de fabrication textile, renferment une quantité de polluants très diversifiée et d'une grande complexité chimique. La plupart des matières dont sont chargées les eaux résiduaires sont biodégradables. Il est néanmoins possible que certains composés parvenant dans des cours d'eau entraînent lors de leur dégradation une baisse du taux d'oxygène en dessous du seuil requis et déclenchent un processus de putréfaction de l'eau.

Les différents types de polluants des effluents textiles sont représentés par :

- ✓ Les matières décantables,
- ✓ Les métaux lourds,
- ✓ Les hydrocarbures,
- ✓ Les composés organo-halogénés,
- ✓ Les composés tensioactifs /détergents,
- ✓ Les colorants,

En plus des produits polluants, les effluents textiles peuvent être l'objet de deux types de nuisance : une élévation de la température de l'eau (la température maximum autorisée est de 35°C) et un pH entre 6 et 9 prescrit pour les eaux sortant des stations d'épuration correspondantes [11].

1.4.2. Impact des effluents textiles sur l'environnement :

Les composés tensioactifs ou détergents, constituent une charge polluante non moins négligeable. Il s'agit des agents de lavage, des émulsionnats et des mouillants, des correcteurs dans les procédés de teinture, des additifs augmentant le lissage et la douceur des fibres, de colorants utilisés en grandes quantités à des fins diverses qui ne sont pas biodégradables à 100%. La charge polluante des eaux imputable aux composés tensioactifs n'est pas seulement due à sa charge organique, elle provient aussi de son effet tensioactif, qui tend à réduire le pouvoir d'auto-épuration des cours d'eau et met en péril la vie des micro-organismes et des poissons.

D'autre part, les colorants solubles dans l'eau constituent une source de pollution spécifique à l'ennoblissement textile. En cas de forte coloration, les plantes ne reçoivent plus suffisamment de lumière. Les effluents rejetés par les teintureries représentent 20% ou moins du volume des eaux communales, la station d'épuration mécanique et biologique est en mesure de fixer ces éléments colorants dans les boues résiduaires (par une sorte de processus de coloration) puis de les éliminer dans le digesteur. Là où ce n'est pas le cas, des parts importantes de colorants peuvent être évacuées par la station et colorer fortement les eaux réceptrices [12].

Chapitre I : ***généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles***

Les secteurs de filature et celui du tissage (bonneterie et tricotage) sont à l'origine d'importantes nuisances acoustiques et s'accompagnent d'importants dégagements de poussière [12].

1.5. Les colorants :

1.5.1. Définition d'un colorant :

Un colorant est une matière colorée par elle-même, capable de se fixer sur un support. La coloration plus ou moins intense des différentes substances est liée à leur constitution chimique. En fait, un colorant est un corps susceptible d'absorber certaines radiations lumineuses et de réfléchir alors les couleurs complémentaires. Ce sont des composés organiques comportant dans leurs molécules trois groupes essentiels : le chromophore, l'auxochrome et la matrice. Le site actif du colorant est le chromophore, il est constitué de groupes d'atomes dont les plus classiques sont le nitro ($-NO_2$), le diazo($-N=N-$), le nitroso ($-N=O$), le thiocarbonyl ($-C=S$), le carbonyl ($-C=O$), ainsi que les alcènes ($-C=C-$). La molécule chromogène n'a des possibilités tinctoriales que par l'adjonction d'autres groupements d'atomes appelés «auxochrome». Ces groupes auxochrome permettent la fixation des colorants et peuvent modifier la couleur du colorant. Ils peuvent être acides ($COOH$, SO_3 , OH) ou basiques (NH_2 , NHR , NR_2). Le reste des atomes de la molécule correspond à la matrice, la troisième partie du colorant [13].

1.5.2. Généralité sur les colorants :

Les colorants constituent un groupe très diversifié ayant en commun la propriété de colorer d'une manière permanente les tissus, cuirs ou papiers. Tous ces colorants sont des composés aromatiques dont les électrons très délocalisés peuvent adsorber la lumière pour certaines longueurs d'ondes. Les propriétés colorantes des composés organiques dépendent de leur structure et de leur composition chimique. Les produits utilisés Exemple de structures de colorants [2] (voir fig. I.1) :

Figure I.1: Structures des colorants [13].

Chapitre I : généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

Les colorants rejetés par les industries textiles et les officines de nettoyage des vêtements, sont peu ou pas biodégradables et résistent bien aux traitements classiques d'épuration. Ils créent surtout une nuisance visuelle dans les eaux contaminées bien qu'un certain nombre d'entre eux est mutagène et cancérogène.

I.5.3. Utilisation des colorants :

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

- ✓ pigments (industrie des matières plastiques) ;
- ✓ encre, papier (imprimerie) ;
- ✓ colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire) ;
- ✓ pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment) ;
- ✓ colorants capillaires (industrie des cosmétiques) ;
- ✓ colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique) ;
- ✓ carburants et huiles (industrie automobile etc.,...) ;
- ✓ Colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport, colorants textiles à usage médical etc [14].

I.5.4. Classification des colorants :

Les colorants sont classés en fonction de leurs origines :

I.5.4.1. Classification technique :

Les colorants utilisés dans l'industrie textile contiennent habituellement des groupes acides sulfoniques qui leur confèrent une hydro solubilité appropriée et qui permettent à la molécule du colorant de se lier ioniquement aux sites chargés du réseau polymérique du tissu [15]. On peut classer les colorants organiques en deux catégories suivant leur synthèse :

a) Les colorants naturels :

Ils sont très répandus, surtout dans les plantes (bois, racines, graines, fleurs et fruits) et même dans les micro-organismes et le corps des animaux. Du fait de leur cherté, on ne les utilise dans l'industrie textile, du cuir et du papier que pour des traitements spéciaux. Ils restent, en revanche très utilisés dans les produits alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques soumis à des réglementations plus strictes [4].

b) Les colorants synthétiques :

Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché. Tous ces colorants sont synthétisés principalement à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphtalène, xylène et anthracène) [16].

Chapitre I : **généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles**

Ils sont de plus en plus utilisés dans les industries de coloration et des textiles grâce à leur synthèse assez facile, à leur production rapide et à la variété de leurs couleurs comparées aux colorants naturels [17].

I.5.4.2. Classification chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore. (Voir fig. I.2)

a. les colorants azoïques :

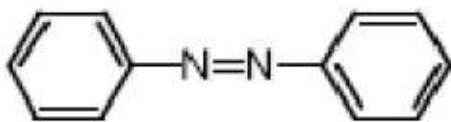


Figure I.2: Structure d'un colorant azoïque [18].

Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques. Cette catégorie de colorant est actuellement la plus répandue sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de **50%** de la production mondiale de matières colorantes [18, 19].

b. les colorants anthraquinoniques:

Les colorants anthraquinoniques sont d'un point de vue commercial. Les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène. Montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino [20]. (Voir fig. I.3)

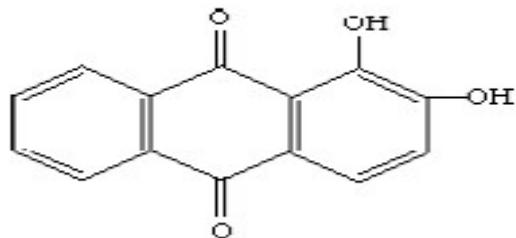


Figure I.3: Structure d'un colorant anthraquinoniques [20].

c. Les colorants triphénylméthanes:

Les colorants triphénylméthanes dérivent du triphénylméthane, qui est un hydrocarbure possédant trois cycles phényle liés à un carbone central. On retrouve cette structure de base dans un grand nombre de composés organiques colorés. Les colorants triphénylméthanes et leurs dérivés hétérocycliques constituent la plus ancienne classe de colorants synthétiques [4]. (Voir fig. I.4)

Chapitre I :
généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

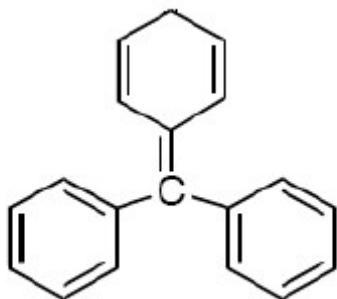


Figure I.4: Structure d'un colorant triphénylméthane [4].

d. Les colorants indigoïdes :

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorant en textile, comme additifs en produits pharmaceutiques, la confiserie, ainsi que dans des diagnostiques médicaux [4]. (Voir fig. I.5)

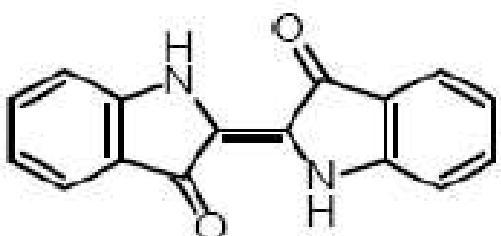


Figure I.5: Structure d'un colorant indigoïdes [4].

I.5.4.3. Classification tinctoriale :

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. On distingue différentes catégories [4]:

a. Les colorants réactifs:

Contiennent des groupes chromophores issus essentiellement des familles azoïques, anthraquinoniques et phtalocyanine. Leur appellation est liée à la présence d'une fonction chimique réactive, de type triazinique ou vinylssulfone assurant la formation d'une liaison covalente forte avec les fibres. Solubles dans l'eau, ils entrent de plus en plus fréquemment dans la teinture du coton et éventuellement dans celle de la laine et des polyamides.

Chapitre I : **généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles**

b. Les colorants de cuve :

Les colorants de cuve sont des colorants insolubles dans l'eau. Cependant, sous l'action d'un réducteur, le dithionite de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$), un colorant de cuve donne son leuco-dérivé c'est-à-dire le produit de réduction incolore ou blanc et soluble dans l'eau.

c. Les colorants dispersés :

Les colorants dispersés sont très peu solubles dans l'eau et sont appliqués sous forme d'une fine poudre dispersée dans le bain de teinture. Ils sont en mesure, lors d'une teinture à haute température, de diffuser dans les fibres synthétiques puis de s'y fixer.

d. Les colorants directs :

Les colorants directs contiennent ou sont capables de former des charges positives ou négatives électro statiquement attirées par les charges des fibres. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule.

e. Les colorants à mordants :

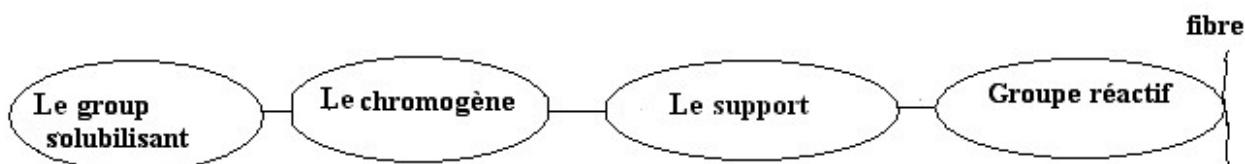
Les colorants à mordants généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium, de chrome, de cobalt, de cuivre, de nickel ou de fer pour donner différents complexes colorés avec le textile.

f. Les colorants au soufre :

Beaucoup de colorants contiennent du soufre dans leur molécule. Ils seront appelés colorants au soufre ; ils sont insoluble dans l'eau. Leur application en teinture passe par une réduction alcaline pour aboutir à un composé soluble, appelé leuco dérivé, qui de surcroit présente de l'affinité pour les fibres.

I.5.5. Mécanisme de fixation des colorants :

On peut schématiser la structure colorant-fibre ; une fois le colorant est fixé sur la fibre ; comme suite [21] :



Le support combine le chromogène avec le groupe réactif du colorant [22].

Le colorant peut se fixer sur la fibre soit par les forces de Van der Waals, liaison d'hydrogène ou bien par les interactions hydrophobiques, cette fixation dépend de la nature du colorant et de ces constituants chimiques. Le bon attachement entre le colorant et la fibre est le résultat de

Chapitre I : généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

la formation de liaison covalente par des interactions électrostatiques quand le colorant et la fibre ont des charges opposées [23].

D'après le tableau (I-2), nous voyons que le taux de fixation n'atteint pas toujours les **100%**. Les colorants qui ont un taux de fixation élevés sont les colorants dispersés (**90-100%**) et basiques (**95-100%**), ce sont les plus utilisés dans l'industrie textile [24]. (Voir l'annexe 6)

I.5.6. Colorants textiles, Environnement et santé :

Le principal problème environnemental qui se pose dans l'industrie textile est celui des quantités d'eau rejetées et de leur charge chimique. Les autres questions importantes sont la consommation énergétique, les émissions dans l'atmosphère, les déchets solides et les odeurs qui peuvent représenter des nuisances significatives dans certains traitements.

Beaucoup d'études ont montré les effets toxiques et/ou carcinogéniques des colorants azoïques. Leur toxicité est en fait due à la teneur en groupements cancérogènes tels que les groupements aromatiques, phtalogènes, cyanurés, sel de barium et de plomb [25].

I.5.6.1. Les dangers potentiels:

- *Eutrophisation.*
- *Sous-oxygénation.*
- *Couleur, turbidité, odeur.*

I.5.6.2. Les dangers à long terme:

- *La bioaccumulation.*
- *Cancer.*
- *Les sous produits de chloration.*

I.5.7. Méthodes de traitement :

I.5.7.1. Méthodes biologiques de traitement :

Par épuration biologique des eaux, on entend la décomposition des polluants organiques dans l'eau par les microorganismes. Les procédés biologiques se partagent en deux catégories: les traitements aérobies en présence d'oxygène et anaérobies sans oxygène.

a. Traitement aérobie:

Les polluants sont décomposés dans une unité biologique constituée d'un bassin de boue activée par des bactéries aérobies et autres microorganismes en une boue qui sédimente.

Après épuration la boue est séparée des eaux usées par sédimentation dans un décanteur; une partie est recyclée et le sur plus est évacué après pressage ou centrifugation [14].

b. Traitement anaérobie:

À l'inverse de la biodégradation aérobie, la digestion anaérobie des composés organiques s'effectue en l'absence d'oxygène et forme du dioxyde de carbone, du

Chapitre I : généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

méthane et de l'eau. C'est un procédé efficace pour le traitement de déchets très chargés en matières organiques et le méthane formé peut être utilisé comme énergie de chauffage [4].

I.5.7.2. Méthodes physiques:

a. Adsorption sur charbon actif et autres matériaux :

L'adsorption est un procédé d'élimination des polluants organiques ou minéraux présents dans des effluents aussi bien liquides que gazeux. Par ce procédé, le polluant est transféré de la phase fluide vers la surface du solide [4].

b. Filtration sur membrane:

Dans ce procédé, les polluants sont retenus par une membrane semi perméable dont le diamètre des pores est inférieur à celui des molécules à éliminer. Selon la qualité de l'eau désirée, on distingue la microfiltration, l'ultrafiltration ou la nano filtration.

I.5.7.3. Méthode physico-chimique: coagulation – flocculation:

Sous le terme de coagulation flocculation, on entend tous les processus Physicochimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés par des flocculant chimiques en espèces plus visibles et séparables (les flocs). Les flocs formés sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués. Par ailleurs, la coagulation flocculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau [14].

I.5.7.4. Méthodes chimiques de traitement des textiles:

Les techniques d'oxydation chimique sont généralement appliquées pour le traitement des composés organiques dangereux présents en faibles concentrations, en prétraitement avant des procédés biologiques, le traitement d'eaux usées chargées de constituants résistant aux méthodes de biodégradation et en post-traitement pour réduire la toxicité aquatique. Les deux réactifs les plus souvent énumérés pour ce type de traitement sont H_2O_2 et le Chlore [4].

I.5.8. Législation sur l'environnement :

La législation sur les rejets d'eaux résiduaires devient de plus en plus stricte. L'Algérie est dotée d'une réglementation **06-141** sur les rejets d'effluents textiles dans le milieu hydrique. Le tableau (I-3) précise les limites réglementation de ces rejets [3]. (Voir l'annexe 6)

Chapitre I : généralité sur la pollution de l'eau chargée en colorants textiles

1.6. Conclusion :

Les rejets colorés posent un problème esthétique mais également sanitaire car un grand nombre de ces colorants sont toxiques. Ces colorants synthétiques requirent des traitements spécifiques car les procédés classiques utilisés par les usines de traitements des eaux usées sont mal adaptés à la dépollution de ces polluants biocides [9].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

II.1. Introduction :

Parmi les traitements des eaux de consommation et des eaux usées, nous nous focalisons sur le procédé de coagulation-flocculation, qui fait appel à plusieurs agents chimiques, notamment les coagulants et les floculants. Ces produits synthétiques ont des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement, donc chercher des produits alternatifs devient une nécessité cruciale [26].

Dans un contexte sanitaire et environnemental ; nous allons concentrer notre étude à faire intégrer de nouveaux produits biodégradables dans le processus du traitement des eaux.

II.2. Définition d'un coagulant et floculant :

Coagulants et floculant sont des réactifs chimiques représentatifs de l'évolution de la chimie dans la seconde moitié du XXe siècle [27].

II.3. Les types des floculant et coagulants :

II.3.1. Les coagulants de type sels métalliques :

Ce type de coagulants peut-être utilisé pour traiter des eaux usées industrielles et domestiques, voici un aperçu des principaux:

a) Oxyde de Calcium - CaO (lime) :

Il produit du carbonate de calcium dans l'eau usée et permet ainsi la coagulation des matières particulières et de certains métaux. Il est généralement utilisé avec d'autres coagulants puisque de très grandes quantités de **CaO** sont souvent nécessaires lorsqu'il est utilisé seul [28].

b) Sulfate Ferreux - Fe(SO₄)₃:

Il est généralement utilisé avec le **CaO** pour réduire la dureté de l'eau. La combinaison des deux coagulants génère du sulfate de calcium et de l'hydroxyde ferrique. L'eau usée doit cependant contenir de l'oxygène dissout afin que la réaction puisse prendre place [28].

c) Alun - Al₂(SO₄)₃ x 14H₂O :

Il est utilisé pour réduire la dureté ainsi que la charge en phosphate des eaux usées. En solution, il réagit avec les composés alcalins présents (carbonate, bicarbonate et hydroxyde) ou le phosphate pour former un sel d'aluminium insoluble [28].

d) Chlorure ferrique – FeCl₃:

Il réagit selon l'alcalinité et la concentration en phosphate pour former un sel de fer insoluble [28].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

❖ Les avantages :

Plusieurs avantages et inconvénients accompagnent l'utilisation des agents chimiques présentés ci-dessus [29] :

- ✓ L'utilisation de ce procédé chimique est très répandue, il y a donc beaucoup d'équipement déjà existant et une multitude d'agents chimiques disponibles.
- ✓ Certains de ces agents chimiques sont peu dispendieux, notamment le **CaO**.
- ✓ Les systèmes de coagulation-flocculation chimique sont généralement automatisés et demandent donc peu de surveillance et d'entretien. Une main-d'œuvre hautement qualifiée n'est souvent pas nécessaire.
- ✓ La présence de composés toxiques dans l'effluent à traité n'est pas gênante et le système est stable lorsque soumis à des températures variables.
- ✓ Contrairement au système biologique un système de coagulation-flocculation chimique peut accommoder une grande variété de charges et de débits. La complexité dans la charge de l'effluent à traiter et l'intermittence dans le débit ne constituent pas un problème.
- ✓ Contrairement aux systèmes biologiques, un système chimique de traitement primaire requiert moins d'espace et les coûts d'installation sont moins importants.
- ✓ Une réduction quasi complète du phosphore est obtenue, de même qu'une importante réduction en azote.
- ✓ Une réduction significative est obtenue en termes de micropolluants, de métaux lourds, de bactéries et de virus [29].

❖ Les inconvénients :

- ✓ Puisqu'il y a plusieurs réactions en compétition dans ce type de système chimique et plusieurs degrés d'alcalinité en plus des autres facteurs influençant le procédé, il est particulièrement difficile d'établir les bons dosages. Beaucoup d'essais à l'échelle laboratoire sont donc nécessaires pour trouver un traitement optimal.
Une surdose de coagulant chimique peut diminuer l'efficacité du système.
- ✓ Les coagulants utilisés sont souvent corrosifs, des normes de sécurité doivent être respectées afin que les travailleurs manipulent ces substances avec précaution.
- ✓ L'addition de coagulant, principalement le **CaO**, peut augmenter le volume des boues jusqu'à **50 %**.
- ✓ De grandes quantités de substances chimiques doivent être acheminées à l'usine de traitement.
- ✓ La présence d'aluminium résiduel peut entraîner des problèmes importants pour la santé comme l'Alzheimer et autres pathologies de ce genre. Il est donc toxique pour les écosystèmes. Le fer aussi est toxique pour la faune.
- ✓ Cette toxicité génère plusieurs inquiétudes au niveau du grand public

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

- ✓ L'utilisation de l'alun, à cause de son interaction avec les substances alcalines provoque une réduction importante du **pH**.
- ✓ En eau froide, le processus est peu efficace
- ✓ Pour les pays en voie de développement, les coagulants chimiques peuvent être trop coûteux [29].

II.3.2. Les coagulants de type sels métalliques polymérisés :

Les coagulants de type sels métalliques polymérisés sont de plus en plus utilisés en Orient et en Europe de l'Est. Il existe plusieurs coagulants de ce type, notamment ceux à base d'aluminium et ceux à base de fer. Parmi ceux-ci, le chlorure de poly aluminium (**PACl**) est celui dont l'usage est le plus répandu dans le traitement des eaux usées [30].

a) Les avantages :

- ✓ Efficacité supérieure aux sels inorganiques traditionnels (alun ou sels ferriques).
- ✓ Prix inférieur aux coagulants traditionnels comme l'alun.
- ✓ Efficacité moins affectée par les changements saisonniers des paramètres de qualité de l'eau [30].

b) Les inconvénients :

- ✓ Les polymères à base d'aluminium comme le **PACl** sont potentiellement toxiques pour l'homme et les milieux naturels.
- ✓ La toxicité de l'aluminium a ainsi encouragé le développement de polymères à base de fer. Cependant, contrairement aux polymères à base d'aluminium, ces polymères sont encore au stade de développement [30].

II.3.3. Les floculant de type polymères (poly électrolytes) synthétiques :

De manière générale, ce sont des composés de haut poids moléculaires 10^4 - 10^6 Da de types anioniques, cationiques ou non ioniques.

L'intensité de la charge d'un polymère dépend de son degré d'ionisation qui dépend à son tour des charges sur les groupes fonctionnels, du degré de copolymérisation et de la quantité de groupes fonctionnels qui ont été substitués [31].

En solution, ils ont un taux de diffusion relativement bas et ils augmentent la viscosité.

Le brassage est donc nécessaire à la dispersion des polymères [28].

a) Les avantages :

- ✓ Pas besoin d'un dosage très précis.
- ✓ Réduit le volume de boues produites.
- ✓ Facile à entreposer et à brasser.

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

- ✓ Le poids moléculaire et la charge peuvent tous deux être optimisés selon le type d'effluent à traiter.
- ✓ Pas besoin d'ajuster le pH.
- ✓ Augmente la résistance des flocs aux forces de cisaillement [32].

b) Les inconvénients :

- ✓ Les polymères peuvent être toxiques pour la faune. Très peu d'études documentent cette toxicité. Un auteur montre que l'écotoxicité du traitement alun/polymère repose essentiellement sur le polymère utilisé comme agent floculant [32].
- ✓ L'utilisation de polymères synthétiques est coûteuse et donc pratiquement inenvisageable pour les pays en voie de développement.

II.3.4. Les coagulants d'origine naturelle :

Les coagulants à base d'aluminium, de fer et même les polymères synthétiques présentent un désavantage important : leur toxicité probante pour l'environnement. Cela a donc poussé quelques chercheurs à investiguer la possibilité d'utiliser des composés d'origine naturelle pour réaliser le procédé de coagulation-flocculation.

Historiquement, les coagulants d'origine végétale et animale sont apparus bien avant les coagulants synthétiques comme les sels chimiques [29].

II.3.4.1. Les polymères d'origine biologique :

Ces polymères naturels peuvent être extraits de substances d'origine animale ou végétale.

- Alginates :** Les alginates de sodium sont extraits de l'acide alginique, un composé provenant d'algues marines. Ces produits sont particulièrement employés en combinaison avec les sels ferriques, mais peuvent donner de bons résultats avec les sels d'aluminium [33].
- Amidons :** Obtenus de la pomme de terre, du tapioca ou d'autres végétaux, ces polymères de glucopyranose non linéaires ramifiés sont utilisés de préférence avec les sels d'aluminium. Une fois diluée, leur biodégradation peut-être rapide [33].
- Autres composés :** Plusieurs polysaccharides naturels ont des propriétés floculantes (Cellulose, gommes, tanins, xanthanes), mais ils sont très peu utilisés dans le traitement des eaux [33].

II.3.4.2. Extrait de graines de *Moringaoleifera* :

Cette technique de purification de l'eau était déjà employée au siècle dernier par les femmes soudanaises [34]. Ainsi, en extrayant dans une solution aqueuse le contenu des graines séchées de *Moringaoleifera*, une plante tropical appartenant à la famille des Moringaceae, on obtient un coagulant à la propriété forte intéressante. Il existe une quarantaine de variétés de cette plante, certaines affichant de meilleures performances dans le traitement des eaux usées [29].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

a) Caractéristiques générales :

Le *Moringaoleifera* peut être cultivé dans pratiquement toutes les régions de la zone intertropicale sauf là où la température descend en dessous de **6-8°C** [35].

Les graines de *Moringaoleifera* contiennent **25 à 34 %** d'huile. Il est possible d'extraire l'huile pour la vendre et d'utiliser le tourteau résultant comme source de floculant.

Le floculant contenu dans les graines ou les tourteaux est un polypeptide basique [34], plus précisément un ensemble de polyélectrolytes cationiques actifs.

Ce floculant n'affecte pas le **pH** et diminue les taux de fer et de manganèse. Le traitement peut être optimisé par l'ajout d'argile (montmorillonites) mais ceci nécessite encore des études [36].

b) Différentes formes du floculant :

La graine de Moringa peut s'utiliser comme floculant telle quelle ou transformée :

✓ Poudre brute :

Les graines sont réduites en poudre sans autre transformation. Elles contiennent, en plus du principe actif, de l'huile et des matières organiques.

✓ Tourteau :

Les interactions potentielles entre les protéines et l'huile laissent penser qu'un tourteau obtenu après extraction de l'huile serait plus efficace pour des traitements à grande échelle.

✓ Protéine purifiée :

Cette molécule, dénommée **MO2.1**, est une protéine qui a été purifiée et dont la séquence en acides aminés a pu être déterminée. Afin d'obtenir un floculant naturel efficace, la protéine **MO2.1** peut être extraite à partir des graines de *Moringasp* [37].

✓ Phytofloc_{TM} :

La société Optima Environnement S.A. a mis au point un floculant à base de protéines actives de *Moringaoleifera*. Le floculant obtenu par cette entreprise s'appelle le **Phytofloc_{TM}** et est destiné à être utilisé à l'échelle industrielle dans les stations de traitement de l'eau classiques.

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

c) Les différentes Moringaceae :

Des coagulants ont été identifiés dans les graines de différentes espèces de *Moringa*: *M. oleifera*, *peregrina*, *stenopetala*, *longituba*, *Drouhardii*, *ovalifolia*, *concanensis*. Les Moringaceae plus rares contiennent certainement des coagulants eux aussi. Les graines de *M. peregrina* contiennent **53%** d'huile tandis que celle de *M. oleifera* contiennent de **25 à 34%** d'huile. La différence d'efficacité peut venir de cette différence de composition [35].

d) Bactériologie : Le Moringa purifie-t-il l'eau ?

Les graines de *Moringa* sont souvent qualifiées de « purifiantes », ce qui laisse entendre qu'elles tuent les germes présents dans l'eau. Ce n'est pas le cas, en tout cas aux doses utilisées pour la flocculation.

L'intérêt des graines de *Moringa* est donc de constituer un floculant alternatif aux produits chimiques actuellement utilisés, mais pas de remplacer l'ensemble de la filière de traitement [35].

e) Intérêt du *M. oleifera* comme floculant :

Le *M. oleifera* montre une grande capacité d'adaptation aux différentes conditions environnementales ce qui lui confère une grande répartition spatiale. Le dosage optimum de poudre ne varie pas à plus de **10%** en fonction de l'origine des arbres. Des graines bien conservées gardent de bonnes propriétés (jusqu'à **5** ans) mais de réelles études sur le stockage n'ont jamais été effectuées [35].

L'intérêt d'utiliser le *Moringa* porte sur une diminution des coûts dus à la consommation d'alun et à une alternative face à sa toxicité [38].

f) Les avantages :

- ✓ Outre son utilisation comme coagulant, *Moringa oleifera* peut-être utilisée comme plante médicinale et comme aliment (huile, légume).
- ✓ N'affecte pas significativement le **pH**, la conductivité, l'alcalinité, la concentration des ions, sauf pour les nitrates et les ortho phosphatent qui voient leurs concentrations augmenter durant la réaction.
- ✓ Le volume de boues produites est moins grand qu'avec l'alun et ces boues ne sont pas toxiques, elles peuvent donc être valorisées facilement.
- ✓ Le coût d'utilisation est beaucoup plus bas que les traitements avec les sels chimiques. C'est donc une alternative envisageable tant pour les pays en voie de développement que pour les pays développés [38].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

g) Les inconvénients :

- ✓ l'extrait aqueux provenant des graines augmente considérablement la quantité de matière organique dans l'eau usée, ce qui cause des problèmes d'odeurs, de couleurs et de goût lorsque l'eau est stockée plus de **24 h**. Il est donc recommandé d'utiliser un extrait contenant la protéine active uniquement pour traiter une eau qui sera consommée.
- ✓ Le développement de la technologie doit se faire à grande échelle pour que le coût de l'extraction de la protéine active soit abordable.
- ✓ Les possibles effets néfastes ont été testés sur des colonies de *Salmonella* qui ne présentent aucune réaction mutagène avec **1000 mg/l** de *Moringaoleifera* et sur les rats sur lesquels des doses de **50 à 500 mg/kg** ne montrent aucune toxicité [35].

II.3.4.3. Le cactus :

Le cactus est le nom usuel des plantes de la famille des Cactaceae. On les appelle également cactées. Ce sont presque toutes des plantes grasses ou plantes succulentes, c'est-à-dire des plantes xérophytiques qui stockent dans leurs tissus des réserves de « suc » pour faire face aux longues périodes de sécheresse [39].

a) Appellation et origine :

Nopal, le nom mexicain de la plante, vient du mot Nochtli en nahuatl, langue classique des Aztèques, son appellation savante, vient du latin *Opuntia*. *Opuntia vulgaris* Miller et *Opuntia Ficus-indica* Miller sont les deux espèces les plus répandues sur terre, mais la plante peut porter un nom différent selon l'idiome local [39].

b) Description botanique de la plante :

Le Figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*), est une plante de la famille des Cactaceae. C'est une plante arborescente qui peut atteindre de **3 à 5 mètres de haut**. Elle est organisée en cladodes, de **30 à 40 cm** de long sur **15 à 25 cm** de large et de **1,5 à 3 cm** d'épaisseur. Elle est formée d'éléments charnus très épais, ovales et aplatis en forme de raquettes. Les épines proprement dites, blanchâtres, sclérifiées, solidement implantées, sont longues de **1 à 2 cm**. Ses fleurs jaunes en houppettes sur les fruits jeunes, tombent avant que ces derniers n'atteignent la maturité. Son fruit est gros, jaune, orangé ou rouge. Entouré de minuscules piquants mais succulent à l'intérieur [40]. La figure (II.1) présente les parties de la plante.

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

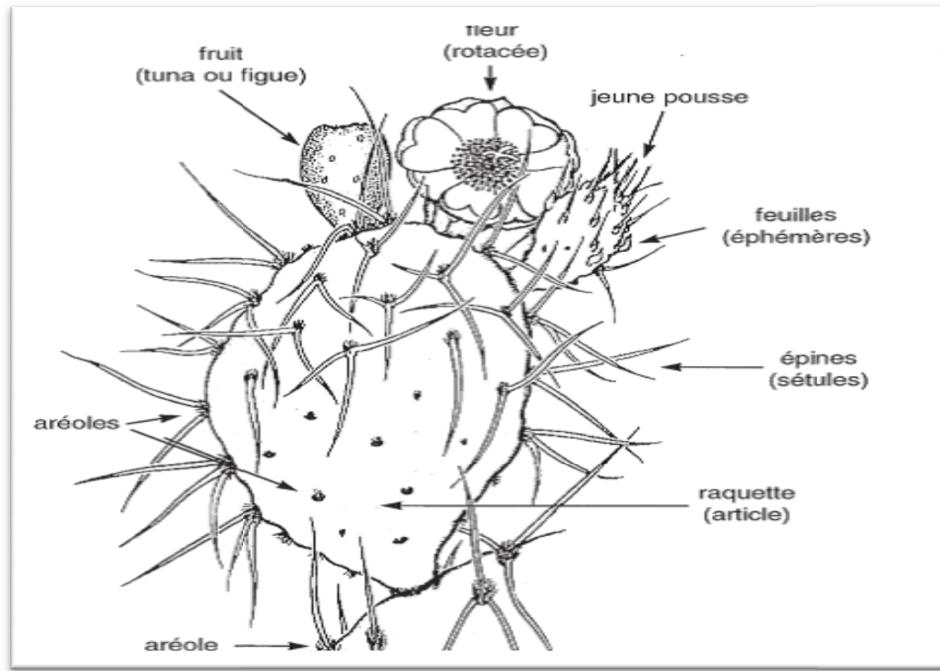


Figure II.1 : Les composantes de la plante [41].

c) Présentation de la plante :

- ✓ **Nom** : figuier de barbarie.
- ✓ **Nom scientifique** : *opuntia ficus indica*.
- ✓ **Nom berbère**: El hendi, sabara, karmoussnsarra.
- ✓ **Nom français** : figuier de barbarie, le nopal, figuier d'inde.
- ✓ **Nom anglais** : pricklypear [40].

d) Classification :

Le figuier de barbarie a été classé [42]:

- ✓ **Règne** : Plantae.
- ✓ **Embranchement** : Phanérogammes.
- ✓ **Classe** : Dicotylédones.
- ✓ **Sous-classe** : Dialypétales.
- ✓ **Ordre** : Caryophyllales.
- ✓ **Famille**: Cactaceae.
- ✓ **Genre**: Opuntia.
- ✓ **GenreEspèce** : *Opuntia ficus-indica*.

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

e) Domaine d'utilisation de la plante :

f. En pharmacie :

La recherche médicale étudie les molécules actives qui la composent et lui permettent de lutter efficacement contre Quelques-unes des affections les plus graves de notre temps: l'angoisse, l'artériosclérose, le cholestérol, le diabète, l'obésité, la spasmophilie, le stress [43].

g. En Cosmétique :

Les Indiennes préparent du savon et des onguents à base de mucilage d'*Opuntia ficus indica*. Elles préservent de la même manière leur visage agressé par le soleil [41].

f) L'importance du cactus dans le monde et sa situation au Maroc :

Le cactus est essentiellement développé sur la partie ouest de l'océan méditerranéen: sud d'Espagne et du Portugal, Sicile et Afrique du nord.

Il occupe des superficies importantes en Sicile avec plus de **300 000** ha et en Tunisie avec plus de **100 000** ha.

Il est depuis longtemps cultivé au Maroc pour ses fruits comestibles et son apport fourrager.

Sa superficie a évolué de façon remarquable au cours de ces deux dernières décennies à cause de la sécheresse, elle a passée de **50.000** ha en **1998** à plus de **120.000** ha actuellement.

La superficie élevée du cactus au cours de ces deux dernières décennies est due aux opérations de plantation abondantes qui sont menées par les agriculteurs et les établissements agricoles de développement et de vulgarisation et la direction des eaux et forêts [43].

g) L'adaptation du cactus à la sécheresse :

Du point de vue écologique, le cactus s'adapte à la sécheresse par la transformation des feuilles en épines et des stipules en glochides et ce afin de diminuer la surface foliaire des feuilles et de réduire l'évapotranspiration au niveau des feuilles.

Les tiges, qui sont des organes photosynthétiques transformées en raquettes, sont également couvertes d'une cuticule dure imperméable qui les protège de l'évapotranspiration.

Leurs stomates sont fermés le jour grâce au cycle particulier de photosynthétiques du cactus et autres plantes grasses. Ce qui diminue d'avantage l'évapotranspiration au niveau des tiges.

Les échanges avec l'atmosphère se font pendant la nuit et le **CO₂** qui est nécessaire au processus de photosynthèse qui va se dérouler normalement le jour, moment où l'énergie solaire est disponible, est pénétré la nuit.

Une autre manière d'adaptation du cactus à la sécheresse réside dans l'utilisation efficiente de l'eau par la plante et ce, en absorbant le maximum d'eau au moment de sa disponibilité et le stocker pour les périodes de son besoin [43].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

L'absorption de l'eau se fait par les racines superficielles de la plante et des racines primordiales qui sont émises au moment des pluies.

L'eau stockée dans les tissus peut maintenir la plante vivante pour une longue période sans qu'il y ait de l'eau disponible aux racines dans le sol [43].

h) Importance économique et écologique :

L'adaptation du figuier de Barbarie aux conditions désertiques et semi désertiques lui permet de constituer une culture à intérêt écologique et socio-économique indéniable.

✓ *Importance écologique :*

Le figuier de Barbarie est capable de produire de grandes quantités de biomasse végétale même dans les conditions extrêmes.

Avec une pluviosité comprise entre **150** et **400** mm/an et en l'absence de fertilisation, la variété inerme peut produire jusqu'à **100** tonnes de raquettes/ha/an.

Les *Opuntia*, en association avec d'autres espèces ligneuses ont été utilisés avec succès dans un programme de fixation des dunes en Somalie.

Les racines étendues de cette espèce sont en mesure d'exercer une action antiérosive efficace en stabilisant les surfaces en pente.

✓ *Importance économique :*

L'importance économique de ce végétal réside dans la production du fruit destiné à l'alimentation humaine, son usage fourrager pour l'alimentation animale et est générateur de revenus et d'emplois au profit des habitants [43].

i) L'utilisation de cactus dans le domaine d'épuration et de traitement des eaux :

Les bons résultats de coagulation par l'opuntia sont très probablement attribué à la présences de mucilage qui est un hydrate de carbone visqueux et complexe entreposé en cactus intérieur et garnitures extrêmes qui ont une grande capacité de conservation de l'eau. Des études ont établis que le mucilage dans l'opuntia de cactus contient des hydrates de carbone tels que le l'arabinose, d'galactose, la rhamnose, dyxlose et l'acide galacturonique [44].

Jingdong Zhang et al (2006) ont étudié la capacité du cactus d'agir comme un coagulant naturel, en utilisant une eau synthétique d'une turbidité de **100** NTU. Le traitement a permis d'obtenir une eau potable pour la ville de Marakaibo, une eau dont la turbidité finale est proche de **5** NTU.

Jingdong Zhang et al (2006) ont étudié l'effet coagulant du cactus dans le traitement des eaux prélevés d'une station de traitement d'eau usée située à Wuhan (chine), les résultats montrent une efficacité d'élimination de la turbidité de **98%**, il a été testé aussi pour traiter une eau usée, les résultats montrent que le cactus a pu diminuer la turbidité de **70** à **10.5** NTU [45].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

Au Maroc, des auteurs ont étudié utilisation de l'extrait de jus de cactus, dans un procédé physico-chimique (coagulation flocculation) afin de traiter des rejets liquides chargés en chrome, ce bio-floculant a permis de réduire la turbidité de l'effluent industriel de **100 NTU** à des valeurs au dessous de **2 NTU** [1].

Abid, et al **2009** avec d'autres auteurs ont étudié le traitement des rejets liquides chargées en cuivre, en zinc et en matière en suspension par l'ajout de différentes dose de jus de cactus et aussi pour tester l'efficacité de ce jus vis-à-vis des autres produits couramment utilisés dans le traitement des eaux usées. Le bio-floculant a montré un effet très significatif, le pourcentage d'abattement des métaux dépasse **95%** pour le cuivre et le zinc.

Chan-Yang Yin (Malaisie **2010**), a utilisé des coagulants à base de plantes pour le traitement de l'eau et des eaux usées, le cactus est l'un de ces coagulants. Les processus, l'efficacité et les mécanismes de coagulation pour le traitement de l'eau et des eaux usées ont été présentés, l'utilisation de ces coagulants représente un progrès important dans la technologie de l'environnement durable car ils sont des ressources renouvelables et leur application est directement liée à l'amélioration de la qualité de vie des communautés sous-développées [46].

S. Hadj-Kouider (Blida **2011**) a réalisé un conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration des eaux usées de Baraki. Le cactus a été utilisé, afin d'augmenter la siccité des boues déshydratées. Les résultats obtenus par le jus de cactus sont encourageants, puisqu'il diminue la turbidité de **96%** pour une eau filtrée de la boue de Baraki, et permet d'obtenir une siccité de **31%**, obtenue par centrifugation [44].

II.4. La toxicité des coagulants et floculants :

Aujourd'hui, la question de l'innocuité des coagulants-floculants émerge peu à peu comme une problématique réelle à la fois pour l'environnement et pour la santé.

L'usage des floculants est considéré aujourd'hui comme un enjeu environnemental important par les autorités en charge de la protection des espaces naturels et par les industriels utilisateurs de floculants, il n'existe aucune étude scientifique complète et multidisciplinaire qui puisse leur apporter des réponses quant aux risques liés à cet usage et à la dégradation de l'acrylamide et des polyacrylamides, pour leur permettre d conclure à un éventuel impact et de prendre éventuellement les mesures appropriées.

La présence d'acrylamide résiduel soit observée dans les installations utilisant des polyacrylamides, le seuil de détection de **0.1 µg/l** n'est pas atteint dans certaines eaux (chargées en matière organique notamment).

La plupart des analyses restant en deçà du seuil de détection, une valeur maximale de **0.1 µg/l** d'acrylamide résiduel a donc été imposée aux fournisseurs [47].

Chapitre II :

Les différents floculants, coagulant industriels et bio-floculants utilisables dans le traitement d'une eau colorée

D'une façon plus générale, la toxicité des substances contenues dans les coagulants et floculants peut être déterminée à partir de leur dose létale 50 (**DL₅₀**) qui est un indicateur quantitatif de toxicité.

Cet indicateur mesure la dose de substance provoquant la mort de 50% d'une population animale donnée (souvent des souris ou des rats) dans des conditions expérimentales précises.

Autrement dit, c'est la masse de substance nécessaire pour tuer 50% des animaux dans un lot donné. Elle s'exprime en milligramme de matières actives par kilogramme d'animal. Plus ce chiffre est petit, plus la substance est toxique [47].

II.5. Conclusion :

Les avantages d'un traitement avec le jus de cactus sont nombreux, et un tel floculant peut être utilisé sans problème pour le traitement des eaux usées chargées en matières minérales, en matières minérales, en matière en suspension et en colorants textile.

De plus, ce procédé devient rentable et entre dans le développement durable dans des régions où le cactus est cultivé à grande échelle.

Parmi les avantages, pas de modification des propriétés physico-chimique de l'échantillon traité en produisant une biodégradable exempte de fer, d'aluminium et des polymères chimiques et pas d'effets toxiques sur la santé humaine.

Les enjeux de qualité liés à l'application très sensible qu'est le traitement des eaux impose une constante recherche de nouveaux produits tels que des polymères plus facilement biodégradables et des polymères naturels.

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.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, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres.

En traitement des eaux, la coagulation et la flocculation sont des traitements qui visent à optimiser l'élimination des particules en suspension par les procédés de décantation et de filtration [48].

III.2. Coagulation/flocculation :

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 flocculation 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.

La coagulation-flocculation facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de flocs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration [49].

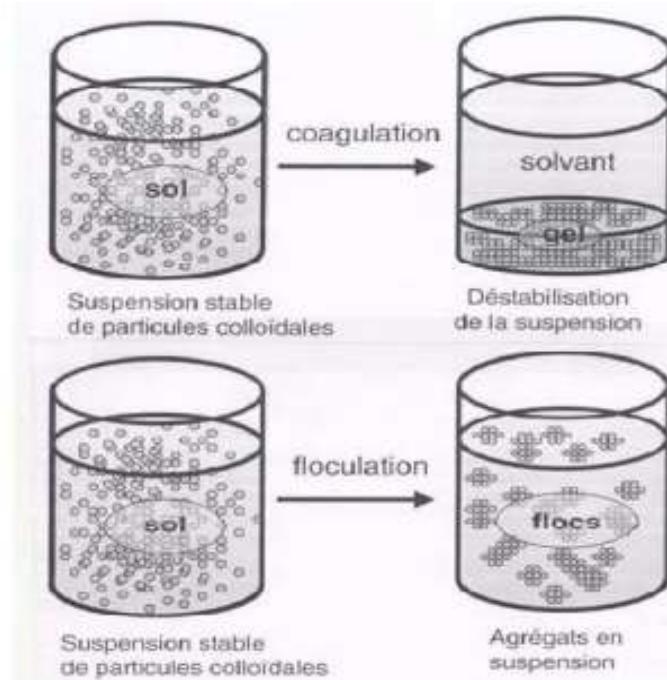


Figure III.1: Coagulation/flocculation [49].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.3. Les particules mises en jeu : Les colloïdes :

III.3.1. Généralités :

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 $1\mu\text{m}$ et 1nm . 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 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 de décantation [50].

III.3.2. Les particules colloïdales :

Les particules colloïdales sont caractérisées par deux points essentiels : d'une part, elles ont un diamètre très faible (de $1\mu\text{m}$ à 1nm) d'autre part, elles ont la particularité d'être chargées électro négativement, engendrant des forces de répulsions inter colloïdales.

Ces deux points confèrent aux colloïdes une vitesse de sédimentation extrêmement faible (que l'on peut même considérer comme nulle dans le cadre du traitement de l'eau).

La coagulation flocculation est un procédé permettant, en deux temps, de s'affranchir de cette absence de sédimentation. Cette technique permet de s'attaquer aux deux caractéristiques - mentionnées précédemment – rendant impossible une élimination naturelle des particules colloïdales [50].

III.3.3. Les types des colloïdes :

Les macromolécules organiques (protéine, sucres) constituent les particules hydrophiles.

Elles présentent des groupements électronégatifs de type **R-NH₂**, **R-OH**, **R-COOH**.

Ces radicaux créent des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau .Ces liaisons sont essentiellement de nature électrostatique entre les atomes d'hydrogène de charge positive partielle des molécules d'eau et les éléments électronégatifs (**N**, **O**) portant une charge négative due au doublet d'électrons libres [51].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

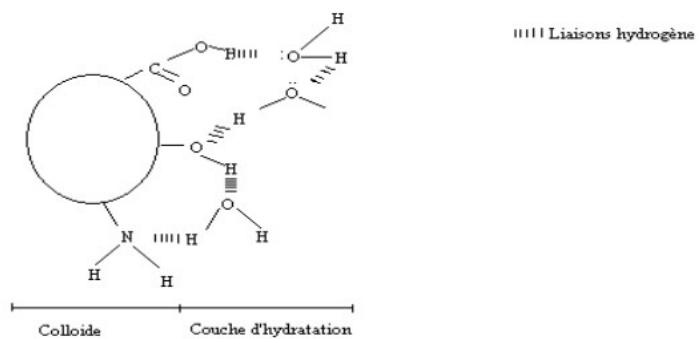


Figure III.2: Représentation du colloïde hydrophile [51].

III.3.4. Structure des colloïdes :

Dans une eau de surface, les colloïdes portent des charges négatives situées à leur surface. Ces charges négatives attirent les ions positifs en solution dans l'eau.

Ceux-ci sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée ou de **STERN**, qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations : c'est la couche diffuse ou de **GOUY**. Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'un accompagnant la particule lors de ces déplacements, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard [51].

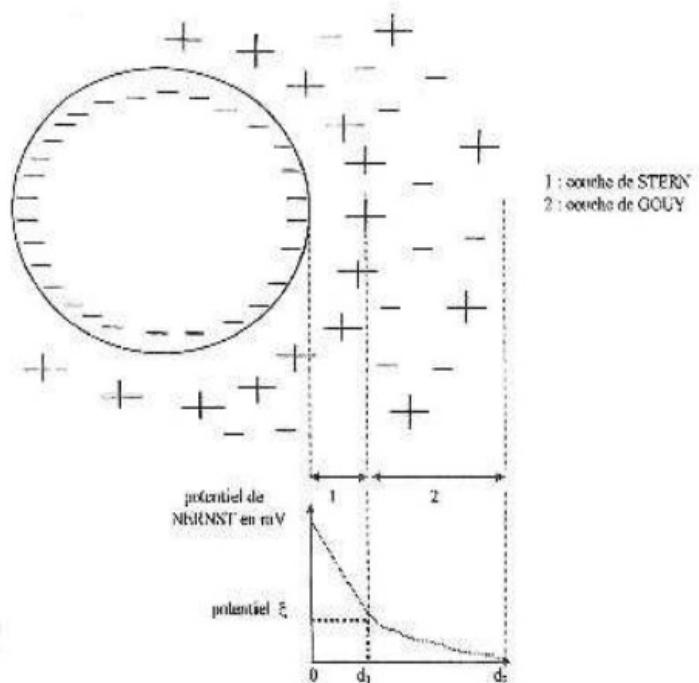


Figure III.3: Distribution ionique autour d'un colloïde [51].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

Il existe entre ces deux couches un potentiel électrostatique ou de NERNST, qui varie en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde [51].

III.4. But de la coagulation – flocculation:

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 de produits chimiques.

La flocculation a pour but de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on pourra facilement éliminer par décantation.

Donc, L'opération de coagulation-flocculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de flocs par absorption et agrégation [50]. Les flocs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite (**Voir fig III.4**).

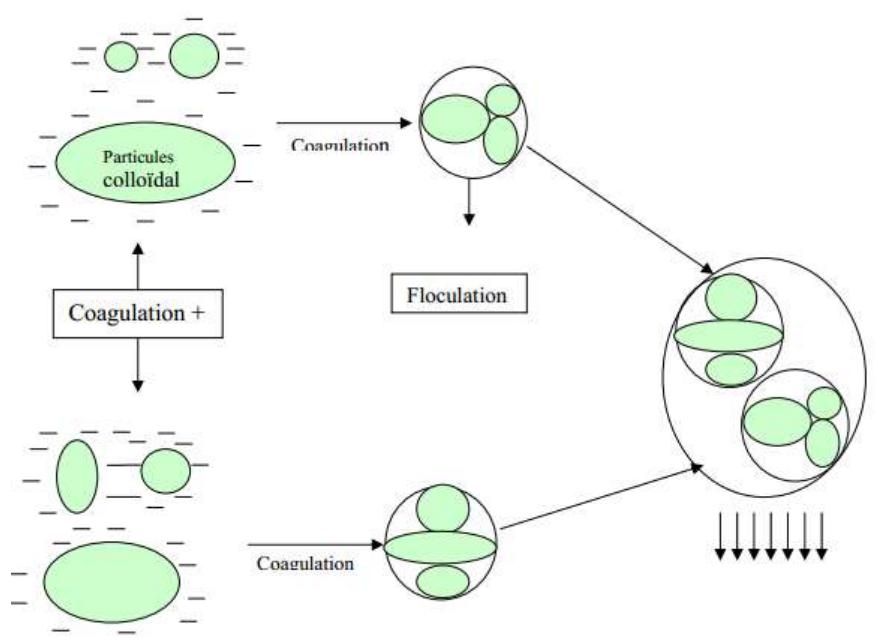


Figure III.4: Coagulation – Flocculation [50].

III.5. Phénomène de la coagulation:

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les une des autres et par conséquence, à les stabiliser dans la solution.

On peut obtenir cette déstabilisation par:

- compression de la double couche;
- adsorption et neutralisation des charges;
- emprisonnement des particules dans un précipité;
- adsorption et pontage [52];

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.5.1. Compression du double couche:

Lorsqu'on rapproche deux particules colloïdales semblables, leurs couches diffuses interagissent et génèrent une force de répulsion.

La figure illustre la variation du potentiel de répulsion **Er**, en fonction de la distance qui sépare deux particules.

Il existe par ailleurs un potentiel d'attraction, ou force d'attraction **Ea**, entre les particules.

Ces forces, appelées force de **Van der Waals**, dépend des atomes qui constituent les particules et de la densité de ces dernières.

Contrairement aux forces de répulsion, les forces de **Van der Waals** ne sont pas affectées par les caractéristiques de la solution.

L'effet global, entre deux particules est représenté par la résultante de ces deux forces **E**, lorsque la distance qui sépare les particules est supérieure à une certaine distance critique **L** [52]. (Voir fig. III.5)

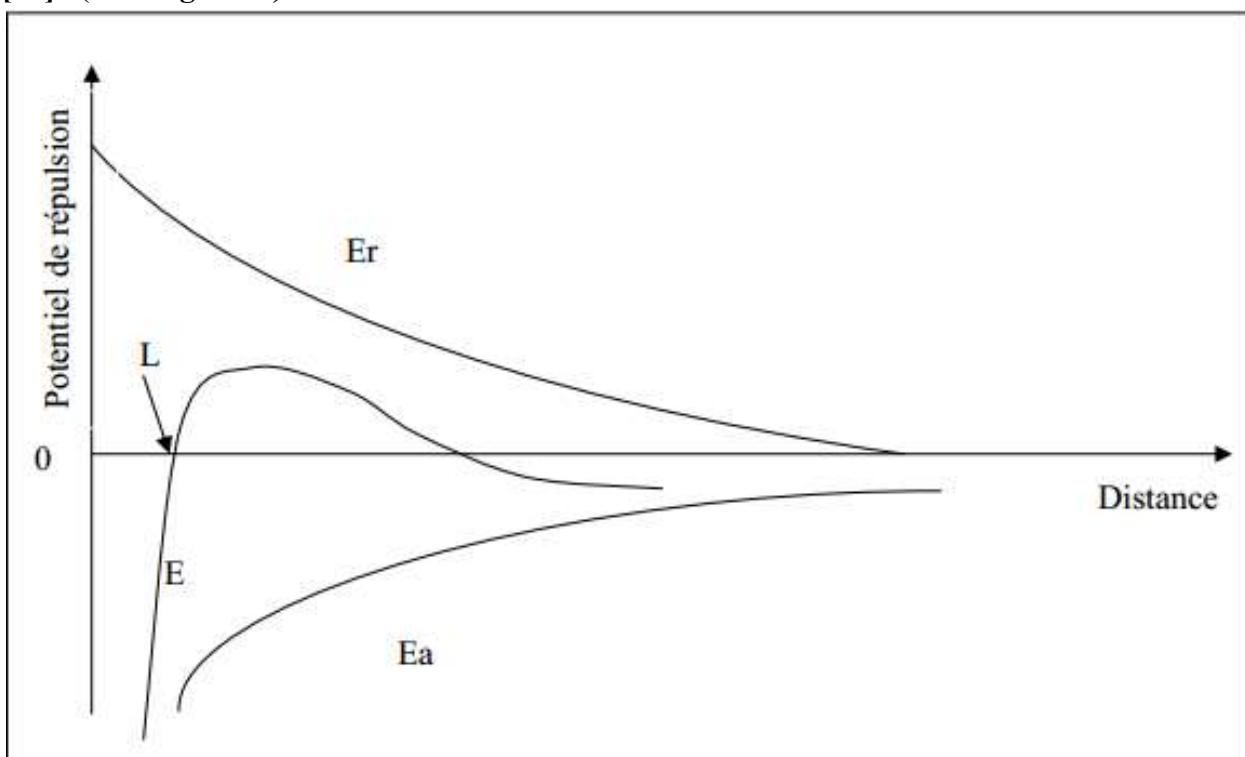


Figure III.5: Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules [52].

Pour réduire le potentiel de répulsion entre les particules, on peut augmenter la force ionique de la solution.

Chapitre III : La coagulation-flocculation

Dans la zone située près de la particule, les forces de **Van der Waals** sont alors assez importantes pour neutraliser la force de répulsion (**Voir fig.III.6**).

Toutefois, la théorie de la compression de la double couche n'explique pas à elle seule tous les phénomènes observés lors de la déstabilisation des particules lorsqu'on augmente la quantité de coagulant, phénomène qu'on ne peut pas expliquer à l'aide de la théorie de la compression de la couche double [52].

III.5.2. Adsorption et neutralisation des charges:

On peut tout fois expliquer la rentabilisation des particules colloïdales en posant l'hypothèse que des charges issues d'un surplus de coagulant sont adsorbées à la surface des particules.

Les particules colloïdales ainsi rentabilisées possèdent alors une charge inversée, ce qui est contraire au but recherché.

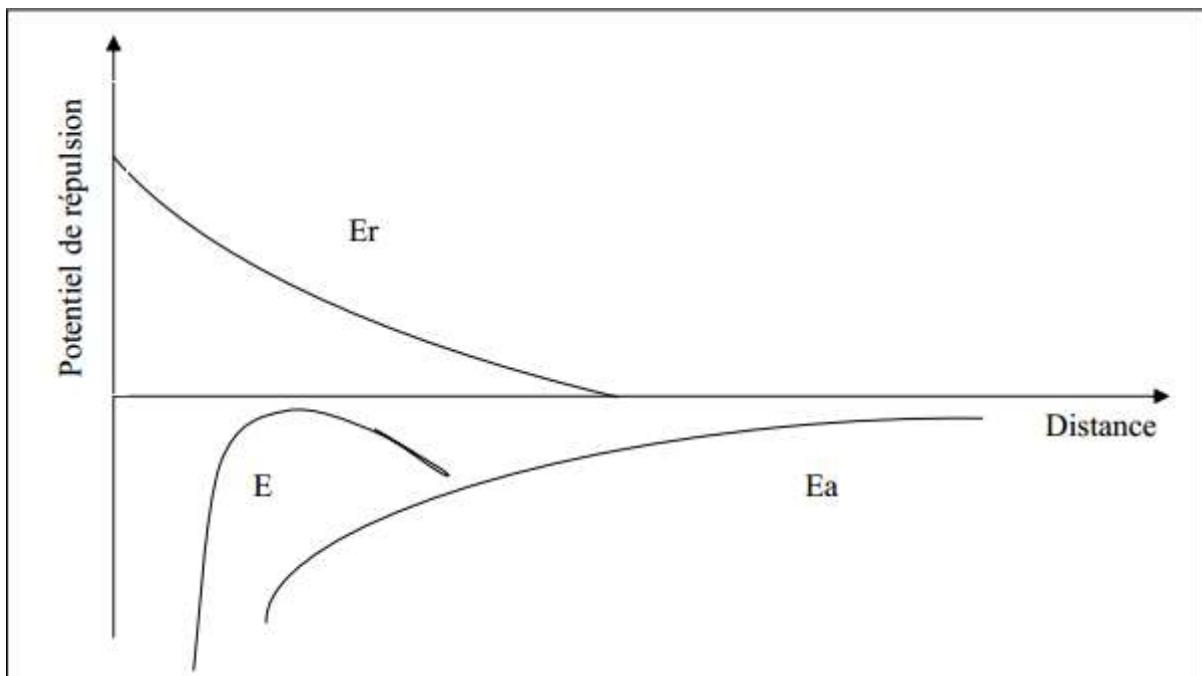


Figure III.6: Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules, après compression du double couche [52].

III.5.3. Emprisonnement des particules dans un précipité:

Pour déstabiliser les particules colloïdales, on peut en outre les emprisonner dans une particule floc lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des coagulants, habituellement des sels de métaux trivalents, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou FeCl_3 , on obtient un précipité appelé floc.

Lorsque le **pH** de l'eau est situé dans une plage acide ou neutre, le floc, constitué de molécules de $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, possède habituellement une charge positive [53].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.5.4. Adsorption et pontage:

Dans quelques cas, on a obtenu le traitement le plus économique en utilisant un polymère anionique lorsque les particules étaient chargées négativement.

Ce phénomène, inexplicable à l'aide de la théorie électrique, peut toutefois être expliquée par le "pontage". On dit alors que les molécules polymères forment des "ponts" entre les particules colloïdales.

Il peut y avoir déstabilisation de la suspension, imputable à une concentration excessive de polymères s'accrochent à une même particule colloïdale [53].

III.5.5. Facteurs influençant la coagulation:

Il faut tenir compte de plusieurs variables en interrelations, comme:

III.5.5.1. Influence du pH:

Le **pH** est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. Pour chaque eau, il existe une plage de **pH** pour laquelle la coagulation a lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter [50].

III.5.5.2. Influence des sels dissous:

Les sels contenus dans une eau exercent les influences suivantes sur la coagulation et la flocculation :

- a) modification de la plage de **pH** optimale;
- b) modification du temps requis pour la flocculation;
- c) modification de la quantité de coagulant requis;
- d) modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

A partir d'observations expérimentales, on peut par ailleurs affirmer que :

- ✓ La coagulation à l'aide de sels d'aluminium ou de fer est davantage affectée par les anions que par les cations. Ainsi, les ions sodium, calcium et magnésium exercent une influence minime sur la coagulation;
- ✓ Les anions élargissent vers l'acidité la plage de **pH** optimale. Cette influence est d'autant plus marquée que la valence des anions est élevée [53].

III.5.5.3. Influence de la température de l'eau:

On dispose de peu d'informations en ce qui concerne l'influence de la température de l'eau sur la coagulation. Toutefois, l'expérience révèle que durant l'hiver, lorsque la température de l'eau avoisine **0°C**, le floc se décante plus difficilement et a tendance à pénétrer plus profondément dans les filtres [53].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.5.5.4. Influence du coagulant:

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation .Ainsi, même si l'alun est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de la remplacer par du sulfate ferrique.

Ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de **pH** optimale plus large que celle due à l'alun.

De plus, pour un même **pH** élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que l'alun. On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale, pour une eau donnée, qu'après avoir effectué des essais en laboratoire [53].

III.5.5.5. Influence du mélange:

Au cours de la coagulation et de la flocculation, on procède au mélange des produits chimiques en deux étapes:

- ✓ A la première étape, le mélange est énergique et de courte durée (**120s** au maximum) : c'est le mélange rapide. Ce mélange a pour but principal de disperser les produits dans la totalité du volume d'eau à traiter.
- ✓ A la deuxième étape, le mélange est lent et il a pour but de favoriser les contacts entre les particules de floc, de turbidité et de couleur. Cependant, le mélange doit être suffisamment énergique pour engendrer des différences de vitesse de l'eau dans le bassin. La durée du mélange dans un bassin de flocculation peut n'être que de **10 min** (elle varie en général de **30 à 60min**) [53].

III.5.5.6. Influence De la turbidité:

La turbidité des eaux de surface en grande partie due à la présence de particules de glaise dont le diamètre varié de **0,2 à 0,5µm**. Il s'agit donc de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer naturellement.

On peut faire par ailleurs les constations générales suivantes:

- a) Il faut ajouter une concentration minimale de coagulant pour obtenir une certaine quantité de floc.
- b) Lorsque la turbidité augmente, il faut augmenter la concentration de coagulant.
- c) 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.
- d) La matière organique adsorbée sur les particules de glaise n'exerce aucune influence sur la quantité de coagulant nécessaire.
- e) Lorsque la turbidité est due à des particules de diamètres varies, il est plus facile d'effectuer la coagulation que lorsqu'elle est imputable à des particules de diamètre sensiblement égaux.
- f) La coagulation d'une faible concentration de particules de glaise dépend principalement du coagulant et de la composition chimique de l'eau [53].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

- g) Il est toujours plus difficile de coaguler les eaux contaminées par des eaux d'égout domestiques et industrielles, car elles exigent des concentrations de coagulant plus importantes que les eaux non contaminées [53].

III.5.5.7. Coagulation de la couleur:

En général, la couleur d'une eau est due à la décomposition de matières organiques contenues dans l'humus des sols.

Des études ont révélé que **90%** des particules responsables de la couleur avaient un diamètre supérieur à **3.5 nm** ; ces particules sont donc des particules colloïdal-les beaucoup plus petites que les particules de glaise responsable de la turbidité.

La plus part des particules responsables de la couleur possèdent des charge négatives à leur surface, dont l'intensité dépend du degré d'ionisation et du **pH** de l'eau.

En résumé, on peut dire que les particules responsables de la couleur sont de natures organiques, hydrophiles, petites et chargées négativement.

Le **pH** optimal pour l'élimination de la couleur varie entre **4** et **6**, alors que le **pH** optimal pour celle de la turbidité varie entre **6,5** et **7,5** [52].

III.6. Phénomène de la flocculation:

III.6.1. Théorie de la flocculation:

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres, c'est la flocculation [51].

III. 6.1.1. Flocculation péri cinétique:

En cas de flocculation péri cinétique, **Fp**, les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celles-ci, dit mouvement brownien.

On peut exprimer le taux de variation de concentration des particules à l'équation (III.1) suivante [51]:

$$Fp = \frac{dN}{dt} = -\frac{4\Gamma k\theta(N)^2}{3\eta}$$

Où

K: constante de boltzmann (**1.38 x 10⁻²³ J. K⁻¹**).

Θ: température absolue (K).

η : viscosité dynamique de l'eau (Pa. s).

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.6.1.2. Floculation ortho cinétique:

On appelle flocculation ortho cinétique, F_0 , la flocculation provoquée par l'agitation de l'eau. L'agitation facilite l'agrégation en augmentant la probabilité des collisions entre les particules. La vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps [51].

III.6.2. Nature des flocculant:

Les flocculant sont des composés agissant par pontage. Il s'agit de polymères à haut poids moléculaire présentant des groupes réactionnels de charge inverse de celle de la suspension à traiter.

On distingue des flocculant naturels et synthétiques. Les polymères synthétiques se répertorient en poly anions, poly cations, non ioniques et amphotères [51].

III.6.3. Processus de la flocculation:

Les poly anioniques agissent par pontage en association avec les cations bivalents du milieu tels que les ions Ca^{+2} et Mg^{+2} . Dans ce cas, le titre hydrotimétrique de l'eau est essentiel.

On ne l'ajoute qu'en fin de flocculation lorsque les micro-flocs sont formés. Les poly cationique agissent directement par leur charge positive.

On considère que l'adsorption de la chaîne de polymère sur la surface du colloïde est solide quand au moins **50%** de cette surface est occupée par **70%** de la longueur des molécules de flocculant. Les **30%** restants forment des boucles et des queues qui réalisent le pontage inter colloïdes [53].

III.7. Technologie de la coagulation –flocculation:

III.7.1. Stratégie:

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 différent de celle de la flocculation.

On distingue les deux phases suivantes :

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

Dans un premier temps, un mélange rapide est nécessaire pour disposer 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 des mélange mécanique avec des pales ou hélices.

La deuxième phase favorise les contacts entre les particules de floc sans les léser.

Le mélange doit être néanmoins assez énergétique pour engendrer des différentes de vitesse dans le bassin nécessaire aux rencontres des particules [54].

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.7.2. Choix du coagulant:

Les critères de choix d'un coagulant sont nombreux. Son efficacité à réduire la couleur, la turbidité et les matières organiques d'une eau est essentielle.

On ne peut, néanmoins, négliger son pris et les effets secondaires comme les fuites en Fe^{3+} et Al^{3+} . Il faut savoir que le chlorure ferrique contient du manganèse sous forme de Mn^{2+} à raison de **0,057 g pour 100 g** de coagulant.

Le traitement d'eau chargée en matières organiques exige du chlorure ferrique. Les coagulants à base de sels d'aluminium permettent d'obtenir une eau traitée très faible en turbidité.

La vérification de la dose de coagulant à mettre en œuvre passe par le **JAR-TEST**.

En analyse continue, la quantité de matières organiques déterminée à **254 nm**, permet d'obtenir le taux optimum de traitement du coagulant.

Le tableau (III.1) présente les caractéristiques de quelques coagulants (Voir l'annexe 7).

Les sels d'aluminium sont très largement utilisés dans le domaine de l'eau potable [54].

Les sels de fer sont plutôt destinés aux eaux résiduaires et en particulier pour l'élimination physico-chimique du phosphore. Le chlorure ferrique a sa place dans les filières de traitement des boues hydroxydes ou organiques [54].

III.8. Le jar test:

Le jar test consiste en une rangée de bêchers alignés sous un appareillage permettant de tous les agiter à la même vitesse. Les différents bêchers ont reçu une dose différente de réactifs et à la fin de l'expérimentation, on détermine quels sont les couples quantités de réactifs/vitesse et temps d'agitation qui permettent d'obtenir l'eau la plus limpide, les flocs les plus gros et les mieux décantés. Concernant les vitesses d'agitation, la seule certitude nécessite une vitesse d'agitation plutôt rapide (afin de bien mélanger l'eau et que les colloïdes et les cations métalliques se rencontrent et se neutralisent) et que la flocculation- quant à elle- nécessite une vitesse relativement lente (afin de favoriser la rencontre et l'agrégation des colloïdes mais sans détruire les flocs déjà formés) [6].



Figure III.7: Photo de jar test.

Chapitre III : La coagulation-flocculation

III.9. Conclusion:

Le processus de coagulation-flocculation permet d'éliminer une grande charge de la matière organique, de la matière en suspension et a un bon rendement en décoloration. Il est adopté, le plus souvent, avant le traitement biologique. Cette technique est moins coûteuse et facile à appliquer et exige peu d'espace. Elle est certes avantageuse, même pour les infrastructures des petites unités industrielles.

Au cours des **20** dernières années, de nouveaux coagulants, inorganiques, ont été employés afin d'essayer d'améliorer l'élimination de la matière organique et les matières en suspension. Pour le traitement des eaux usées urbaines et industriels, l'optimisation de la coagulation nécessite le dosage du coagulant et du **pH** afin d'assurer l'atteinte de meilleurs objectifs.

Chapitre IV: ***Etude expérimentale***

IV.1. Introduction:

Les méthodes conventionnelles, généralement utilisées pour l'élimination des colorants des eaux polluées industrielles, sont principalement les traitements biologiques et physicochimiques ainsi que leurs diverses combinaisons.

L'objectif de notre étude expérimentale porte sur l'efficacité de l'élimination d'un colorant (bleu de cibacette) par la méthode classique de coagulation flocculation basée sur les essais de jar-test qui consiste à ajouter des floculants industriels et un bio-floculant. Les floculants industriels utilisés sont le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique et la chaux vive. Le bio-floculant est extrait du cactus algérien, il a été utilisé en combinaison avec les floculants industriels pour diminuer les produits chimiques.

IV.2. Matériels et produits utilisés:

IV.2.1. Dispositif expérimental:

Les essais de coagulation-flocculation ont été réalisés dans un jar-test de type **PWT**, Supplied by Armfield, composé d'une série d'agitation à palettes, au nombre de quatre (4) montés sur un banc lumineux, la vitesse des palettes est réglable et identique d'un agitateur à l'autre. Des bêchers de **1000 ml** servent de cuves.

✓ ***Vergeries:***

Bêchers, pipettes, erlenmeyers, pipettes jaugées, boites de petri, capsules, tamis, seringue, pissette, spatules.

✓ ***Appareils:***

- Agitateur magnétique **IKAMAG**.
- Jar test de type **PWT**, supplied by Armfield.
- pH-mètre **HANA INSTRUMENTS**, modèle **CDRV 62**.
- Etuve de marque **Heraeus INSTRUMENTS**, modèle **B-6120**.
- Balance électronique de marque **Sartorius** portable.
- Spectrophotomètre **UV/VISIBLE (SEQUOIA-TURNER)** modèle **340**.
- Centrifugeuse type **HETTICH ZENTRIFUGER EBA 3S**.

Chapitre IV: ***Etude expérimentale***

IV.2.2. Produits utilisées:

Le tableau IV.1 rassemble les réactifs utilisés au cours des essais expérimentaux:

<i>Produits</i>	<i>Formules</i>	<i>Utilisations</i>
Sels d'aluminium	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Coagulant
Chlorure ferrique	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Coagulant
La chaux	CaO	Coagulant+ajustement du pH
Jus de cactus	-	Bio-floculant
Poudre de cactus	-	Bio-floculant
Acide chlorhydrique	HCl	Ajustement du pH

IV.2.3. Effluent synthétique:

Il a été préparé au laboratoire par dissolution dans l'eau distillée le colorant employé.

Le colorant utilisé, nous a été gracieusement fourni par l'entreprise des textiles **SOTRADAL** de **BOUFARIK**, il a les caractéristiques suivantes:

- ✓ **Nom chimique:** 1-methylamino-4-ethanolamino anthraquinone.
- ✓ **Nom commercial:** Bleu cibacète (BC).
- ✓ **Classe:** colorant anthraquinone.
- ✓ **Formule chimique:** $\text{C}_{17}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_3$.
- ✓ **PM:** 296.325 g/mol.
- ✓ **Ionisation:** basique.
- ✓ **Point de fusion:** 332°C.
- ✓ **Solubilité:** soluble dans l'eau, acétone, éthanol, benzène, alcool.
- ✓ **Couleur:** bleu.
- ✓ **Stabilité:** ce produit est instable dans les conditions suivantes: lorsqu'il est chauffé, le produit émet des fumées toxiques.
- ✓ **Application:** le BC est employé comme colorant de tissu pour le nylon, cellulose, acétate et polyester.

Remarque:

Toutes les photographie des appareils et des produits chimiques sont présentées dans l'annexe 8.

Chapitre IV: Etude expérimentale

IV.3. Protocole expérimental:

IV.3.1. Préparation de la solution synthétique:

La solution synthétique a été préparée en dissolvant **50 mg** dans un **1L** d'eau distillée d'un colorant de bleu de cibacète (**BC**) dans l'eau distillée (Voir fig. IV.1).



Fig.IV.1:solution synthétique.

IV.3.2. Préparation de la solution de coagulants et floculant chimiques et naturels:

Au cours de nos essais, nous avons préparé des concentrations différentes de coagulants/floculants chimiques comme: le sulfate d'aluminium **Al₂(SO₄)₃, 18H₂O**, Chlorure ferrique **FeCl₃, 6H₂O** et la chaux **CaO** et nous avons utilisé aussi un bio-floculant qu'est le cactus sous deux formes (jus et poudre) à partir de **10 mg/l** jusqu'à **500 mg/l** qui sont ajoutées à la solution colorée initiale avec deux solutions mère de coagulants **C₀=1g/l** et **C₀=10 g/l**, préparées périodiquement.

Dans la préparation de jus de cactus, Nous obtenons les raquettes d'*Opuntia ficus-indica* (cactus) qui ont été récoltées dans le centre de Baheli, Commune de Soumaa, Daïra de Boufarik, Wilaya de Blida, durant le mois de Mars 2015 (Voir fig. IV.2).



Figure IV.2: Cactus de centre de Baheli.

Les feuilles de plantes utilisées dans le traitement des eaux usées ont été découpées et broyées après nettoyage (1,2 et 3) à l'aide d'un mixeur électrique à lames pour obtenir une solution verte et visqueuse.

Chapitre IV: Etude expérimentale

Ensuite, l'extrait aqueux de plante est filtré sur un tamis de diamètre **0.5 mm** (4 ; 5). Le jus de cactus obtenu est relativement stable. Il peut conserver sa capacité flocculante en dehors de tout système de conservation pendant plusieurs jours.

Ce produit est un liquide visqueux de coloration verte, de **pH =4.76**. Il a été dilué à **10%** dans l'eau distillée (6), puis homogénéisé par une agitation rapide pendant **15** minutes. Voir la figure (IV.3) qui présente les étapes de préparation de jus de cactus dilué.

La détermination des différentes propriétés et caractéristiques physico-chimiques du jus dilué est donnée par le Tableau (IV.2):



Figure IV.3: Les étapes de préparation de jus de cactus.

Tableau IV.2: Propriétés physico-chimiques du jus utilisé [44].

Paramètres	pH	MS (g/L)	MO (g/L)	MM (g/L)
Valeurs	4.87	4	3.2	0.8

D'autre part, nous avons préparé une poudre de cactus, on met une quantité de jus de cactus dans des boites de petri (1). Ensuite, on les introduit dans une étuve à une température de **60 °C** pendant **3** jours(2). Après séchage, nous avons obtenu une croute, qui a été broyé(3) et tamisé à laide d'un tamis de diamètre **0.5 mm**(4). La matière solide obtenue a été ensuite utilisé comme coagulant brut à une concentration initiale $C_0=1\text{g/l}$ et $C_0=10\text{ g/l}$ pour le traitement des eaux colorées. Les étapes de préparation de poudre de cactus sont présentées dans la figure suivante (IV.4):

Chapitre IV: Etude expérimentale

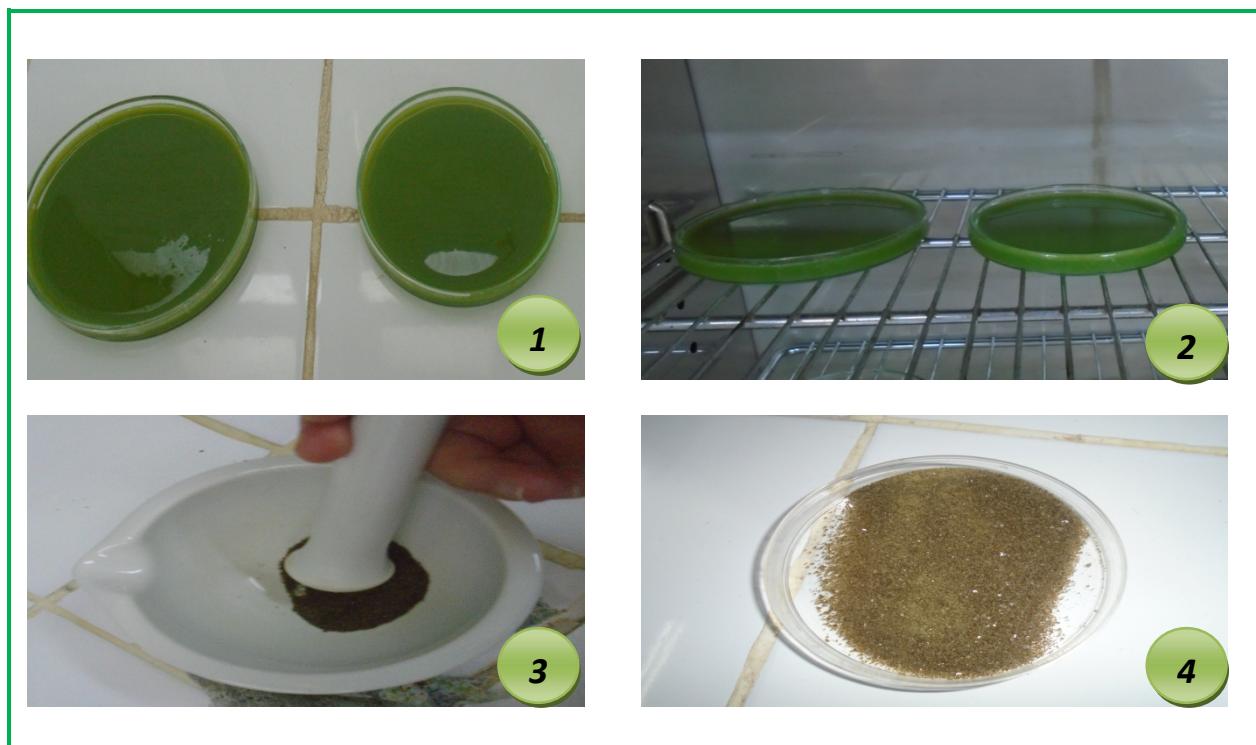


Figure IV.4: Les étapes de préparation de poudre de cactus.

Pour l'ajustement de **pH**, on utilise deux produits chimiques:

- ✓ Le premier produit c'est l'Acide chlorhydrique **HCl (1N)** qui permet de diminuer le **pH** de la solution synthétique pour un milieu acide.
- ✓ Le deuxième produit c'est la chaux **CaO (1N)** qui permet d'augmenter le **pH** des solutions pour un milieu basique.

IV.3.3. La méthode de coagulation-flocculation:

Le matériel d'essai est constitué par un jar-test de type **PWT**, supplied by Armfield à 4 agitateurs avec une vitesse de rotation individuelle variant entre **0** et **180** tr /min (**voir fig. IV.5**). Cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu (solution synthétique + coagulant) dans une série de bêchers remplis chacun de **500** ml de la solution synthétique.

Les conditions d'agitation que nous avons adoptées sont:

- **2** minutes d'agitation rapide avec une vitesse égale à **180** tours /min (**1**).
- **30** minutes d'agitation lente avec une vitesse égale à **40** tours / min (**1**).
- **120** minutes de décantation (**2**).

Après une décantation de **2** heures, nous avons prélevé un échantillon de **100** ml à l'aide d'une seringue que l'on introduit dans un erlenmeyer (**3**), enfin un volume de **30** ml a été introduit dans les tubes de la centrifugeuse (**4**).

Chapitre IV: Etude expérimentale

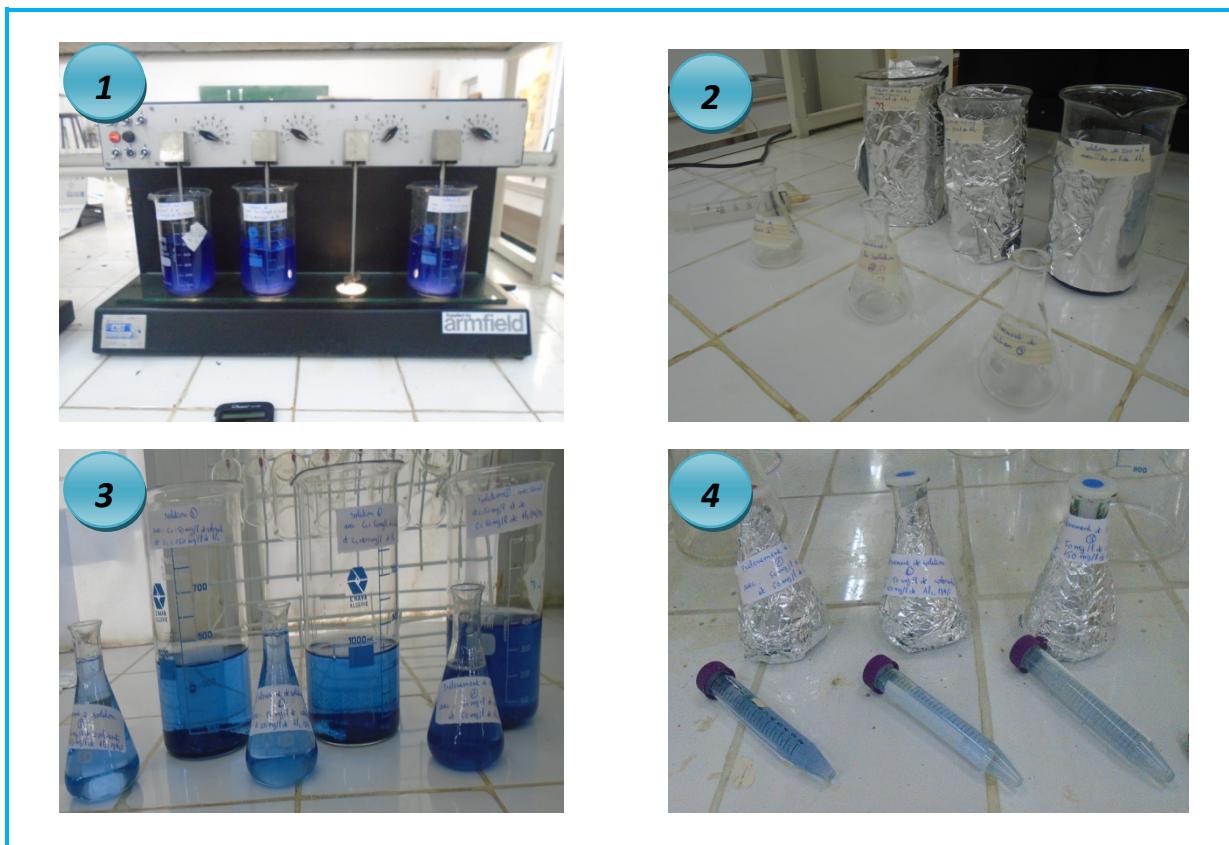


Figure IV.5: Protocol expérimental.

IV.3.4. Technique d'analyse:

Pour bien montrer l'efficacité de la coagulation-flocculation, nous avons procédé à différentes analyses, au sein du laboratoire de traitement des eaux du département de Sciences de l'Eau et de l'Environnement:

a) Mesure de pH:

Les coagulants modifient le **pH** initial de la solution, pour cela, il a été nécessaire de les mesurer avant et après traitement pour voir réellement l'effet de la coagulation-flocculation sur ce paramètre. Les mesures sont effectuées immédiatement sur les échantillons prélevés, à l'aide d'un pH-mètre type **HANNA Ph209**.

b) Mesure de l'absorbance:

L'absorbance mesure la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse (densité optique), elle est effectuée par spectromètre visible de type **SEQUOIA-TURNER** modèle **340**, de longueur d'onde variant entre **420nm-890nm**.

Nous avons mesuré l'absorbance de la solution colorée avant et après chaque traitement pour avoir l'efficacité du coagulation-flocculation.

Chapitre IV: Etude expérimentale

IV.3.5. Expression des résultats:

✓ Rendement de l'absorbance du procédé:

L'efficacité du procédé de coagulation-flocculation est déterminée en calculant le taux de réduction **R(%)** en utilisant la relation suivante:

$$R(%) = ((Abs_0 - Abs_f) / Abs_0) * 100$$

Avec:

R(%) : le taux de réduction en (%).

Abs₀ : l'absorbance de la solution avant traitement.

Abs_f : l'absorbance de la solution après traitement.

IV.4. Résultats expérimentaux et interprétation:

a) Détermination de λ_{max} du colorant BC:

On réalise un balayage dans le domaine de visible (UV) pour déterminer l'absorbance maximale (λ_{max}) de la solution colorée de BC de concentration **C=50mg/l**. Les résultats du balayage donne une absorbance maximale à $\lambda_{max}=620$ nm, présentés dans la Figure IV.6 (annexe 1 tableau (IV.1)).

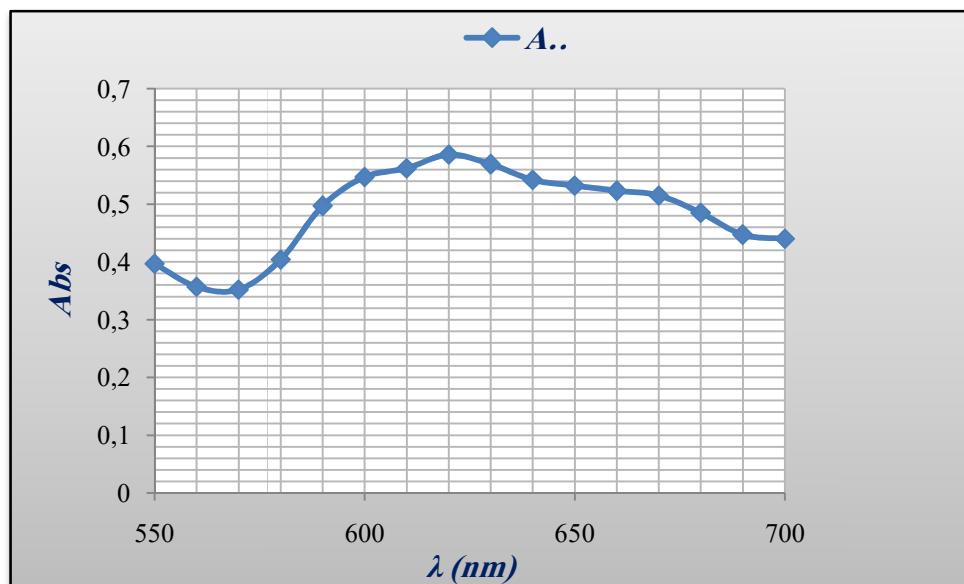


Figure IV.6: La courbe d'absorbance du BC.

Chapitre IV: Etude expérimentale

b) Le cas de coagulant d'Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O :

✓ Le rendement et la variation de pH :

Le coagulant utilisé dans ce cas est d'Al₂(SO₄)₃, 18H₂O. Les concentrations du coagulant varie de 10,20,40,50,80,100,150,200,250,300,350,400,450,500,550,600 à 650 mg/l.

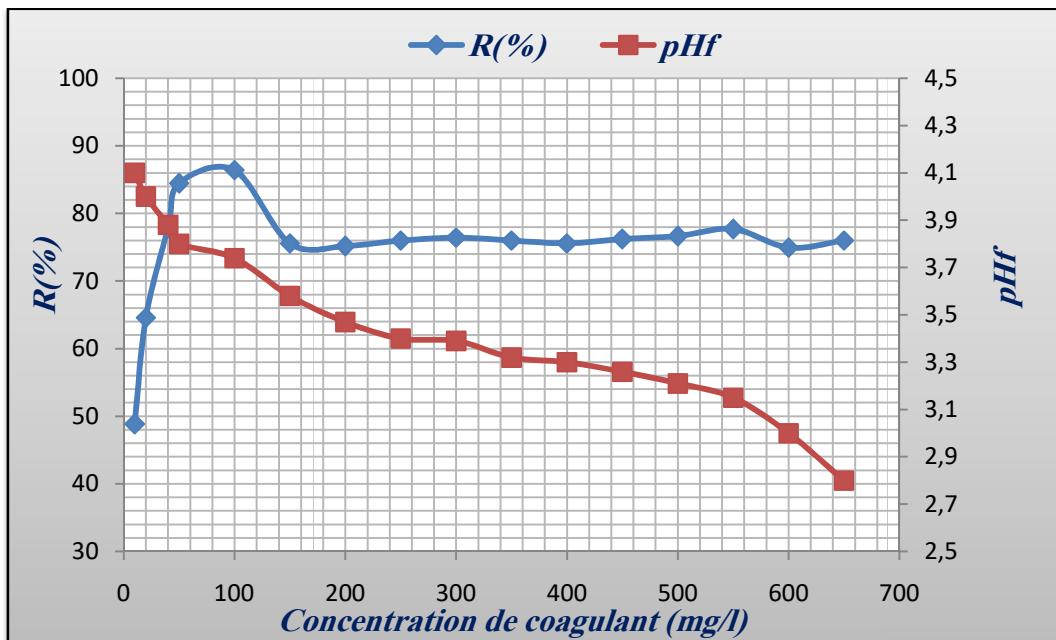
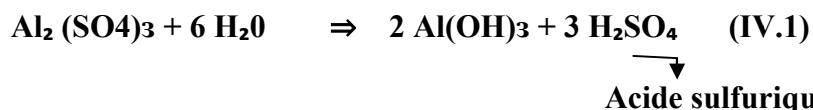


Figure IV.7: L'influence d'Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O sur le rendement d'élimination de colorant et sur la variation du pH.

La figure (IV.7) représente l'influence de la dose d'Al₂(SO₄)₃, 18H₂O sur le rendement (%) d'élimination de colorants de (BC). Une variation du R(%) est constatée en augmentant la dose du coagulant. La courbe de la figure (IV.7) présente une allure en cloche : déstabilisation, optimum, restabilisation. Le rendement optimal de 86,4% est obtenu à une concentration optimale du coagulant de 100 mg/l.

Pour ce qui concerne la variation du pH en fonction de la concentration du coagulant, une diminution du pH_f est constaté, ceci est due à une acidification du milieu (voir l'équation IV.1)



Le pH_f de la solution synthétique devient acide. Au départ, le pH_i est de 5,14 à 0 mg/l de coagulant, à la fin de l'essai le pH_f est de 2.8 à 650 mg/l de coagulant.

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'ajustement du pH:

Des essais de coagulation –floculation ont été effectués en faisant varier le **pH** de la solution de **2 à 12** avec un pas de **2**.

Nous avons calculé le rendement d'élimination (%) en fonction des valeurs de **pH** employées:

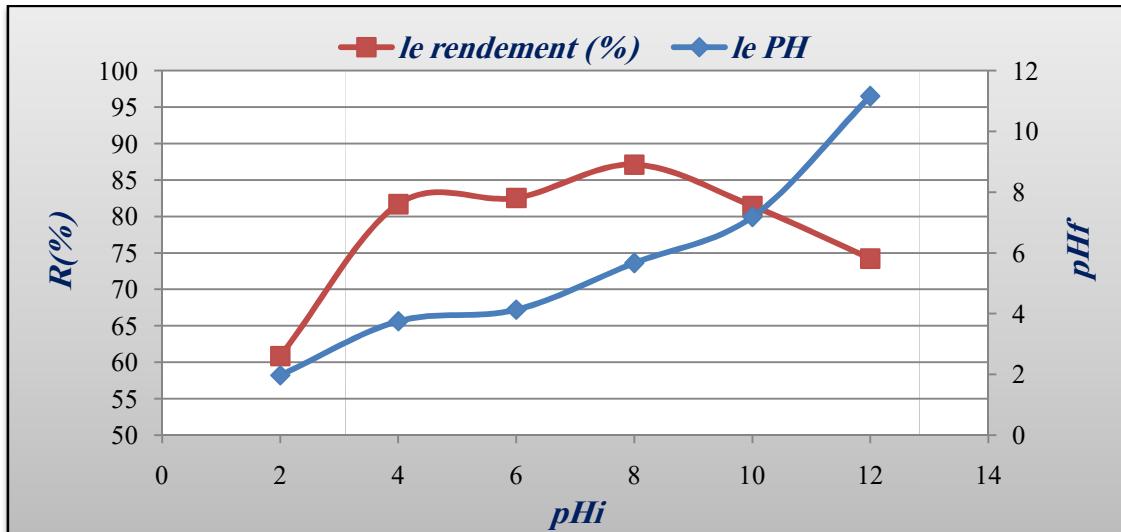


Figure IV.8: L'effet d'ajustement de du **pH** sur le rendement d'élimination du colorant du **pH_f** (conc=100 mg/l)

La figure (IV.8) représente l'évolution du rendement (%) d'élimination du colorant en fonction des valeurs différent de **pH**.

D'après cette figure, nous remarquons une augmentation du rendement pour des faibles valeurs de **pH**, ceci est dû à l'évolution accélérée du processus de coagulation flocculation par la formation des complexes Al(OH)^{2+} , Al(OH)_2^+ , Al(OH)_3 qui jouent le rôle de coagulant. Par contre à pH basique nous avons une diminution rapide du rendement (fig. IV.9).

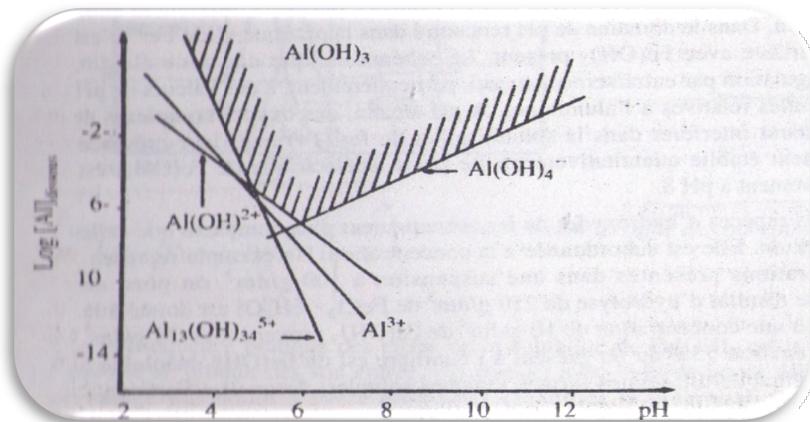


Figure IV.9: Diagramme d'équilibre de l'aluminium dissous [55].

Chapitre IV: Etude expérimentale

Cette diminution du rendement est due à la réaction entre Al(OH)_3 et avec les ions de OH^- déjà présents dans la solution suivant l'équation (IV.2):



Donc l'espèce Al(OH)_4^- (fig. IV.9) prédomine à pH basique ces derniers sont moins réactifs car l'espèce anionique prédomine donc la flocculation est moins efficace.

On remarque que le rendement (R%) est maximal $R_{\max} (\%) = 87,09\%$ à pH=8, ce c'est expliqué par la stabilité de Al(OH)_3 pour un pH compris entre 6-8 (d'après le diagramme d'équilibre de l'aluminium dissous). (Voir fig. IV.9), donc la séparation solide-liquide sera dans sa phase maximale.

Des mécanismes d'interactions sont possibles simultanément entre les molécules de colorants et les produits d'hydrolyse, et les niveaux dépendent du pH du milieu et les types d'ions présents. Deux mécanismes majeurs sont considérés : précipitation et adsorption ; chacun est proposé pour un intervalle de pH différent.

- Précipitation :

Colorant + Al- monomérique \rightarrow [Colorant- Al- monomérique] (s) pH=4,0-5,0

Colorant + Al- polymérique \rightarrow [Colorant – Al- polymérique] (s) pH=5,0-6,0

- Adsorption :

Colorant + $\text{Al(OH)}_3(s)$ \rightarrow [particule]

[Colorant- Al- polymérique] + $\text{Al(OH)}_3(s)$ \rightarrow [particule] pH>6,5.

✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le rendement:

L'objectif de nos essais est de diminuer l'apport en réactifs chimiques par l'ajout d'un bio-floculant (poudre de cactus), ce qui permettra de diminuer la toxicité et les effets négatifs des produits chimiques.

Chapitre IV: Etude expérimentale

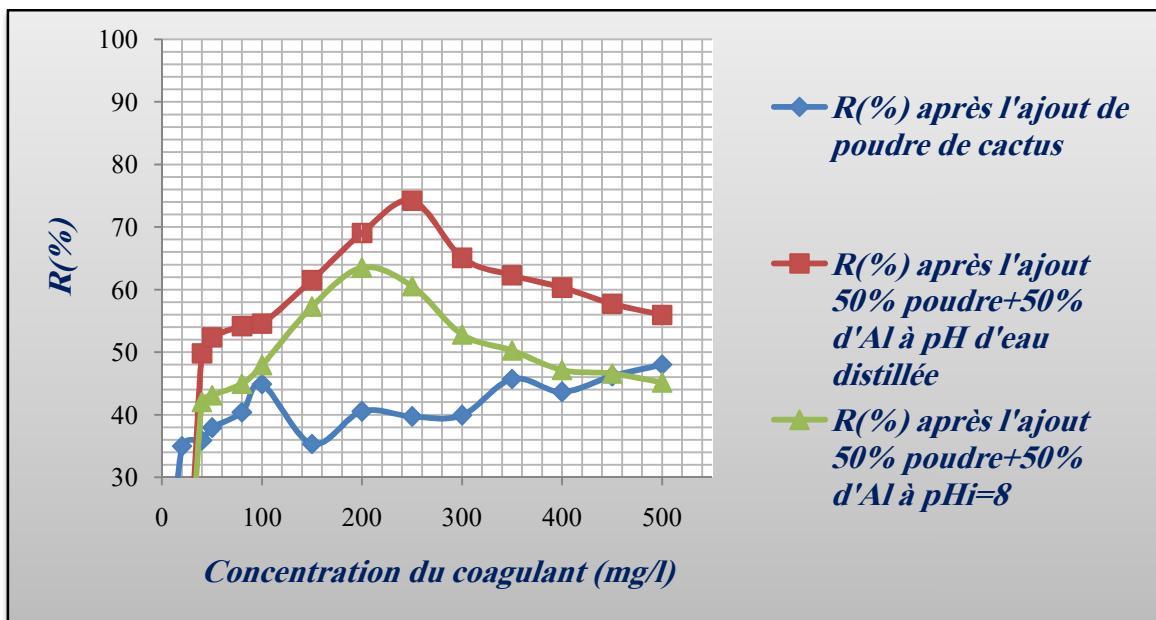


Figure IV.10: L'effet de mélange de poudre de cactus avec l' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ d'élimination.

La figure IV.10 représente les différents essais de coagulation-flocculation avec l'ajout de la « poudre de cactus ».

- 1- Essai poudre de cactus seule: $R_{\max}(\%)= 48,02\%$ à 500 mg/l.
- 2- Essai $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ seulement : $R_{\max}(\%)= 87,09\%$ à pH8 et C= 100 mg/l.
- 3- Essai 50% poudre de cactus + 50% de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ à pH (eau distillée) : $R_{\max}(\%)=54,85\%$ à 200mg/l. on remarque qu'il y a une augmentation du rendement par rapport au 1^{er} essai.
- 4- Essai 50% poudre de cactus + 50% d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ à pH= 8 : $R_{\max}(\%)=74,95\%$ à 150 mg/l, on remarque une augmentation du rendement par rapport au 3^{ème} essai, car cet essai a été réalisé au pH_{optimal}.
- 5- Essai 75% de poudre de cactus + 25% d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ à pH=8 : $R_{\max}=73,02\%$ à 150 mg/l, nous obtenons une faible diminution du rendement par rapport au 4^{ème} essai. Finalement, nous constatons que l'efficacité d'élimination est meilleur pour le coagulant chimique seul ($R_{\max}(\%)= 87,09\%$ à 100 mg/l) qu'avec le coagulant naturel seul ou combiné ($R_{\max}=73,02\%$ à 150 mg/l).

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par [45], montrant que l'efficacité d'élimination en turbidité est maximale pour le coagulant $\text{Al}_2\text{Cl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ seul que pour la poudre de cactus seul dans le traitement d'une eau de surface.

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le pH:

La figure IV.11 représente la variation du pH dans les quatre essais, poudre de cactus seul et une combinaison d₄Al₂(SO₄)₃ et la poudre de cactus.

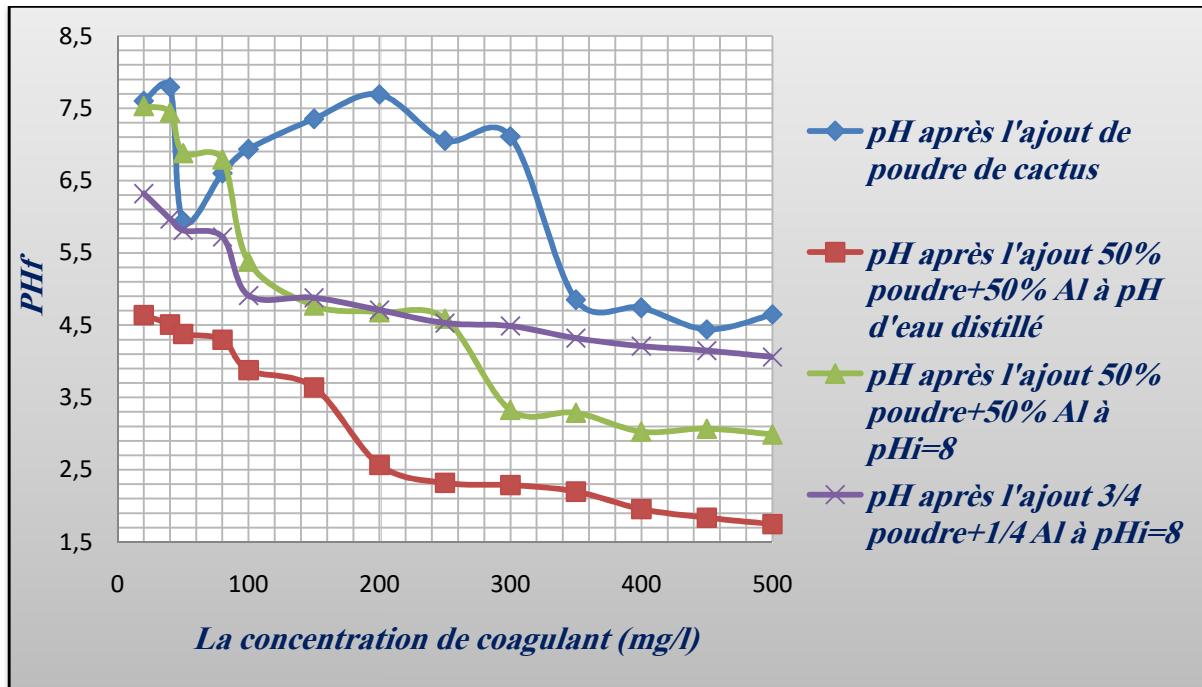


Figure IV.11: L'effet de mélange de poudre de cactus avec l'Al₂(SO₄)₃ sur le pH.

Dans le cas de la poudre de cactus seulement, on remarque que le pH est variable, une augmentation puis une diminution, ceci pourrait être due à sa composition naturelle.

Par contre, dans le cas du mélanger de la poudre de cactus avec Al₂(SO₄)₃, 18H₂O, on remarque une diminution du pH, qui est causée par l'acidification du milieu, due à la présence de Al₂(SO₄)₃, 18H₂O.

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le rendement d'absorbance:

Le but de cet essai est de diminuer l'apport en produits chimiques et de le remplacer par un produit naturel, qui est dans notre cas, le « jus de cactus ». Cet essai permettra aussi de voir l'efficacité du jus de cactus en comparaison avec la poudre de cactus.

Chapitre IV: Etude expérimentale

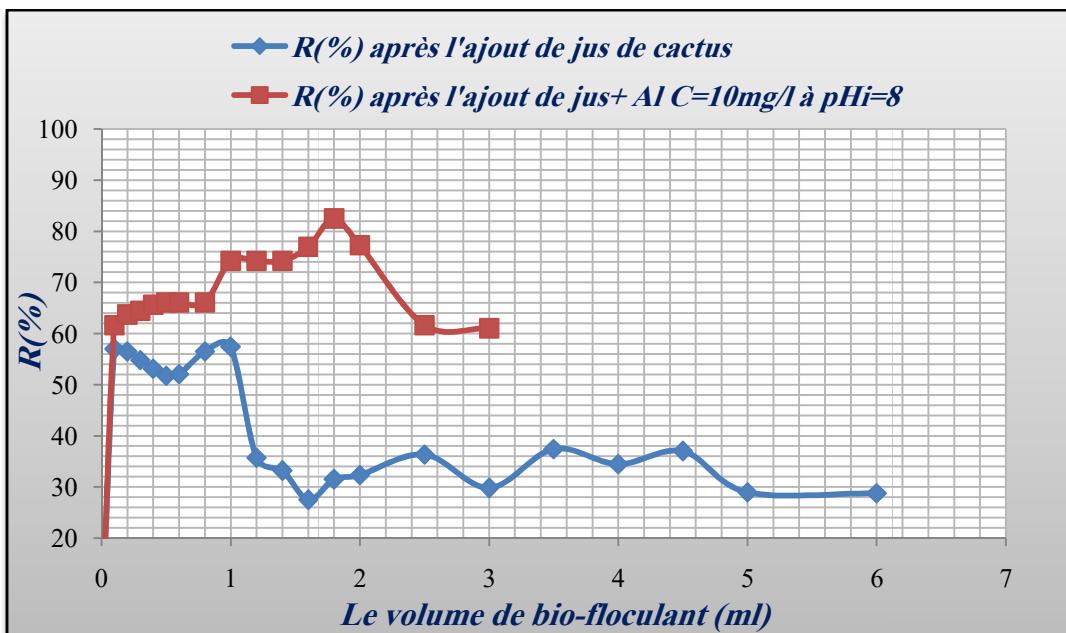


Figure IV.12: L'effet de jus de cactus avec l' $Al_2(SO_4)_3$ sur le rendement d'absorbance.

La figure IV.12 représente l'influence de l'ajout du jus de cactus sur le rendement d'élimination du colorant avec une concentration constante d' $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$ (10 mg/l) et $pH=8$. Le volume du jus de cactus varie de 0,1 ml à 6 ml.

On remarque qu'après un ajout de 1 ml de jus de cactus seul, on obtient un $R_{max}=57,43\%$. Par contre, dans le cas de l'ajout d'une concentration constante de 10mg/l de $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$ avec une variation de volume de bio-floculant, on obtient un rendement de $R_{max}=85,9\%$ avec un volume de jus de cactus $V=1,6$ ml.

Ainsi, une bonne efficacité d'élimination de la coloration est obtenue ($R_{max}=85,9\%$) avec une concentration de 10 mg/l d' $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$ seulement et un volume de jus de 1,6 ml, or nous avons obtenu auparavant $R_{max} (\%)= 87,09\%$ à $pH8$ et $C= 100$ mg/l avec $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$ seul. Donc, nous obtenons un bon rendement avec une concentration en $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$, 10 fois plus faible et un volume en jus de 1,6 ml. Ainsi, nous avons pu diminuer la quantité en produit chimique ($Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$) et la remplacer par un produit naturel (**jus de cactus**).

Le jus de cactus peut être considéré comme un floculant alternatif aux produits chimiques. L'intérêt d'utiliser le jus porte sur une diminution des coûts dus à la consommation d'alun et à une alternative face à sa toxicité [44].

L'efficacité de la flocculation est liée à l'acide poly-galacturonique qui est présent en grand pourcentage dans le mucilage de la plante (voir le tableau IV.2), car il est responsable de la formation des ponts chimiques par l'intermédiaire des liaisons hydrogène ou l'interaction dipôle-dipôle [56].

Chapitre IV: Etude expérimentale

Tableau IV.3 : Composition de mucilage des raquettes d'*Opuntia* [57].

Substance	Composition en %	
	Raquette d'un an	Raquette de 2 ans
Sucre réducteurs (en fructose)	1.90	5.10
Sucre totaux (en glucose)	2.45	6.30
Furfural	5.32	7.66
Acide polygalacturonique	22.60	32.60
Glucomannes	2.22	3.64

La structure de l'acide polygalacturonique, représentée sur la Figure (VI.13). Indique une chaîne anionique dûe à une déprotonation partielle du groupe hydroxyle et du groupe carboxyle en solution aqueuse, impliquant une chimisorption entre les particules chargées et ces groupes [58].

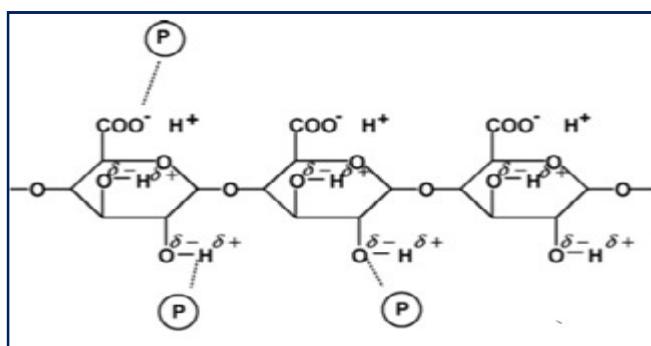


Figure IV.13: Structure de l'acide polygalacturonique (les sites de neutralisation des colloïdes polluants **P**) [58].

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le pH:

Quand on dit dans le cas de poudre de cactus, le jus est un produit naturel avec des compositions variables, donc le **pH** est variable d'une façon aléatoire et pas uniforme.

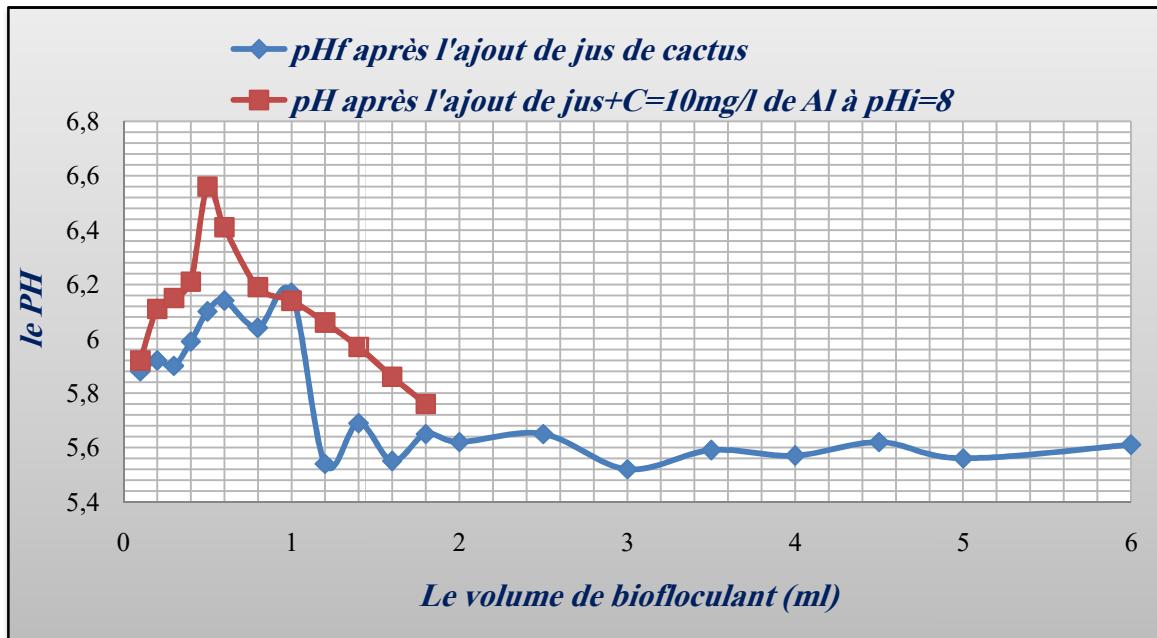


Figure IV.14: L'effet du jus de cactus avec l' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ sur le pH.

La figure IV.14 représente l'effet du jus de cactus en couple avec $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ sur le pH. Dans ce cas, on remarque que le pH varie sous forme aléatoire, il n'est pas stable surtout dans le cas du jus de cactus seul. Dans le cas du mélange, on voit qu'il y a deux phase «augmentation du pH à $V=0,1$ ml jusqu'au $V=0,5$ ml de jus de cactus» ensuite, on voit une diminution du pH à $V=0,5$ ml et à $1,8$ ml ».

La figure (IV.15) présente la solution synthétique après traitement par le coagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ à la dose optimale de coagulant qu'est $C=100$ mg/l.

Chapitre IV: Etude expérimentale

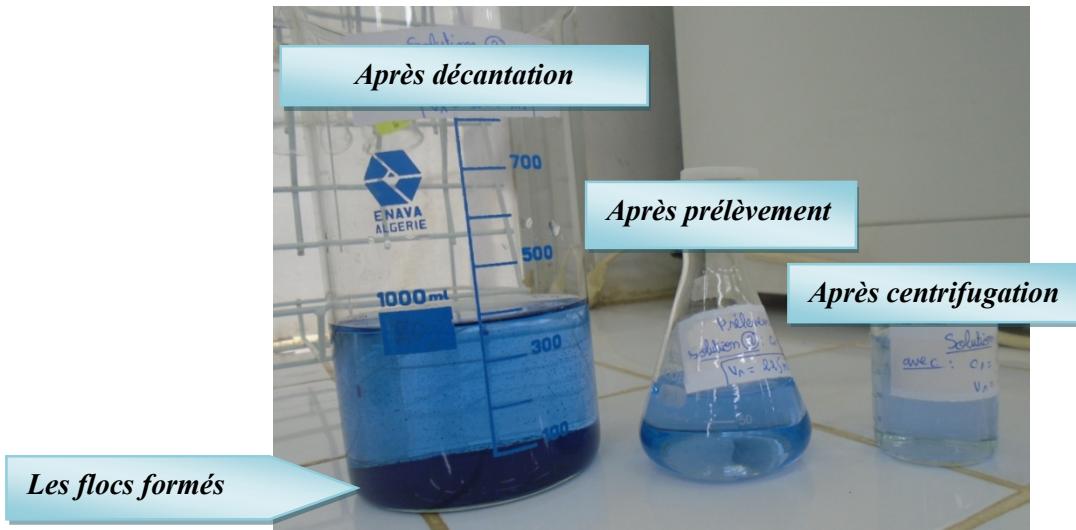


Figure IV.15: La solution synthétique après traitement par $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Conclusion (b):

Dans le cas du rendement d'élimination du colorant, on trouve que le **R(%)** est élevé mais avec ajustement du **pH** par rapport à l'ajout de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ seul.

Dans le cas du mélange de la poudre de cactus avec $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$, nous trouvons une diminution du rendement. Par contre dans le cas du mélanger du jus de cactus avec $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$, nous remarquons que le rendement est intéressant parce que nous diminuons la concentration de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ 10 fois moins que la dose optimale de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$ avec un $V=1,6$ ml de jus de cactus et nous obtenons presque le même rendement.

Afin d'étudier l'impact de l'utilisation des sels métalliques seuls sur le **pH** final de la solution traitée, des mesures de celui-ci ont été faites avant et après chaque traitement. Nous avons remarqué, selon les résultats obtenus que le pH final diminue d'autant que la dose des coagulants s'accroît.

Cette diminution du **pH** est due à la présence du coagulant ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$) qui acidifie le milieu. Mais dans le cas du mélange, on remarque que le **pH** varie d'une façon irrégulière.

c) Le cas de coagulant de FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$:

✓ Le rendement et la variation de pH :

Le coagulant utilisé dans ce cas est FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$. Les concentrations du coagulant varie de **10** à **500** mg/l.

Chapitre IV: Etude expérimentale

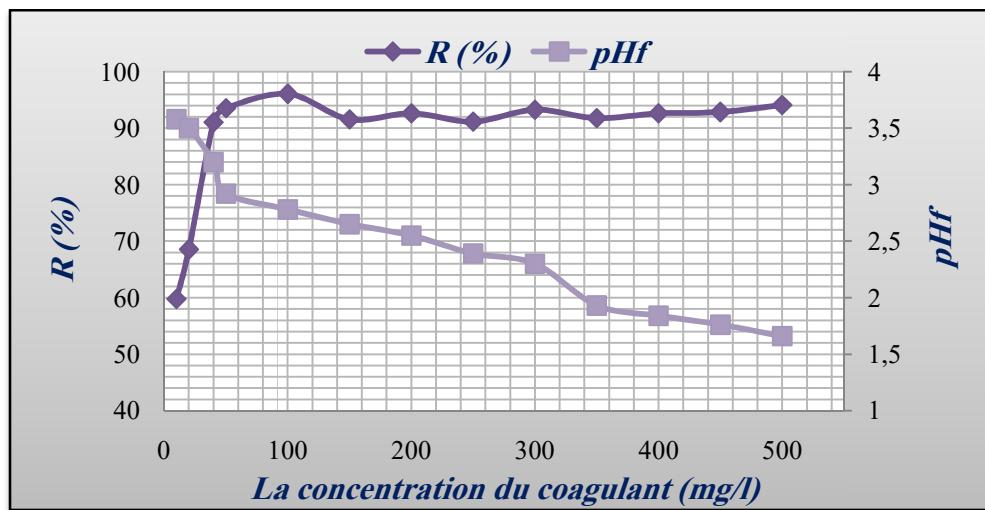
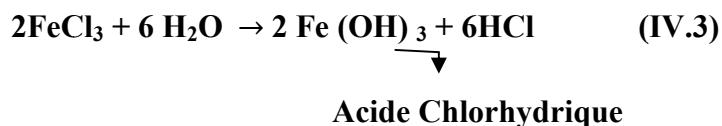


Figure IV.16: Le rendement d'élimination de colorant et la variation du pH.

La figure (IV.16) représente l'influence de la dose de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sur le rendement (%) d'élimination de colorants de (BC) en fonction du coagulant en (mg/l). on remarque que le **R(%)** varie en augmentant la dose du coagulant.

Dans ce cas, on remarque que le **R(%)** augmente en augmentant la dose de coagulant jusqu'à obtenir un bon rendement de $R_{\max} = 96,06\%$ à une dose optimale de coagulant $C = 100 \text{ mg/l}$.

Dans le cas de la variation du **pH** en fonction de la concentration du coagulant. Nous avons au départ un $\text{pH}_i = 5,32$ et après l'ajout du coagulant, nous remarquons une diminution du **pH**. Ceci est dû à la formation de l'acide Chlorhydrique (**HCl**) après ajout de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans l'eau colorée (équation IV.3)



D'après l'équation (IV.2) on assure que le **pH_f** de la solution synthétique devient acide c'est-à-dire on a $\text{pH}_i = 5,32$ à 0 mg/l de coagulant et $\text{pH}_f = 1,66$ à 500 mg/l de coagulant.

✓ L'ajustement du pH :

Dans le cas de l'ajustement du **pH**, on utilise 2 produits chimiques pour ajuster le **pH_i** (2 ; 4 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12) de la solution avant l'ajout du coagulant qui sont : **HCl** pour acidifier le milieu et la chaux **CaO** pour obtenir un milieu basique. La concentration en $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ est maintenue à 100 mg/l .

Nous avons calculé le rendement d'élimination (%) en fonction des valeurs de **pH** employées:

Chapitre IV: Etude expérimentale

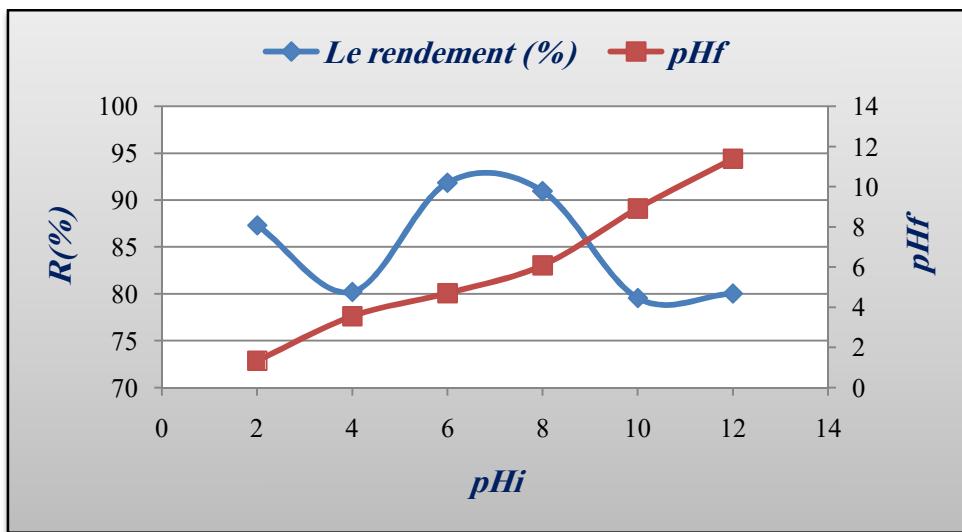


Figure IV.17: L'effet d'ajustement de pH sur le rendement d'élimination du colorant.

La figure(IV.17) représente l'évolution du rendement (%) d'élimination du colorant en fonction des différentes valeurs de pH.

On remarque que le rendement (%) est maximal $R_{\max} = 92\%$ à pH optimal (pH=6) car la stabilité de Fe(OH)_3 se situe entre 6-8 (d'après le diagramme d'équilibre du fer dissous. (Voir fig. IV.18), donc la séparation solide-liquide sera dans sa phase maximale.

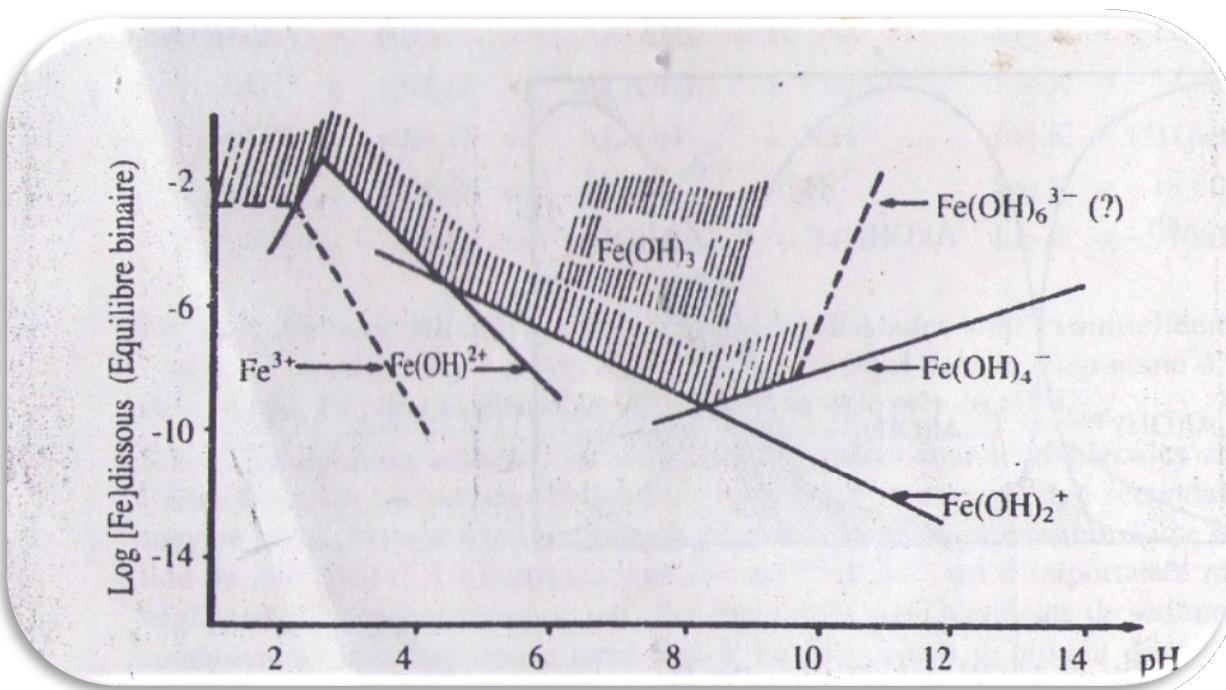


Figure IV.18: Diagramme d'équilibre du fer dissous [55].

Chapitre IV: Etude expérimentale

Donc, pour la suite des essais le pH ne sera pas ajusté, comme c'était le cas pour le $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $18\text{H}_2\text{O}$, mais nous allons utiliser le pH de l'eau distillée.

✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le rendement d'absorbance:

Dans ce cas, nous allons étudier la possibilité de combiner le coagulant chimique (FeCl_3) avec un bio-floculant (dans ce cas « poudre de cactus ») pour diminuer la toxicité et les effets négatifs du produit chimique.

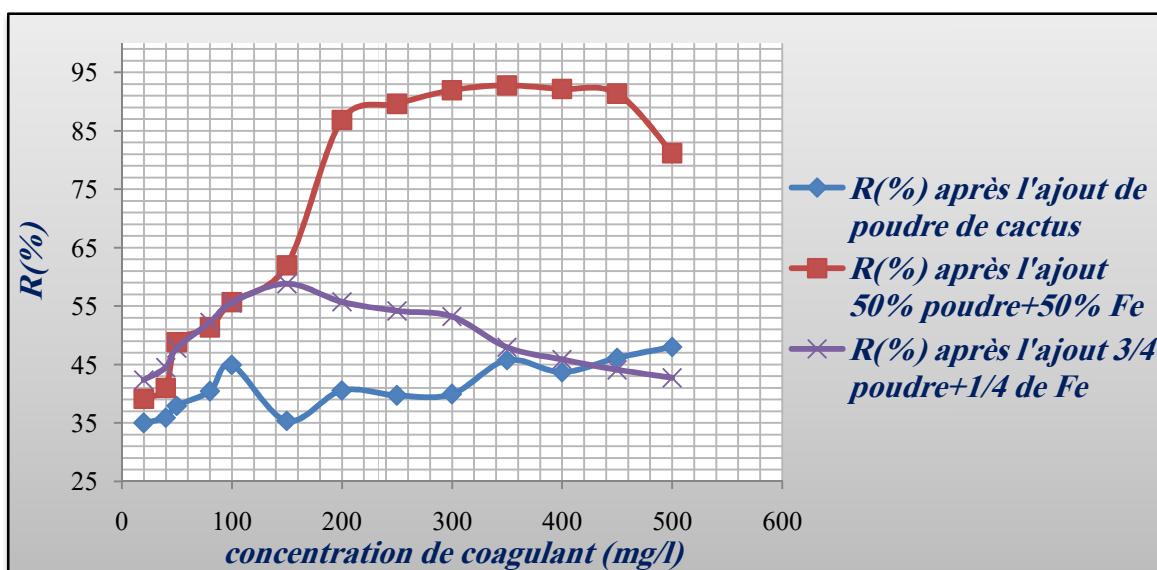


Figure IV.19: L'effet de poudre de cactus avec le FeCl_3 sur le rendement d'absorbance.

La figure IV.19 représente les différents essais avec l'ajout de la « poudre de cactus ». On remarque dans la phase d'ajouter la poudre de cactus seulement, on obtient un $R_{\max}=48,02\%$ à $C=500$ mg/l. D'autre part, dans la 2^{ème} phase d'ajouter 50% poudre de cactus plus 50% de sans ajustement de pH, on remarque qu'il y a une augmentation de rendement par rapport la 1^{ère} phase $R(\%)=93\%$ à $C=300$ mg/l. Mais dans la 3^{ème} phase, on remarque qu'il y a une diminution de rendement avec ajouter 75% de poudre de cactus plus 25% de FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$ par rapport à la 2^{ème} phase.

1. Essai poudre de cactus seule: $R_{\max}(\%)=48,02\%$ à 500 mg/l.
2. Essai FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$ seulement : $R_{\max}(\%)=92,09\%$ à pH6 et $C=100$ mg/l.
3. Essai 50% poudre de cactus + 50% de FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$ à pH6 (eau distillée) : $R_{\max}(\%)=93\%$ à 300mg/l. On remarque qu'il y a une légère augmentation du rendement par rapport au 2^{ème} essai.
4. Essai 75% poudre de cactus + 25% de FeCl_3 , $6\text{H}_2\text{O}$: $R_{\max}=59\%$ à 100 mg/l. Nous constatons une forte diminution du rendement par rapport au 3^{ème} essai.

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le pH:

La figure IV.20 représente la variation du **pH** avec les différentes doses en poudre de cactus et en $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

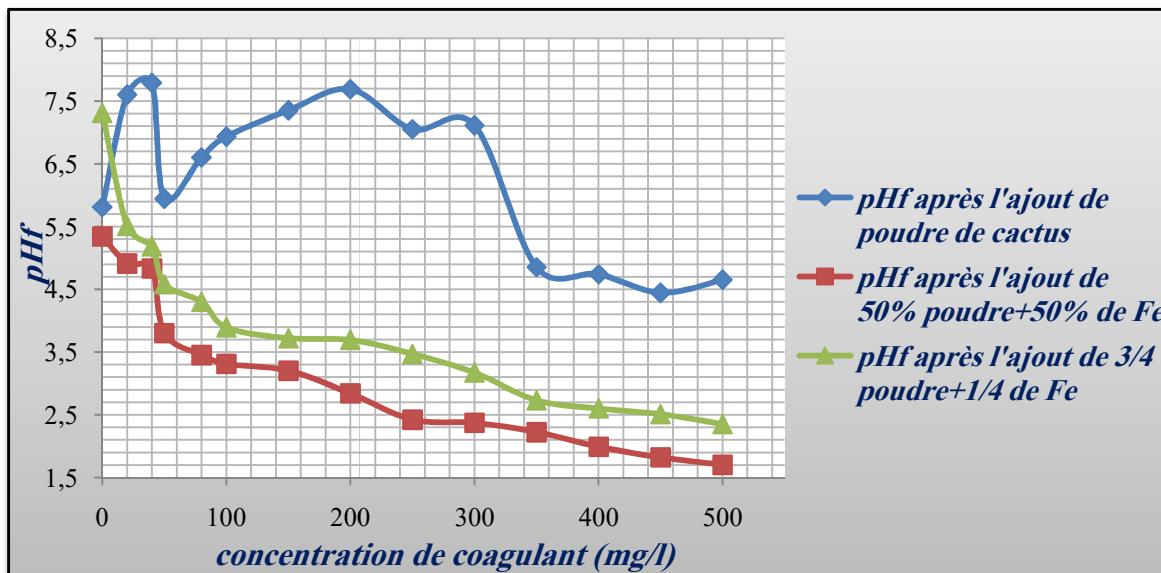


Figure IV.20: L'effet de mélange de poudre de cactus avec le FeCl_3 sur le pH.

Dans le cas de l'ajout de la poudre de cactus seulement, on remarque qu'il est irrégulier, ceci pourrait être dû à la composition naturelle du produit.

Par contre, dans le cas du mélange de la poudre de cactus avec le $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, nous remarquons une diminution du pH, causée par l'hydrolyse de FeCl_3 qui produit l'acide Chlorhydrique.

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le rendement d'absorbance:

Le but de cet essai est de remplacer un produit chimique par un produit naturel, qui est le « jus de cactus » pour voir leur efficacité en comparaison avec la poudre de cactus.

La figure IV.21 représente l'influence de l'ajout du jus de cactus sur le rendement d'élimination du colorant BC avec une concentration constante en $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ à 10 mg/l et à 20 mg/, en faisant varier le volume du jus de cactus diluée à 10%.

Chapitre IV: Etude expérimentale

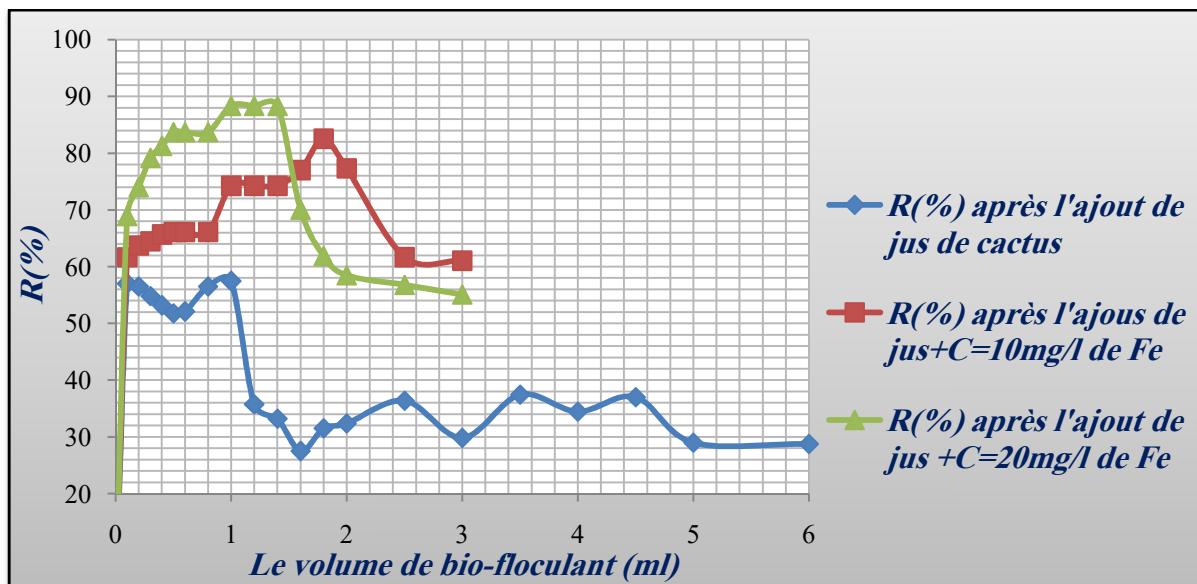


Figure IV.21: L'effet de jus de cactus avec FeCl_3 sur le rendement d'absorbance.

On remarque qu'après un ajout de 1 ml de jus de cactus seul, on obtient un $R_{\max}=57,43\%$. Par contre, dans le cas du mélange de $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ à 10 mg/l et une variation du volume de bio-flocculant. Le meilleur rendement est $R_{\max}=82,52\%$ avec un volume de 1,8 ml de jus de cactus. Cas où on ajoute de C=20 mg/l de $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ plus une variation de volume de bio-flocculant on obtenu un bon rendement $R_{\max}=88,3\%$ après un ajout de V=1 ml de jus de cactus.

Ainsi, une bonne efficacité d'élimination de la coloration est obtenue ($R_{\max}=82,52\%$) avec une concentration de 10 mg/l de $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ seulement et un volume de 1,8 ml. Or nous avons obtenu auparavant $R_{\max}=92,09\%$ avec une concentration de 100 mg/l de $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ seul. Donc, nous avons obtenu un bon rendement avec une concentration en $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$, 10 fois plus faible et un volume en jus de 1,8 ml. De même $R_{\max}=88,3\%$ avec une concentration de 20 mg/l de $\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ seulement et un volume de jus de 1 ml. Ainsi, nous avons pu diminuer la quantité en produit chimique ($\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$) et la remplacer par un produit naturel (jus de cactus).

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le pH:

La figure IV.22 représente l'effet du jus de cactus en combinaison avec le $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sur le pH.

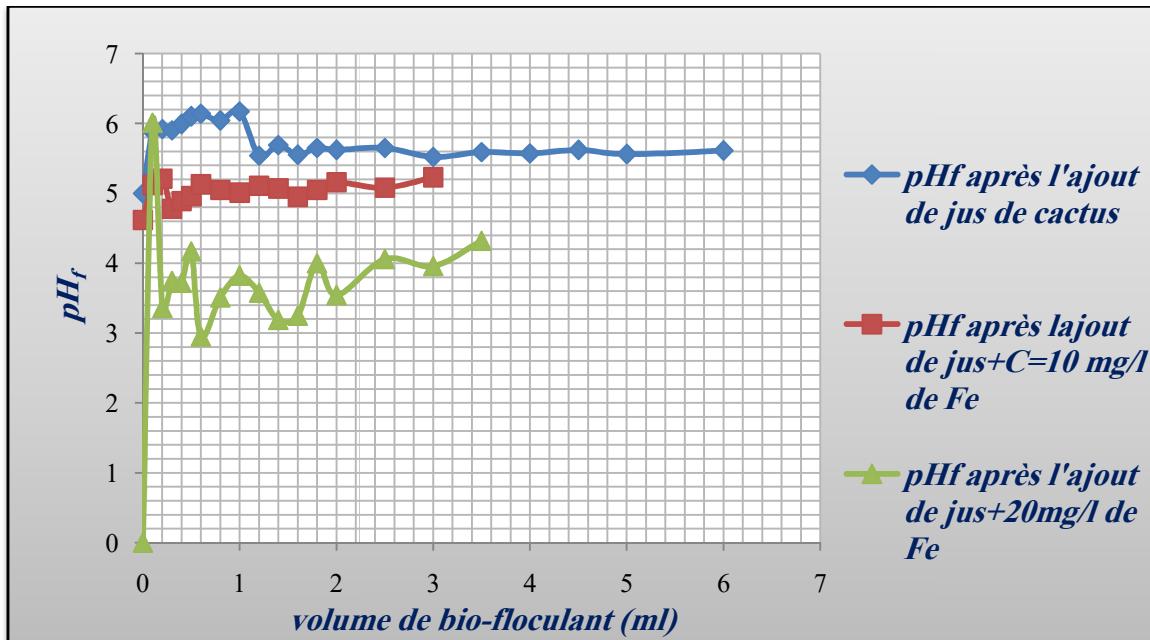


Figure IV.22: L'effet du jus de cactus avec FeCl_3 sur le pH.

Dans ce cas, on remarque que le pH varie d'une façon irrégulière, il n'est pas stable, surtout dans le cas du mélange ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{jus de cactus}$). La figure (IV.23) représente la solution synthétique à $C=100 \text{ mg/l}$ de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ après le traitement.

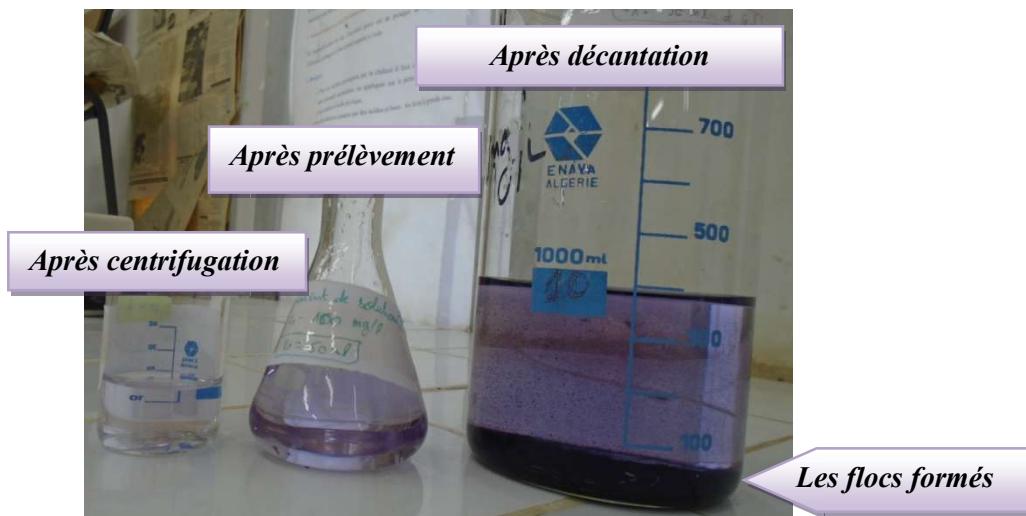


Figure IV.23: La solution synthétique après traitement par FeCl_3 .

Chapitre IV: Etude expérimentale

Conclusion (c):

Dans le cas de la détermination du rendement d'élimination du colorant (**BC**), on trouve que le **R_{max}(%)** est élevé avec ajustement du **pH** pour le coagulant **FeCl₃, 6H₂O** seul.

Dans le cas du mélange de la poudre de cactus avec **FeCl₃, 6H₂O**, nous trouvons une diminution du rendement, donc la poudre de cactus à un effet contraire dans le mécanisme de flocculation. Par contre dans le cas du mélange du jus de cactus avec **FeCl₃, 6H₂O**, nous remarquons que le rendement est intéressant, car nous diminuons la concentration en **FeCl₃, 6H₂O** de **10** et **5** fois moins que la dose optimale de **FeCl₃, 6H₂O** avec un **V=1.8 ml** et **V=1 ml** de jus de cactus respectivement. Nous obtenons une faible diminution du rendement par rapport au **R_{max}**, mais en même temps, nous diminuons la concentration en produit chimique.

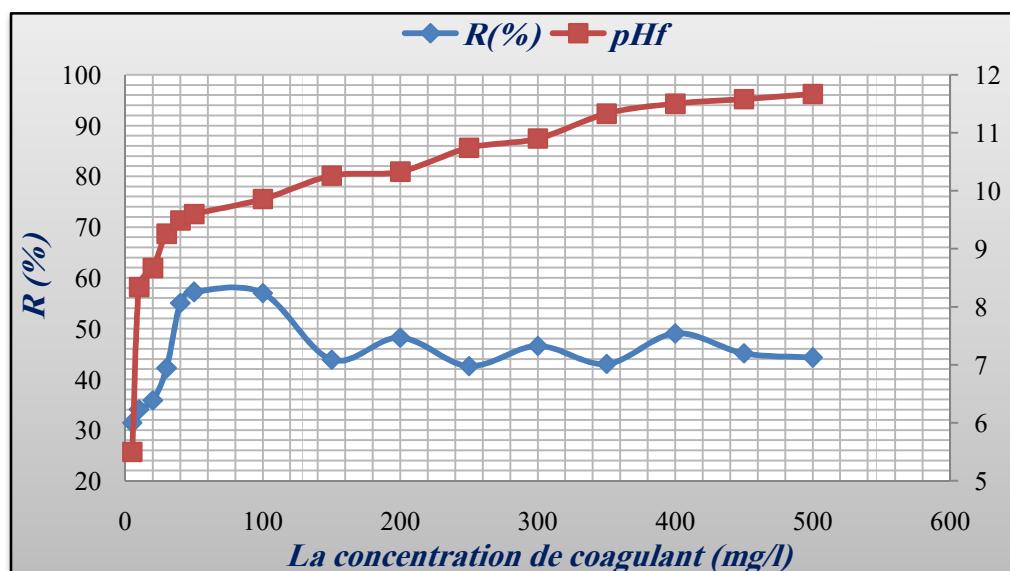
Afin d'étudier l'impact de l'utilisation des sels métalliques seuls sur le **pH** final de la solution traitée, des mesures de celui-ci ont été faites avant et après chaque traitement. Nous avons remarqué, selon les résultats obtenus que le **pH** final diminue d'autant que la dose des coagulants augmente. Dans le cas du mélange, on remarque que le **pH** varie d'une façon irrégulière.

d) Le cas de coagulant de CaO:

✓ Le rendement et la variation de pH :

Le coagulant utilisé dans ce cas est le **CaO**, avec des concentrations initiales du coagulant variant de **10** à **500 mg/l**.

La figure (IV.24) représente l'influence de la dose de **CaO** sur le rendement (%) d'élimination du colorant de (**BC**).

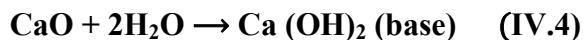


Chapitre IV: Etude expérimentale

Figure IV.24: Le rendement d'élimination de colorant et la variation du pH.

Dans ce cas, on remarque que le **R(%)** augmente en augmentant la dose de coagulant jusqu'à l'obtention d'un bon rendement $R_{\max}= 57,2\%$ à une dose de coagulant $C=50$ mg/l.

Dans le cas de la variation du **pH** en fonction de la concentration en coagulant, nous avons un $pH_i=4.34$ et après l'ajout du coagulant, nous remarquons une augmentation du **pH_f** de la solution (**équation IV.4**)



- ✓ **L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le rendement d'absorbance:**

Dans cet essai, le but est de combiner le coagulant chimique **CaO** par un bio-floculant (dans ce cas « **poudre de cactus** »).

La figure **IV.25** représente les différents essais avec les proportions en « **poudre de cactus** ».

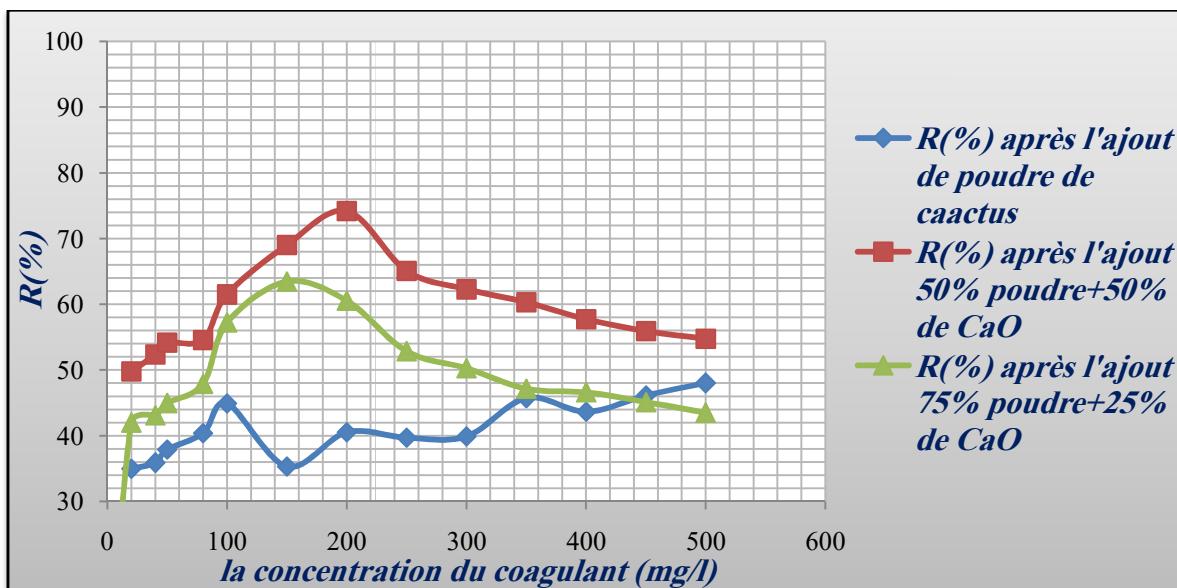


Figure IV.25: L'effet de poudre de cactus avec le **CaO** sur le rendement d'absorbance.

1. **Essai poudre de cactus seule:** $R_{\max}(%)= 48,02\%$ à 500 mg/l.
2. **Essai CaO seulement :** $R_{\max} (%) = 57,2\%$ avec une dose de coagulant $C=50$ mg/l.
3. **Essai 50% poudre de cactus + 50% de CaO à pH_i (eau distillée) :** $R_{\max}(%)=74\%$ à 150 mg/l. on remarque qu'il y a une augmentation du rendement par rapport au 2^{ème} essai.

Chapitre IV: Etude expérimentale

4. Essai 75% de poudre de cactus + 25% de CaO : $R_{\max}(\%) = 63,49\%$ pour une concentration du mélange de 100 mg/l. Nous constatons une diminution du $R(\%)$ par rapport à l'essai 3.

✓ L'effet de l'aide coagulant « poudre de cactus » sur le pH:

La figure IV.26 représente la variation du pH pour les trois essais (poudre de cactus avec le CaO).

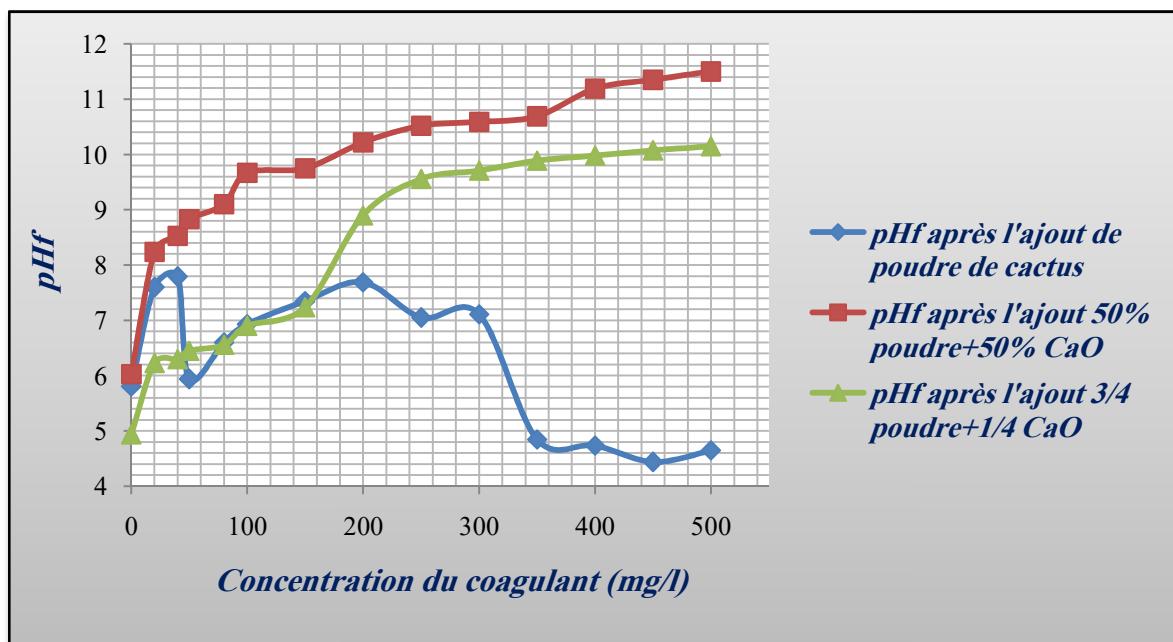


Figure IV.26: L'effet de poudre de cactus avec le CaO sur le pH.

Dans le cas de l'ajout de la poudre de cactus seulement, on remarque que le pH est variable, une augmentation puis une diminution, ceci pourrait être aux caractéristiques naturelles du composé

Par contre, dans le cas du mélanger de la poudre de cactus avec le CaO, nous remarquons une augmentation du pH.

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le rendement d'absorbance:

Le but de cet essai est d'indemnité aussi des produits chimiques par un produit naturel qu'est le « jus de cactus » pour voir leur efficacité en comparaison avec la poudre de cactus.

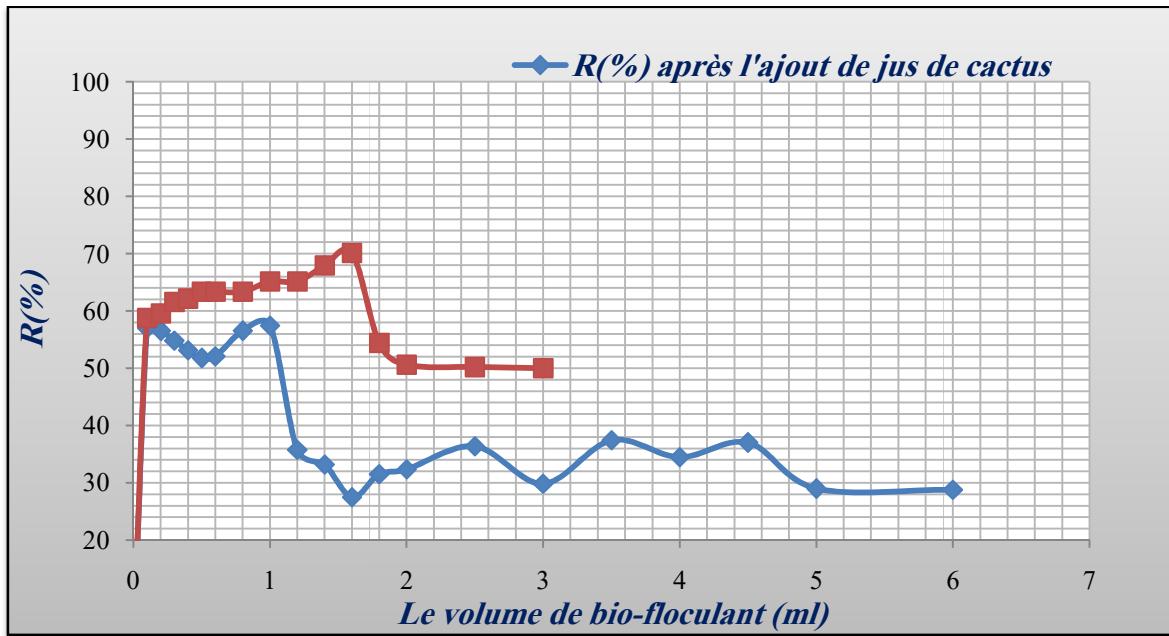


Figure IV.27: L'effet de jus de cactus avec **CaO** sur le rendement d'absorbance.

La figure IV.27 représente l'influence de l'ajout du jus de cactus sur le rendement d'élimination du colorant avec une concentration constante de **CaO** à $C=30$ mg/l et une variation du volume de jus de cactus diluée à 10%.

On remarque qu'après un ajout de 1 ml de jus de cactus seul, on obtenu un $R_{max}=57,43\%$. Par contre, dans le cas d'une concentration de $C=30$ mg/l de **CaO** et une variation du volume de bio-floculant. Nous obtenons un rendement $R_{max}=70,12\%$ après un ajout de $V=1,6$ ml de jus de cactus.

Chapitre IV: Etude expérimentale

✓ L'effet de l'aide coagulant « jus de cactus » sur le pH:

La figure IV.28 représente l'effet du jus de cactus en combinaison avec le **CaO** sur le **pH**.

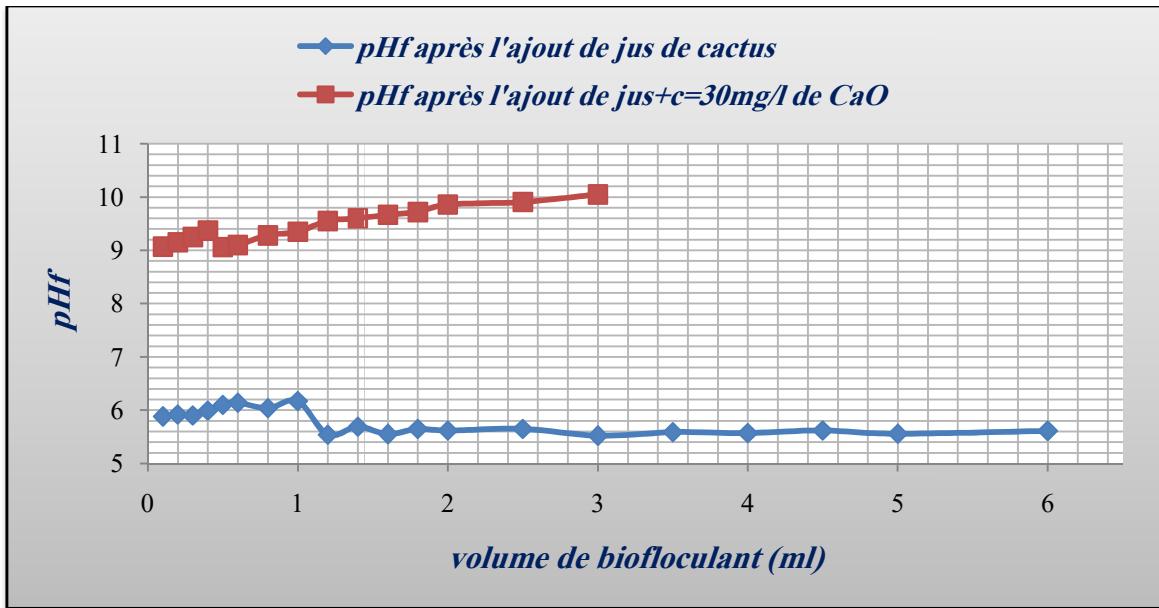


Figure IV.28: l'effet du jus de cactus avec le **CaO** sur le **pH**.

La figure IV.28 représente l'effet du jus de cactus en couple avec le **CaO** sur le **pH**. Dans ce cas, on remarque que le **pH** est varié sous forme aléatoire, il n'est pas stable dans le cas de jus de cactus seul mais dans le cas de mélange on voir qu'il y a une augmentation de **pH**.

Conclusion (d):

Dans le cas de la détermination du rendement d'élimination du colorant, on trouve que le **R(%)** est moyen dans le cas de l'ajout de **CaO** seul.

Dans le cas du mélange de la poudre de cactus avec **CaO**, nous trouvons une augmentation du rendement donc la poudre de cactus joue un rôle dans la flocculation. Par contre dans le cas du mélange du jus de cactus avec **CaO**, nous remarquons que le rendement est faible parce que nous diminuons la concentration en **CaO** par rapport à la dose optimale de **CaO** avec un **V=1.6 ml** de jus de cactus et nous obtenons une faible diminution du rendement.

Afin d'étudier l'impact de l'utilisation de la chaux sur le **pH** final de la solution traitée. Des mesures de celui-ci ont été faites avant et après chaque traitement. Nous avons remarqué, selon les résultats obtenus que le **pH** final augmente d'autant que la dose des coagulants croît.

Conclusion générale:

L'objectif principal de ce travail est de montrer l'intérêt du procédé de coagulation-flocculation pour le traitement d'une solution colorée par un colorant issu d'une industrie de textile algérienne (bleu de cibacette).

Le processus de coagulation-flocculation permet d'éliminer une grande charge de la matière organique, de la matière en suspension et a un bon rendement en décoloration. Il est adopté, le plus souvent, avant le traitement biologique.

Notre travail contribue à améliorer ce procédé en utilisant des réactifs minéraux, Ils sont souvent appelés <<coagulant minéraux>>. Ces produits chimiques conduisent, en effet, à la formation de flocs fins mais mécaniquement stables. Nous avons employé des sels métalliques tels que le chlorure ferrique, un sel d'aluminium et la chaux, qui est souvent utilisée comme adjuvant de coagulation.

Nous avons utilisé la poudre et le jus de cactus comme flocculant naturel pour le traitement de la solution colorée par le bleu de cibacette. D'après les résultats obtenus au cours de cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

L'utilisation des coagulants chimiques seuls donnent un bon rendement d'élimination du colorant, mais malheureusement, ils ont des effets toxiques sur la santé humaine.

Un ajustement du **pH** a été réalisé, il a été trouvé un pH optimal de **8** pour le sulfate d'aluminium, pour cela tous les essais ont été fait à **pH 8**. Par contre, le **pH** optimal du chlorure ferrique a été trouvé égal à 6, ce pH se situe dans l'intervalle du **pH** de la solution synthétique colorée au bleu de cibacette, Donc, le **pH** n'a pas été ajusté dans le cas du chlorure ferrique. Les essais avec ce dernier flocculant ont été réalisés avec le **pH** de l'eau distillée.

Le jus de cactus présente une très bonne capacité de flocculation en présence du sel d'aluminium, du chlorure de fer et de la chaux. L'efficacité de ce liquide est comparable à celle des flocculants industriels. La combinaison formée par le jus de cactus et les coagulants chimiques apparaît plus intéressante à cause de la diminution de la concentration du coagulant chimique à **10** ou **5** fois par rapport à la dose optimale. A titre d'exemple, le rendement optimal obtenu avec le sulfate d'aluminium est de **87,09 %** avec une concentration optimale de **100 mg/l** d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, **18 H₂O** à **pH 8**. Alors que, nous avons obtenu un rendement optimal de **85,9 %** à **pH 8**, avec une concentration de **10 mg/l** d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, **18 H₂O** couplé avec **1,6 ml** de jus de cactus. De même, pour le chlorure ferrique, le rendement optimal est de **96,06 %** avec une concentration optimale de **100 mg/l** de FeCl_3 , **16 H₂O** à **pH initial**. Alors que, nous avons obtenu des rendements optimaux de **82,52 %** et de **88,3 %** à **pH initial** à **10** et à **20 mg/L** couplé respectivement à **1,8 mL** et à **1 mL** de jus de cactus. Enfin, le rendement optimal obtenu avec la chaux est de **57,2 %** à une concentration optimale **50 mg/l** à **pH_{initial}**. Alors que, nous avons obtenu un rendement optimal de **70,12 %** avec une concentration de **30 mg/l** combinée avec **1,6 ml** de jus de cactus.

Dans le cas, des essais des mélanges constitués de la poudre de cactus et de floculants industriels avec les proportions suivantes : **50%** de poudre de cactus+ **50 %** de floculants industriels et **75%** de poudre de cactus + **25 %** de floculants industriels, les résultats sont moins intéressants que dans le cas du jus de cactus.

Finalement, le jus de cactus peut être considéré comme un floculant alternatif aux produits chimiques. L'intérêt d'utiliser le jus porte sur une diminution des coûts dus à la consommation de produits chimiques et à une alternative face à leur toxicité.

Les annexes

Annexe 1:

Tableau IV.1. la densité optique de colorant BC avec longueur d'onde de 420-890 nm:

Longueur d'onde (nm)	la densité optique (Abs)
550	0.397
560	0.357
570	0.352
580	0.404
590	0.497
600	0.547
610	0.562
620	0.586
630	0.569
640	0.642
650	0.532
660	0.523
670	0.515
680	0.485
690	0.447
700	0.440

Annexe 2: Le cas de coagulant $Al_2(SO_4)_3$, 18 H_2O

Tableau IV.2 : Le cas de floculant d' $Al_2(SO_4)_3$, 18 H_2O sans ajustement de pH:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs_D)	pH_D	La densité optique (Abs_C)	pH_C	
0	0.559	5.14	0.559	5.14	0
10	0.449	4.5	0.286	4.1	48.84
20	0.441	4.2	0.198	4	64.58
40	0.423	3.9	0.124	3.88	77.82
50	0.298	3.82	0.087	3.8	84.44
100	0.124	3.7	0.076	3.74	86.4
150	0.131	3.52	0.116	3.58	75.58
200	0.139	3.4	0.118	3.47	75.16
250	0.132	3.38	0.114	3.4	76
300	0.128	3.3	0.112	3.39	76.42
350	0.132	3.28	0.114	3.32	76
400	0.135	3.22	0.116	3.3	75.58
450	0.131	3.19	0.113	3.26	76.21
500	0.128	3.08	0.111	3.21	76.63
550	0.122	3	0.106	3.15	77.68
600	0.142	2.97	0.119	3	74.95
650	0.132	2.88	0.114	2.8	76

Les annexes

Tableau IV.3 : Le cas de $d'Al_2(SO_4)_3$, $18 H_2O$ sa dose optimale $C=100 mg/l$ avec ajustement de pH :

pH_i	<i>La densité optique initiale</i>	<i>Après décantation</i>		<i>Après centrifugation</i>		<i>Le rendement (%)</i>
		<i>La densité optique (Abs_D)</i>	pH_D	<i>La densité optique (Abs_C)</i>	pH_C	
2	0.401	0.364	1.86	0.197	1.97	60.87
4	0.409	0.324	3.2	0.155	3.75	81.88
6	0.498	0.319	3.48	0.136	4.13	82.69
8	0.519	0.262	5.62	0.119	5.66	87.07
10	0.538	0.306	8.26	0.156	7.18	81
12	0.969	0.365	11.2	0.293	11.15	79.76

Tableau IV.4. Le cas de $C=10mg/l$ de $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O + pH_i=8$ +jus de cactus dilué à 10%:

<i>La concentration de floculant (mg/l)</i>	<i>Après décantation</i>		<i>Après centrifugation</i>		<i>Le rendement (%)</i>
	<i>La densité optique (Abs_D)</i>	pH_D	<i>La densité optique (Abs_C)</i>	pH_C	
0	0.61	8	0.61	8	0
0.1	0.483	5.78	0.216	5.92	64.59
0.2	0.403	5.9	0.211	6.11	65.41
0.3	0.394	5.99	0.164	6.15	73.11
0.4	0.372	6.03	0.153	6.21	74.92
0.5	0.365	6.53	0.148	6.56	75.74
1	0.349	6.41	0.132	6.41	78.36
1.5	0.283	6.28	0.102	6.19	83.28
1.6	0.279	6.19	0.086	6.14	85.9
1.8	0.297	6.06	0.097	6.06	84.09
2	0.321	5.99	0.122	5.97	80
2.5	0.354	5.79	0.134	5.86	78.03
3	0.365	5.65	0.149	5.76	75.57

Tableau IV.5 : Le cas de mélange de 50% de poudre de cactus +50% d' $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O$ et sans ajustement de pH :

<i>La concentration de floculant (mg/l)</i>	<i>Après décantation</i>		<i>Après centrifugation</i>		<i>Le rendement (%)</i>
	<i>La densité optique (Abs_D)</i>	pH_D	<i>La densité optique(Abs_C)</i>	pH_C	
0	0.474	4.99	0.474	4.99	0
10	0.465	4.26	0.287	4.64	39.45
20	0.46	4.22	0.28	4.51	40.93
40	0.442	3.98	0.271	4.38	42.83
50	0.438	3.83	0.265	4.3	44.09

Les annexes

80	0.435	3.72	0.259	3.88	45.36
100	0.422	3.61	0.251	3.64	47.05
150	0.406	2.55	0.224	2.57	52.74
200	0.432	2.45	0.214	2.32	54.85
250	0.446	2.32	0.221	2.29	53.38
300	0.45	2.29	0.223	2.2	52.95
350	0.459	1.98	0.225	1.96	52.53
400	0.461	1.89	0.232	1.84	51.05
450	0.465	1.8	0.24	1.75	49.37
500	0.471	1.72	0.256	1.6	45.99

Tableau IV.6 : Le cas de mélange de 50% de poudre de cactus +50% d' $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O+pH_i=8$:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs_D)	pH_D	La densité optique(Abs_C)	pH_C	
0	0.509	8	0.509	8	0
10	0.458	7.53	0.316	7.53	37.92
20	0.416	7.44	0.299	7.44	41.26
40	0.407	6.88	0.274	6.88	46.17
50	0.387	6.79	0.255	6.79	49.9
80	0.323	4.96	0.229	5.38	53.74
100	0.225	4.91	0.124	4.77	74.95
150	0.231	4.87	0.132	4.68	73.33
200	0.275	4.08	0.177	4.59	64.24
250	0.383	3.72	0.234	3.33	52.73
300	0.386	3.45	0.247	3.29	50.1
350	0.425	3.32	0.251	3.03	49.29
400	0.434	3.29	0.266	3.07	46.26
450	0.441	3.15	0.27	2.99	45.45
500	0.455	3.08	0.275	2.89	44.44

Tableau IV.7 : Le cas de mélange 75% de poudre de cactus +25% d' $Al_2(SO_4)_3$, $18H_2O+pH_i=8$:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs_D)	pH_D	La densité optique(Abs_C)	pH_C	
0	0.53	8	0.53	8	0
10	0.495	6.45	0.319	6.32	39.81
20	0.489	5.73	0.243	5.97	54.15
40	0.45	5.59	0.215	5.81	59.43
50	0.44	5.48	0.208	5.72	60.75
80	0.433	5.06	0.187	4.91	64.72

Les annexes

100	0.425	4.84	0.169	4.88	68.11
150	0.403	4.78	0.143	4.71	73.02
200	0.421	4.64	0.176	4.53	66.79
250	0.432	4.51	0.182	4.49	65.66
300	0.441	4.42	0.195	4.32	63.21
350	0.449	4.39	0.213	4.21	59.81
400	0.451	4.25	0.235	4.15	55.66
450	0.462	4.11	0.248	4.06	53.21
500	0.471	4.02	0.253	3.99	52.26

Annexe 3: Le cas de coagulant $FeCl_3, 6H_2O$.

Tableau IV.8 : Le cas de floculant de $FeCl_3, 6H_2O$:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique(Abs _C)	pH _C	
0	0.559	5.32	0.559	5.32	0
10	0.415	3.67	0.225	3.58	59.75
20	0.265	3.49	0.176	3.5	68.52
40	0.121	3.28	0.05	3.2	91.06
50	0.062	3.15	0.036	2.92	93.56
100	0.024	3.08	0.022	2.78	96.06
150	0.073	2.99	0.04	2.65	94.58
200	0.065	2.91	0.035	2.55	92.63
250	0.077	2.77	0.042	2.39	91.16
300	0.059	2.75	0.032	2.3	93.26
350	0.074	2.39	0.039	1.93	91.79
400	0.065	2.35	0.035	1.84	92.63
450	0.06	2.25	0.034	1.76	92.84
500	0.057	2.21	0.028	1.66	94.11

Tableau IV.9 : Le cas de d' $FeCl_3, 6H_2O$ avec ajustement de pH et sa dose optimale $C=100$ mg/l:

pH _i	Après décantation		Après centrifugation		
	La densité optique initiale	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique (Abs _C)	pH _C
2	0.418	0.097	1.87	0.053	1.34
4	0.475	0.111	3.55	0.094	3.66
6	0.503	0.088	4.98	0.041	4.71
8	0.521	0.097	6.33	0.047	6.09
10	0.636	0.165	8.99	0.13	8.92
12	0.947	0.191	11.51	0.189	11.4

Les annexes

Tableau IV.10 : Le cas $C=10\text{mg/l}$ de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ +jus de cactus dilué à 10%:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique (Abs _C)	pH _C	
0	0.67	4.62	0.67	4.62	0
0.1	0.546	5.06	0.257	5.12	61.64
0.2	0.53	4.72	0.243	5.21	63.73
0.3	0.522	4.36	0.238	4.78	64.45
0.4	0.508	4.65	0.23	4.89	65.67
0.5	0.492	4.58	0.221	4.96	66.1
1	0.416	4.75	0.168	5.13	74.23
1.5	0.396	4.81	0.167	5.05	74.38
1.6	0.382	5.2	0.15	5.01	76.99
1.8	0.366	4.87	0.114	5.11	82.52
2	0.494	4.56	0.148	5.07	77.3
2.5	0.538	4.68	0.25	4.95	61.65
3	0.546	4.71	0.254	5.05	61.04

Tableau IV.11 : Le cas de $C=20\text{mg/l}$ de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ +jus de cactus dilué à 10%:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique (Abs _C)	pH _C	
0	0.51	6.01	0.51	6.01	0
0.1	0.422	4.93	0.202	3.36	68.92
0.2	0.383	3.51	0.171	3.75	73.96
0.3	0.336	3.08	0.136	3.72	79.08
0.4	0.322	3.61	0.122	4.17	81.23
0.5	0.306	3.21	0.106	2.95	83.69
1	0.276	3.3	0.076	3.51	88.3
1.5	0.395	3.16	0.177	3.82	72.77
1.6	0.411	3.28	0.195	3.58	70
1.8	0.429	3.44	0.248	3.19	61.84
2	0.434	3.54	0.27	3.25	58.46
2.5	0.449	3.51	0.281	4	56.77
3	0.465	3.29	0.292	3.54	55.08

Les annexes

Tableau IV.12 : Le cas de mélange de 50% de poudre de cactus +50% de $FeCl_3$, $6H_2O$:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs_D)	pH _D	La densité optique(Abs_C)	pH _C	
0	0.51	5.34	0.51	5.34	0
10	0.474	5.11	0.314	4.91	39.12
20	0.449	4.74	0.301	4.83	40.98
40	0.414	3.44	0.261	3.8	48.82
50	0.394	3.01	0.248	3.45	51.37
80	0.346	2.98	0.226	3.31	55.69
100	0.325	2.88	0.194	3.2	61.96
150	0.116	2.59	0.067	2.84	86.86
200	0.102	2.44	0.053	2.42	89.61
250	0.099	2.39	0.041	2.37	91.96
300	0.087	2.36	0.037	2.22	92.75
350	0.098	2.24	0.04	1.99	92.15
400	0.109	2.18	0.044	1.82	91.37
450	0.128	1.95	0.096	1.7	81.18
500	0.154	1.82	0.125	1.65	75.49

Tableau IV.13 : Le cas de mélange 75% de poudre de cactus +25% de $FeCl_3$, $6H_2O$:

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs_D)	pH _D	La densité optique(Abs_C)	pH _C	
0	0.515	7.31	0.515	7.31	0
10	0.476	5.18	0.297	5.51	42.33
20	0.47	4.73	0.286	5.18	44.47
40	0.465	4.69	0.269	4.58	47.77
50	0.451	4.56	0.246	4.3	52.23
80	0.438	3.49	0.229	3.89	55.53
100	0.429	3.35	0.212	3.72	58.83
150	0.433	3.21	0.228	3.69	55.73
200	0.456	3.03	0.236	3.47	54.17
250	0.467	2.97	0.241	3.17	53.2
300	0.487	2.8	0.268	2.73	47.96
350	0.491	2.77	0.279	2.6	45.83
400	0.498	2.61	0.288	2.51	44.08
450	0.501	2.45	0.295	2.35	42.72
500	0.509	2.39	0.305	2.21	40.78

Les annexes

Annexe 4: Le cas de coagulant **CaO**

Tableau IV.14 : Le cas de floculant de **CaO:**

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique(Abs _C)	pH _C	
0	0.465	4.34	0.465	4.34	0
5	0.446	5.95	0.356	5.5	31.41
10	0.422	7.54	0.342	8.34	34.1
20	0.401	8.5	0.333	8.67	35.84
30	0.399	9.03	0.3	9.26	42.2
40	0.386	9.12	0.209	9.49	55.05
50	0.379	9.35	0.199	9.6	57.2
100	0.387	9.78	0.2	9.86	56.99
150	0.395	10.10	0.27	10.26	43.87
200	0.405	10.18	0.249	10.33	48.23
250	0.414	10.22	0.276	10.74	42.62
300	0.426	10.31	0.257	10.9	46.57
350	0.438	10.95	0.274	11.33	43.04
400	0.442	10.99	0.245	11.5	49.06
450	0.449	11.07	0.264	11.58	45.11
500	0.451	11.15	0.268	11.67	44.28

Tableau IV.15 : Le cas C=30mg/l de **CaO+jus de cactus dilué à 10%:**

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique(Abs _C)	pH _C	
0	0.502	4.74	0.502	4.74	0
0.1	0.478	8.96	0.207	9.07	58.76
0.2	0.454	9.2	0.203	9.15	59.56
0.3	0.429	9.23	0.199	9.25	61.55
0.4	0.422	9.27	0.19	9.37	62.15
0.5	0.414	8.96	0.184	9.06	63.35
1	0.385	9.01	0.175	9.1	65.14
1.5	0.361	9.08	0.161	9.28	67.93
1.6	0.342	9.13	0.15	9.35	70.12
1.8	0.408	9.18	0.226	9.55	54.98
2	0.425	9.26	0.23	9.6	54.42
2.5	0.441	9.31	0.248	9.67	50.6
3	0.468	9.41	0.25	9.72	50.2

Les annexes

Tableau IV.16 : Le cas de mélange de 50% de poudre de cactus +50% de CaO:

<i>La concentration de floculant (mg/l)</i>	<i>Après décantation</i>		<i>Après centrifugation</i>		
	<i>La densité optique (Abs_D)</i>	<i>pH_D</i>	<i>La densité optique(Abs_C)</i>	<i>pH_C</i>	<i>Le rendement (%)</i>
0	0.504	6.03	0.504	6.03	0
10	0.433	8.47	0.253	8.24	49.8
20	0.419	8.59	0.24	8.53	52.38
40	0.37	8.8	0.231	8.83	54.17
50	0.355	9.02	0.229	9.1	54.56
80	0.339	9.36	0.194	9.67	61.51
100	0.315	9.45	0.156	9.75	69.05
150	0.302	9.63	0.13	10.22	74.21
200	0.331	9.71	0.176	10.52	65.08
250	0.349	10.11	0.19	10.59	62.3
300	0.364	10.21	0.2	10.69	60.32
350	0.378	10.41	0.213	11.19	57.74
400	0.384	10.47	0.222	11.35	55.95
450	0.408	10.68	0.228	11.5	54.76
500	0.425	10.87	0.236	11.67	53.17

Tableau IV.17 : Le cas de mélange 75% de poudre de cactus +25% de CaO:

<i>La concentration de floculant (mg/l)</i>	<i>Après décantation</i>		<i>Après centrifugation</i>		
	<i>La densité optique (Abs_D)</i>	<i>pH_D</i>	<i>La densité optique(Abs_C)</i>	<i>pH_C</i>	<i>Le rendement (%)</i>
0	0.545	4.94	0.545	4.94	0
10	0.497	6.34	0.316	6.23	42.02
20	0.482	6.41	0.31	6.3	43.12
40	0.469	6.51	0.3	6.45	44.95
50	0.451	6.68	0.284	6.56	47.89
80	0.422	6.97	0.233	6.9	57.25
100	0.389	7.32	0.199	7.24	63.49
150	0.397	9.1	0.215	8.9	60.55
200	0.415	9.67	0.257	9.56	52.84
250	0.423	9.84	0.271	9.71	50.28
300	0.446	10.05	0.288	9.89	47.16
350	0.468	10.11	0.291	9.98	46.61
400	0.481	10.25	0.299	10.07	45.14
450	0.498	10.31	0.308	10.15	43.49
500	0.503	10.45	0.315	10.25	42.2

Les annexes

Annexe 5: Le cas de bio-floculant (jus et poudre de cactus).

Tableau IV.18: Le cas de bio-floculant le jus de cactus dilué à 10% :

La concentration de floculant (mg/l)	Après décantation		Après centrifugation		Le rendement (%)
	La densité optique (Abs _D)	pH _D	La densité optique (Abs _C)	pH _C	
0	0.653	5	0.653	5	0
0.1	0.51	5.86	0.281	5.88	56.97
0.2	0.513	5.84	0.284	5.92	56.51
0.3	0.507	5.76	0.295	5.9	54.82
0.4	0.538	5.91	0.306	5.99	53.14
0.5	0.498	6.09	0.315	6.1	51.76
0.6	0.509	6.12	0.313	6.14	52.07
0.8	0.445	6.14	0.284	6.04	56.51
1	0.475	6.2	0.278	6.17	57.43
1.2	0.487	5.65	0.304	5.54	35.73
1.4	0.486	5.56	0.316	5.69	33.19
1.6	0.504	6.07	0.343	5.55	27.48
1.8	0.513	5.8	0.324	5.65	31.5
2	0.509	5.57	0.32	5.62	32.35
2.5	0.483	5.62	0.301	5.65	36.36
3	0.538	5.6	0.332	5.52	29.81
3.5	0.477	5.57	0.296	5.59	37.42
4	0.52	5.52	0.31	5.57	34.46
4.5	0.488	5.4	0.298	5.62	37
5	0.541	5.39	0.336	5.56	28.96
6	0.533	5.37	0.337	5.61	28.75
7	0.527	5.36	0.305	5.44	35.52
8	0.495	5.53	0.299	5.46	36.79
9	0.5	5.39	0.332	5.35	29.81
10	0.516	5.64	0.335	5.32	29.18
12	0.522	5.14	0.31	5.34	33.83
14	0.525	5.05	0.306	5.33	35.31
16	0.537	5.02	0.325	5.14	31.29
18	0.547	4.99	0.332	4.99	29.81
20	0.55	4.81	0.297	4.93	37.21
22	0.581	4.86	0.316	4.96	33.19
25	0.571	4.88	0.343	4.74	27.48
30	0.601	4.68	0.356	4.58	24.74

Les annexes

Tableau IV.19 : Le cas de bio-floculant poudre de cactus:

<i>La concentration de floculant (mg/l)</i>	<i>Après décantation</i>		<i>Après centrifugation</i>		<i>Le rendement (%)</i>
	<i>La densité optique (Abs_D)</i>	<i>pH_D</i>	<i>La densité optique (Abs_C)</i>	<i>pH_C</i>	
0	0.443	5.81	0.443	5.81	0
10	0.426	5.66	0.288	7.6	34.99
20	0.411	5.59	0.284	7.79	35.89
40	0.391	4.86	0.275	5.94	37.92
50	0.357	5.46	0.264	6.6	40.41
100	0.326	5.73	0.244	6.93	44.92
150	0.369	6.95	0.311	7.35	35.34
200	0.377	6.64	0.286	7.69	40.54
250	0.392	6.14	0.29	7.05	39.71
300	0.402	5.93	0.289	7.11	39.92
350	0.415	4.55	0.261	4.85	45.74
400	0.432	4.48	0.271	4.74	43.66
450	0.439	4.35	0.259	4.44	46.15
500	0.441	4.49	0.25	4.65	48.02

Annexe 6:

Tableau I-1 : Présentation de différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés [10].

ACTIVITES	REJETS ASSOCIES
<i>Préparation de la laine</i>	*Rejets liquides fortement chargés en matières en suspension et matières organiques.
<i>Filature</i>	*Aucun rejet liquide (exception pour la filature du lin dite mouillée qui permet d'obtenir des fils fins: rejets équivalents à ceux provenant de la préparation de la laine). *Rejets gazeux constitués essentiellement de poussières.
<i>Tissage/Tricotage</i>	*Présence de poussières. *Présence d'agents d'encollage. *Mais faible consommation en eau, activité considérée comme peu polluante.
• <i>Ennoblissement</i> : <i>Pré- traitement (désencollage, désensimage, débouillissage, mercerisage).</i>	*Rejets contenant des huiles, des cires, de la soude, des détergents et des produits auxiliaires. *Les prétraitements représentent 50% de la pollution organique liée à l'ennoblissement (surtout au niveau du désencollage). *7% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.

Les annexes

<ul style="list-style-type: none"> • Le blanchiment. • Teinture. • Impression. • Apprêts chimiques. 	<p>*Eaux de blanchiment (présence d'organochlorés). *69% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.</p> <p>*Essentiellement constitués d'eau, de colorants non fixés (colorants utilisés souvent insolubles dans l'eau). *12% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.</p> <p>*Eaux d'impression : colorants (même type qu'en teinture mais en concentrations plus importantes), liants, adjuvants (fixation des colorants), épaississant (pour éviter le coulage de la couleur). *10% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.</p> <p>*Eaux de vidange et de nettoyage des machines (produits chimiques).</p> <p>*2% du volume des effluents liés à l'ennoblissement. *Rejets gazeux.</p>
---	--

Tableau I-2 : taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants [1].

Classe de colorant	Fixation(%)	Fibres utilisées
Acide	80-93	laine-nylon
Azoïque	90-95	Acrylique
Basique	97-98	cellulose
De cuve	80-95	cellulose
Direct	70-95	cellulose
Dispersé	80-92	synthétique
Réactif	50-80	cellulose
Soufre	60-70	cellulose

Les annexes

Tableau I-3 : valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents textiles [40].

paramètres	Unité	Valeurs limites	Tolérance aux valeurs limites anciennes installations
Température	C	30	35
PH	-	6.5-8.5	6-9
DBO₅	Mg/l	150	200
DCO	Mg/l	250	300
Matière décantable	Mg/l	0.4	0.5
Matière non dissoute	Mg/l	30	40
Oxydabilité	Mg/l	100	120
permanganate	Mg/l	20	25

Annexe 7:

Tableau III.1: Caractéristique de quelques coagulants [16].

Nom commercial	Masse molaire	Densité	Forme	Formule	Apport en M ₂ O ₃	Remarque
----------------	---------------	---------	-------	---------	---	----------

SELS ALUMINIUM

Sulfate d'alumine	666	-	solide	Al ₂ (SO ₄) ₃ , 18 H ₂ O	17 à 18	Poudre irritante
Sulfate d'alumine	654	1,45	liquide		8,2	Liquide corrosif
Polychlorosulfate basique d'aluminium	-	1,2	liquide	Al _n (OH) _m (SO ₄ ²⁻) _k Cl _{3n-m-2k}		

SEL DE FER

Chlorure ferrique	162,5	1,45	liquide	FeCl ₃	41% Fe	Réactif acide
Sulfate ferrique	278	-	Poudre	FeSO ₄ , 7H ₂ O	20% Fe	
Chlorosulfate ferrique	187	1,5	liquide	FeClSO ₄	14% Fe	Réactif acide

Les annexes

Annexe 8: Matériels et produits utilisés.



Les annexes



Références bibliographiques

- [1]. **Abid A, Zouhri A et Kholtei S (2009).** « Valorisation d'un nouveau bio-floculant (extrait de cactus) dans le traitement physico-chimique des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12 N°2, Pp 321-330.
- [2]. **Flandrin-M Blety (1976),** Technologie et Chimie des Textiles. Edition Cépaduès.
- [3]. **Korichi. A, (2013).** « Traitement d'une eau chargée en colorant de l'industrie textile par le procédé d'électrocoagulation en comparaison avec la coagulation-flocculation », Mémoire de fin d'études Master, Université Saad Dahlab-Blida, Pp81.
- [4]. **Oubagha. N, (2011).** « Décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétique », Mémoire de magister, Université MOULOUUD MAMMERI TIZI OUZOU, Pp116.
- [5]. **H. Roques (1979).** « Fondements théoriques du traitement biologique des eaux ». Volume I. Technique et Documentation, Paris.
- [6]. **WIKIPEDIA 2011, Industrie textile,** valable sur le site Internet : <http://fr.wikipedia.org>.
- [7]. **Lemlikchi. W, (2012).** « Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de co-précipitation », Thèse de doctorat, Université MOULOUUD MAMMERI TIZI OUZOU. Pp169.
- [8]. **I Brossard (1997).** « Technologie des Textiles ». Edition Dunod, Paris.
- [9]. **Bouafia. S, (2010).** « Dégradation des colorants textiles par procédés d'oxydation avancée basée sur la réaction de fenton (application à la dépollution des rejets industriels) », Thèse de Doctorat, Université Saad Dahlab et Université Paris-Est, Pp 154.
- [10]. **CAR/PP, (2002).** « Prévention de la pollution dans l'Industrie textile dans la région méditerranéenne. Centre d'activités régionales pour la production propre ».
- [11]. **Chrétien M. (1991).** « Récupération de la chaleur et filtrage d'air d'échappement lors du perfectionnement textile », Pratique textile au niveau international, 46.
- [12]. **Heimann, P (1991).** « Aide textile et protection de l'environnement ». Melliand Textilberichte, 7.
- [13]. **Benaissa. A, (2012).** « Etude de la faisabilité d'élimination de certains colorants textiles par certains matériaux déchets d'origine naturelle », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Chimie, Université Abou BakrBalkaid, Tlemcen.

[14]. **Kebiche Ounissa, (1996).** « adsorbalité et ionique de quelques colorants cationiques présents dans les effluents liquides de la teinture de l'unité couvertex de Ain. DJASSER ». Thèse de Magistère Université Mentouri Constantine.

[15]. **M. Dore. (1989).** « Chimie des oxydants et traitement des eaux ». Paris.

[16]. **G. Simont (1982).** « *Guide des techniques de l'ennoblissement textile* ». Chapitre 11, édition industrie textile.

[17]. **J.Griffiths (1984).** “Developments in the light absorption properties of dyes–color and photochemical reaction. In: Developments in the Chemistry and Technology of Organic Dyes”. Society of Chemistry Industry, Oxford, pp 1-30.

[18]. **C. Bauer, P. Jacques, A. Kalt, J. Photochem, (2001).** Photobiol. A: chem. 140, 87-92.

[19]. **DEPA, (2000).**, “Survey of azo-colorants in Denmark, Toxicity and fate of azo dyes”, Danish Environmental Protection Agency.

[20]. **M. Stolte, M. (2001).** Vieth, Acta Endosc. 31 (2), 125–130.

[21]. **T.R. Wallace, Juin (2001).** “Biological Treatment of Synthetic Dye Water and an Industrial Textile Wastewater Containing Azo Dye Compounds”. These MASTER de génie des sciences de l'environnement, Faculté de Virginie, Institut Polytechnique.

[22]. **F.P.Vandesee, (2002).** “Anaerobic azo dye reduction”. Thèse de Doctorat. Wageningen University, Pays-Bas.

[23]. **R. Perrin., J.P. Scharef. (1995).** « Chimie industrielle ». Tome 2.Édition Masson Paris.

[24]. **A.B. DOS Santos (2005).** “Reactive decolourisation of deys by thermophilic anaerobic granular sludge”, These Doctorat, Wageningen University (Pay-Bas).

[25]. **J.A. Hawkins., R.R. Evans., T.J. (1985).** Newby, M.H. Johnson-Delivorias T.D.L. Tyler, Vet.Parasitol. 17, 229-238.

[26]. **Belbahloul. M, Zouhri. A et Anouar. A, (2014).** « Cactus Opuntia Ficus Indica: une solution contre la pollution métallique et les Matières En Suspension (Cactus Opuntia Ficus Indica: a solution against the metallic pollution and Suspended Solids)», Université Hassan 1^{er} B.P. 577, Settat, Maroc.

[27]. **Yves Mottot, (2000).** « Coagulants et floculants », Texte de la 279e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée, Pp 10.

[28]. **EPA – Environmental Protection Agency (2000a).** Wastewater Technologie Fact Sheet, Chemical Precipitation, EPA 832-F-00-018, 8 p.

- [29]. **Ndabigengesere, A. et K.S. Narasiah (1998).** "Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds", *Wat. Res.* 32 (3): 781-791.
- [30]. Wang, D., W. Sun, Y. Xu, H. Tang and J. Gregory (2004). "Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl. *Colloids and Surfaces A: Physicochem.*". *Eng. Asp.*.. 243 (1-3): 1-10.
- [31]. **Enjeux – Énergie (2005)** Alberta : une usine pilote transforme le fumier en énergie. Publication du centre Hélios, 4 (11): 1-2, En ligne. www.centrehelios.org. Consulté le 5 janvier 2006.
- [32]. **Al-Mutairi, N.Z. (2005).** "Coagulant toxicity and effectiveness in a slaughterhouse wastewater treatment plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. In Press, Corrected Proof.
- [33]. **Degrémont (2005).** Memento technique de l'eau. Degrémont. France, 785 p.
- [34]. **Jahn, Samia Al Azharia, (1988a).** "Using moringa seeds as coagulants in developing countries". *Journal AWWA*, June 1988, pp. 43-50.
- [35]. Jahn, Samia Al Azharia (1989a). "Synopsis on natural coagulants for water treatment. In: Proceedings of international seminar on the use of natural coagulants for water treatment, Yogyakarta, 2-7, Indonesia, 25pp.
- [36]. **Folkard G (1997).** "The development of the Moringa oleifera and stenopetala tree to provide valuable products: coagulant for water/wastewater treatment and vegetable oil". Rapport à la Commission Européenne, DG 12, projet de recherche n° TS3*CT94-0309.
- [37]. **Broin M., Joet T. (2002).** « Production de la protéine MO2.1 dans des bactéries et utilisation dans des tests de flocculation. In : Saint Sauveur, Appora, Besse et Fuglie, Potentiel de développement pour les produits du Moringa », Actes de l'atelier international de Dar es Salaam.
- [38]. **Jahn, Samia Al Azharia (1999).** "From clarifying pearls and germs to water coagulation with alum. History, surviving practices and technical assessment". *Anthropos* 94. 1999: 419-430.
- [39]. **HADJ-KOUIDER. S (2011).** "Caractérisation et traitement des boues d'épuration de la region d'Alger", Mémoire de Magister en chimie industrielle, Université Saad Dahlab-Blida.
- [40]. **Oued zenati., Dr.Kaddem Salah eddine (1990).** « Les plantes médicinales en Algérie, 3emeédition page : 73.
- [41]. **Avallone R, Plessi M., Baraldi M. and Monzani A. (1997),** "Determination of Chemical Composition of Carob (*Ceratonia siliqua*): Protein, Fat, Carbohydrates, and Tannins, *Journal of food composition and analysis*", Vol.10, pp.166–172.
- [42]. **Wallace R. S., S. L. Dickie., (1997).** "Systematic implications of chloroplast DNA sequences variation in the Opuntioideae". In D. R. Hunt and N. P. Taylor [eds.], *Studies in the Opuntioideae (Cactaceae)*, David Hunt, The Manse, Chapel Lane, Milborne Port Sherborne, UK: 9–24.

[43]. Russel C.E. et Felker P (1987). “The prickly oears (Opuntia spp, Cactaceae): A source of Human and Animal food in semiarid regions”. Economic Botany, 41 (3), 433-445.

[44]. Kerma. H (2014). « Conditionnement des boues résiduaires de la station d'épuration des eaux usées urbaines de BENI-MESSOUS (W. ALGER) par un procédé combine: électrocoagulation/ajout d'un bio-floculant (extrait du cactus) », Mémoire de fin d'étude de Master, Université de Blida 1, Pp 121.

[45]. Jingdong Zhang et coll (2006). “A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment”. Process Biochemistry, 41, 730-733.

[46]. Yin, CY (2010). “Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment”. Process Biochemistry, vol. 45, p de 1437, 1444.

[47]. Soubourou C., Noel H., Fécamp C., Vergnaud F., Guézennec A. G., Groeninck D., Coursier C., Collonge D., Jourdain T., De Paul C., Défarge C (2010). « Impact environnemental des floculants de type polyacrylamide. Amélioration des procédés et mise en place de solutions alternatives.

[48]. Ademe, Dabee (2006). « Séparation mécanique», Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Département Industrie et Agriculture.

[49]. Ahmed A. Fadel and Robert Baumann (1990). « Tube Settler modeling » journal of environmental engineering (New York), vol 116 No 1, pp 107 – 124.

[50]. Héctor Ricardo Hernández De León (2006). « Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable», Thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de Toulouse.

[51]. Claude Cardot (1999). « Les traitement de l'eau, Procédés physico-chimiques et biologique », cours et problèmes résolus – Edition Marketing.S.A.

[52]. Raymond Desjardins; (1997). « le traitement des eaux » édition de l'école polytechnique de Montréal.

[53]. Kherifi W, (2009). « Etude de la cinétique de sédimentation des matières en suspension dans le calcul des décanteurs », Mémoire de Magister, Université BADJI-Mokhtar- ANNABA.

[54]. Degrémont ; 9^e édition (1989). Mémento technique de l'eau.

[55]. W.J.Masschlein; traduit par H.Chevrolet .(1992). « Processus unitaires du traitement de l'eau potable ». Brussels ,Belgium.New York ; 692 p.

[56]. Miller SM, Fugate E J, Craver VO, Smith J A, Zimmerman J B (2008). “Toward understanding the efficacy and mechanism of Opuntia spp. As a natural coagulant for potential application in water treatment”. Environmental Science Technology, vol 42, p 4274-4279.

[57]. Monjauze A et Le Houerou H.N (1965). « Le rôle des Opuntia dans l'économie agricole nord africaine », Bultin de l'Ecole Nationale Supérieur d'Agriculture de Tunis 8-9, p 85-164.