

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DJILALI BOUNAAMA DE KHEMIS MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master

En génie des procédés

Spécialité : génie des procédés de l'environnement

Etude comparative sur l'élimination d'un colorant, par électrocoagulation et par utilisation des cladodes de l'Opuntia Ficus Indica

Présenté par :

-Bouyekhf Bouchra Nour Elhouda

-Bouzidi Manel

Soutenu devant le jury :

Président : Mr Khadraoui Abdelkader

Examineur : Mr Boudechiche Noureddine

Promotrice : Mme Mesli Chahrazad

Année universitaire :2022-2023

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la patience de mener ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos vifs remerciements à notre promotrice Mme Chahrazad MESLI, pour avoir assuré la direction de ce mémoire, pour nous avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, sa disponibilité, ses critiques judicieuses, son attention inlassable, et pour le temps qu'elle a consacré à nous apporter, les outils indispensables à la conduite de cette recherche.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur Khadraoui.A et Boudechiche.N, pour avoir accepté de faire partie du jury d'examination de notre travail.

Nous remercions de même, tous nos enseignants du département de génie des procédés, pour tout le savoir, que nous avons acquis grâce à eux durant notre formation.

Nous tenons à remercier nos parents qui ont été plus que des pères. Ils étaient des amis et des frères.

Nombreuses sont les personnes de notre famille, qui nous ont apporté de l'aide et du soutien, nous tenons à leurs présenter nos remerciements les plus sincères.



Dédicace

Je dédie ce travail :

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

A ma chère sœur, Soumia pour son encouragement permanent, et son soutien moral,

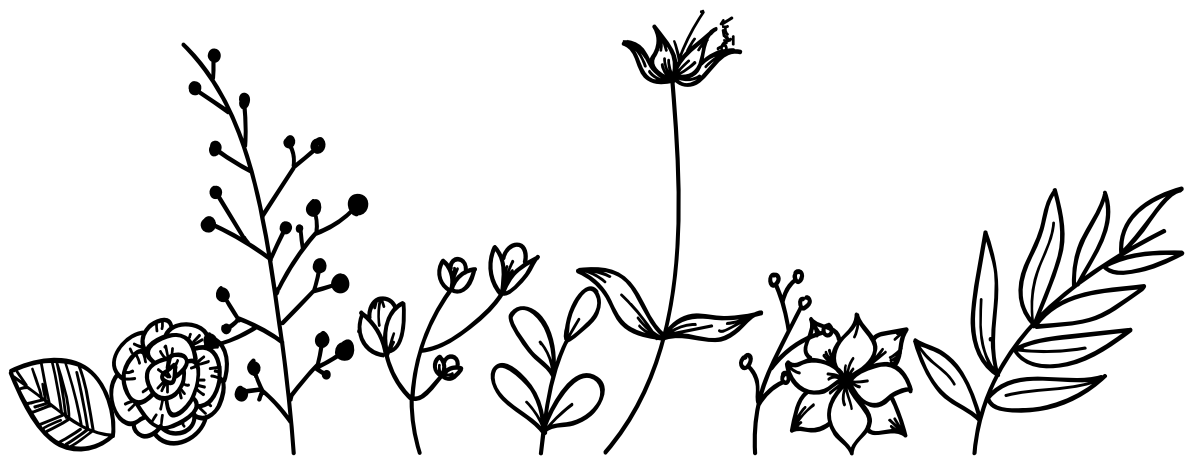
A mes chers frères, Sidehmed, Amine et Habib pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Bouzidi Manel



Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mes grands-parents et mes chers parents, pour tous leurs sacrifices,
leurs amours, leur tendresse, leurs soutiens et leurs prières tout au long
de mes études,*

*A ma chère sœur, Chiamaa pour son encouragement permanent, et Son
soutien moral,*

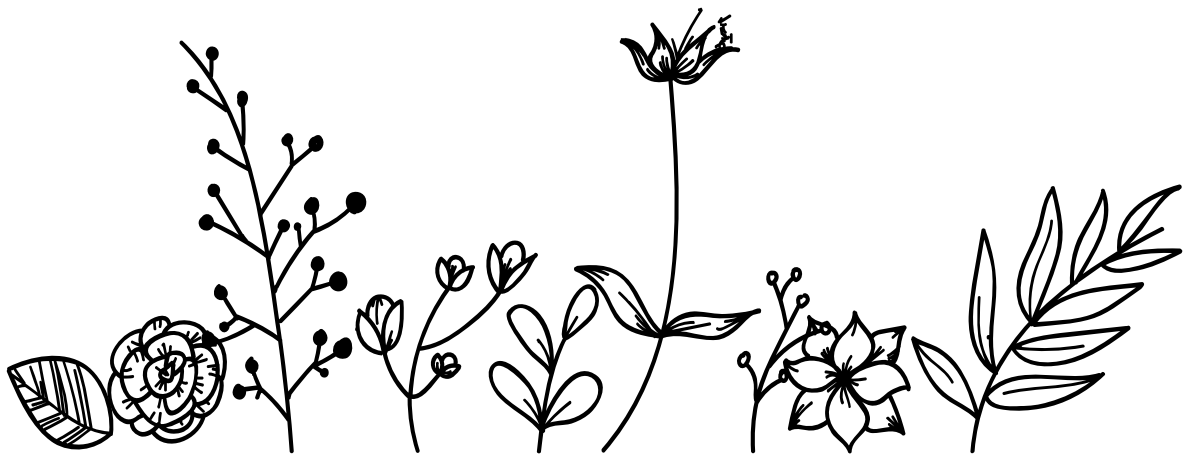
A mon cher frère, Nour Eddine pour son appui et son encouragement,

*A toute ma famille, BOUYEKHF et TAIBI pour leurs soutiens tout au
long de mon parcours universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le
fruit de votre soutien infailible,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Bouyekhf Bouchra Nour Elhouda



ملخص

يتعلق هذا العمل بدراسة مقارنة ، حول القضاء على صبغة النسيج ، أخضر الملكيت (vert de malachite) ، من ناحية، باستخدام عصير التين أشوكي (*Opuntia Ficus Indica*) (الطريقة البيولوجية) ومن ناحية أخرى ، عن طريق عملية التخثر الكهربائي.

عصير الصبار المستخدم قابل للاستخراج بسهولة، قابل للتحلل الحيوي، غير ملوث، اقتصادي ومتاح على نطاق واسع في الجزائر .

يتم اختبار فعالية هذا المفلطح الحيوي من خلال النسبة المئوية للقضاء على الصبغة ، بتركيزات مختلفة وفي درجة حموضة مختلفة. وهو يساوي 89.13% في 80 مل من العصير المستخرج من أوراق التين أشوكي، مع درجة حموضة أساسية تساوي 9.

بالنسبة لعملية التخثر الكهربائي، تم تحسين بعض معاملات التشغيل، وهي كثافة التيار، ومدة التحليل الكهربائي، الرقم الهيدروجيني للمحلول المراد معالجته وكتلة الملح (NaCl) المستخدمة كمحلل كهربائي.

ونتيجة لذلك، يتم الحصول على أفضل معدلات التخفيض بنسبة 96.6% من أخضر الملكيت بكثافة 0.5 أمبير ، بعد فترة 50 دقيقة من التحليل الكهربائي ، عند درجة حموضة تساوي 6.4 ومع 3 جم من NaCl.

من المعايير المقارنة المهمة التي يجب أخذها في الاعتبار، بالنسبة للعملية المستخدمة، جانب الطاقة، الذي ينعكس في كمية الكهرباء المستهلكة.

في ضوء هذه النتائج، يتبين أن عصير الصبار عامل تبييض بيئي فعال ويمكن اعتباره بديلاً للمشكلات المتعلقة بالطاقة والأداء البيئي.

الكلمات المفتاحية: أخضر الملكيت ، التين أشوكي (*Opuntia Ficus Indica*) ، التخثر الكهربائي.

Résumé

Ce travail porte sur une étude comparative, sur l'élimination d'un colorant textile, le vert de malachite, d'une part, par l'utilisation du jus des cladodes de *Opuntia Ficus Indica* (méthode biologique) et d'autre part, par le procédé d'électrocoagulation.

Le jus de cactus utilisé, est facilement extractable, biodégradable, non polluant, économique et largement disponible en Algérie.

L'efficacité de ce bio-floculant est testée par le pourcentage d'élimination du colorant, à différentes concentrations et à divers pH. Il est égal à 89.13% dans 80 ml du jus extrait des cladodes, à pH basique égale à 9.

Pour le procédé d'électrocoagulation, certains paramètres opératoires ont été optimisés, à savoir l'intensité de courant, la durée de l'électrolyse, le pH de la solution à traiter et la masse du sel (NaCl) utilisé comme électrolyte.

Il en résulte que les meilleurs taux d'abattement de 96,6 % du vert de malachite, sont obtenus à une intensité de 0.5 A, après une durée de 50 minutes d'électrolyse, à un pH égal à 6,4 et avec 3g de NaCl.

Un paramètre comparatif important à prendre en considération, pour les deux procédés utilisés, est l'aspect énergétique, traduit par la quantité d'électricité consommée.

En vue de ces résultats, le jus de cactus s'avère être un agent décolorant efficace, écologique et peut être envisagé comme une solution alternative aux problèmes, liés à la performance énergétique et environnementale.

Mots clés : Vert de malachite, *Opuntia Ficus Indica*, Electrocoagulation.

Abstract

This work concerns a comparative study on the removal of a textile dye, malachite green, using the juice of *Opuntia Ficus Indica* cladodes (biological method) on the one hand, and the electrocoagulation process on the other.

The cactus juice used is easily extractable, biodegradable, non-polluting, economical and widely available in Algeria.

The effectiveness of this bio-flocculant is tested by the percentage of dye removal, at different concentrations and pH levels. It is equal to 89.13% in 80 ml of juice extracted from cladodes, at a basic pH equal to 9.

For the electrocoagulation process, certain operating parameters were optimized, namely current intensity, electrolysis duration, pH of the solution to be treated and the mass of salt (NaCl) used as electrolyte.

As a result, the best removal rates of 96.6% of malachite green were obtained at a current of 0.5 A, after 50 minutes of electrolysis, at a pH equal to 6.4 and with 3g of NaCl.

An important comparative parameter to be taken into consideration, for both processes used, is the energy aspect, translated by the amount of electricity consumed.

In view of these results, cactus juice proves to be an effective, environmentally-friendly bleaching agent and can be considered as an alternative solution to the problems associated with energy and environmental performance.

Key words: Malachite green, *Opuntia Ficus Indica*, Electrocoagulation.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des tableaux | |
| Liste des figures | |
| Liste des photos | |
| Liste des abréviations | |
| Introduction générale. | 01 |
| Chapitre I : Généralités sur les colorants | |
| I.1-Historique des colorants. | 04 |
| I.2-Définition du colorant. | 04 |
| I.3-Utilisation des colorants. | 06 |
| I.4-Classification des colorants. | 07 |
| I.4.1- Classification des colorants selon leurs natures. | 07 |
| I.4.1.1- Colorants naturels. | 07 |
| I.4.1.2- Colorants synthétiques. | 07 |
| I.4.2- Classification chimique. | 07 |
| I.4.3-Classification tinctoriale. | 10 |
| I.5-Définition du vert de malachite. | 12 |
| I.6-Utilisation. | 12 |
| I.7-Propriétés de vert de malachite. | 12 |
| I.8-Toxicité. | 14 |
| I.10-Conclusion. | 14 |

Chapitre II : Généralités sur l'*Opuntia Ficus Indica*

| | |
|--|----|
| II.1-Introduction. | 16 |
| II.2-Histoire. | 16 |
| II.3-Situation actuelle. | 17 |
| II.3.1-L'Afrique. | 17 |
| II.3.2-L'Europe. | 18 |
| II.3.3-L'Asie. | 18 |
| II.3.4-L'Amérique. | 18 |
| II.4-Répartition de l' <i>Opuntia</i> en Algérie. | 18 |
| II.5-Description morphologie. | 19 |
| II.6-Composition chimique. | 21 |
| II.6.1-Les Principaux Composants des Cladodes. | 22 |
| II.6.1.1-Les minéraux. | 22 |
| II.6.1.2-Les glucides. | 22 |
| II.6.1.3-Acides organique. | 22 |
| II.6.1.4-Acides aminés. | 23 |
| II.7- Nom et classification. | 23 |
| II.8-Utilisation du figuier de Barbarie. | 24 |
| II.9-Conclusion. | 26 |
| Chapitre III : L'électrocoagulation | |
| III.1-Introduction. | 28 |
| III.2-Définition. | 28 |
| III.3- Description de la technique d'électrocoagulation. | 29 |

| | |
|---|----|
| III.4-Loi de faraday. | 32 |
| III.5-Energie électrique consommée | 32 |
| III.6-Facteurs affectent le processus d'électrocoagulation. | 33 |
| III.7-Avantages et inconvénients. | 33 |
| III.7.1- Avantages du procédé d'électrocoagulation. | 34 |
| III.7.1- Les inconvénients du procédé d'électrocoagulation. | 35 |
| III.8-Conclusion. | 35 |
| Chapitre IV : Matériel et méthodes d'analyses | |
| IV.1-Introduction. | 37 |
| IV.2-Matériel et méthodes. | 37 |
| IV.2.1-Appareillage. | 37 |
| IV.2.1.1-Le spectrophomètre UV-visible. | 37 |
| IV.2.1.2-Le pH. | 38 |
| IV.3 Effet du jus de cactus sur le colorant. | 39 |
| IV.3 .1-Méthode d'extraction. | 39 |
| IV.3 .1.2- Solution du colorant synthétique. | 40 |
| IV.3 .3-Démarche expérimentale. | 41 |
| IV.4- Elimination du colorant par le procédé de l'électrocoagulation. | 41 |
| IV.4.1-Dispositif expérimental. | 42 |
| IV.4.2-Démarche expérimentale. | 42 |
| IV.4.3 Les plaques d'électrodes avant et après l'électrolyse. | 43 |
| Chapitre V : Résultats et discussion | |
| V.1-Introduction. | 45 |

| | |
|---|----|
| V.2 Détermination de la longueur d'onde maximale | 45 |
| V.3-Courbe d'étalonnage. | 46 |
| V.4 -Effet du jus de cactus sur l'élimination du colorant. | 47 |
| V.4.1-Effet de la variation du volume de jus de cactus. | 47 |
| V.4 .2-Effet de la variation du pH du mélange. | 49 |
| V.5-Elimination du colorant par le procédé de l'électrocoagulation. | 50 |
| V .5.1-Effet de variation du pH. | 50 |
| V.5.2-Effet de la variation de l'intensité. | 54 |
| V.5 .3-Effet de la salinité. | 58 |
| V.6- Etude comparative. | 60 |
| Conclusion générale. | 63 |
| Références bibliographiques. | 64 |

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les colorants

Tableau I.1 Principaux groupements chromophores et auxochromes classé par intensité croissante. 06

Tableau I.2 Classification tinctoriale des colorants. 11

Tableau I.3 Couleur du vert de malachite en fonction du pH. 14

Chapitre II : Généralités sur l'*Opuntia Ficus Indica*

Tableau II.1 Principaux composants des cladodes du figuier de Barbarie. 22

Tableau II.2 Classification de genre *Opuntia*. 24

Chapitre V : Résultat et discussion

Tableau V.6 Eléments comparatifs pour les deux procédés de décoloration. 61

Listes des Figures

Chapitre I : Généralités sur les colorants

| | |
|---|----|
| Figure I.1 Domaines d'absorption des quelques couleurs. | 05 |
| Figure I.2 Formule chimique des azoïques | 08 |
| Figure I.3 Formule chimique des anthraquinoniques. | 08 |
| Figure I.4 Formule chimique des triphénylméthanés. | 08 |
| Figure I.5 Formule chimique des indigoïdes. | 09 |
| Figure I.6 Formule chimique des xanthènes. | 09 |
| Figure I.7 Formule chimique des phtalocyanines. | 09 |
| Figure I.8 Formule chimique de nitrosés. | 10 |
| Figure I.9 Formule chimique de vert de malachite. | 12 |
| Figure I.10 Structure moléculaire du vert de malachite. | 13 |

Chapitre II : Généralité sur l'*Opuntia ficus indica*

| | |
|--|----|
| Figure II.1 Répartition mondiale de L' <i>Opuntia Ficus Indica</i> . | 17 |
| Figure II.2 La plante de figue de barbarie. | 20 |
| Figure II.3 Les Feuilles de la Plante. | 20 |
| Figure II.4 Les Fleures de la Plante. | 21 |
| Figure II.5 Les Fruits de La Plante. | 21 |

Chapitre III : L'électrocoagulation

| | |
|--|----|
| Figure III.1 Schéma du principe d'électrocoagulation. | 30 |
| Figure III.2 Diagramme de Pourbaix des espèces de fer en fonction du pH. | 31 |

Chapitre V : Résultat et discussion

| | |
|--|----|
| Figure V.1 Spectre d'absorption en UV-visible du colorant | 45 |
| Figure V.2 Courbe d'étalonnage du vert de malachite à 617nm. | 46 |
| Figure V.3 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction de volume de jus de cactus. | 47 |
| Figure V.4 Variation du pH en fonction de volumes de jus de cactus. | 49 |
| Figure V.5 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction de variation du pH. | 50 |
| Figure V.6 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction du temps, à différents pH | 51 |
| Figure V.7 Evolution de la tension en fonction du temps à différents pH. | 52 |
| Figure V.8 Variation de la masse de l'anode en fonction du pH. | 53 |
| Figure V.9 L'évolution du pH en fonction du temps | 54 |
| Figure V.10 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction de temps à différentes intensités. | 55 |
| Figure V.11 Variation de la tension en fonction du temps à différentes intensités. | 56 |
| Figure V.12 Variation de la masse de l'anode en fonction de différentes intensités. | 57 |
| Figure V.13 L'énergie électrique consommée en fonction de l'intensité. | 58 |
| Figure V.14 Effet de la masse de NaCl sur l'élimination du colorant en fonction du temps. | 59 |
| Figure V.15 L'évolution du pH en fonction du temps. | 60 |

Liste des Photos

Chapitre IV : Matériel et méthode d'analyse

| | |
|--|----|
| Photo IV.1 Spectrophotomètre UV-visible (UV 3100). | 38 |
| Photo IV.2 pH-mètre (basic 20). | 39 |
| Photos IV.3 (a) La cladode, (b) La cladode après le découpage, (c) Jus de cactus. | 40 |
| Photos IV.4 Solution de vert de malachite. | 41 |
| Photos IV.5 Dispositif expérimental 1)-alimentation en DC, 2)-multi-paramètre ,3)-solution du vert de malachite, 4)-cathode, 5)-anode, 6)-agitateur magnétique | 42 |
| Photos IV.6 Les électrodes en fer (a).Avant l'électrolyse, (b). Après l'électrolyse. | 43 |

Abréviation

Abs : Absorbance

C. N. R. E. F : Le Centre national de La Recherche et l'Expérimentation Forestière

DC : Courant direct

DSA : La Direction des Services Agricoles

EC : Electrocoagulation

FDA: Food and Drug Administration

OFI: Opuntia Ficus Indica

UV : Ultra Violet



Introduction générale

Introduction générale

L'eau et l'environnement sont menacés par la pollution qu'elle soit d'origine industrielle, urbaine, ou naturelle. En effet, un grand nombre de composés toxiques y sont solubles à des concentrations élevées. Un milieu aquatique est dit pollué lorsque son équilibre est modifié de façon durable par l'apport en quantités trop importantes soit de substances plus ou moins toxiques, d'origine naturelle ou issue d'activités humaines.

Dans les industries de textiles, les rejets polluants entraînent de sérieux problèmes sur l'environnement à cause de leur coloration intense, leurs teneurs élevées en matières organiques difficilement biodégradables (détergeant, tensioactifs etc.), en matières en suspension et en sels (**Bengueddach et Moursli.2010**).

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.

Néanmoins, les traitements biologiques sont meilleurs que d'autres méthodes, mais la toxicité des colorants empêche habituellement, la croissance bactérienne limitant ainsi l'efficacité de la décoloration. Les méthodes physico-chimiques sont généralement basées sur l'adsorption (par exemple sur le charbon actif), la coagulation-floculation (en utilisant les sels inorganiques ou les polymères), l'oxydation chimique (chloration, ozonisation, etc.) et la photo dégradation (UV/H₂O₂, UV/TiO₂, etc.).

Cependant, ces méthodes de traitements consomment habituellement une quantité importante de produits chimiques, qui conduisent parfois à une pollution secondaire et à un volume énorme de boues.

Il s'est récemment avéré, que les techniques de traitement des eaux polluées, basées sur la technique d'électrocoagulation, économiquement attractive, permettent d'éviter la majorité de ces problèmes. Cependant, il est envisageable de rencontrer des complications de réalisation et d'optimisation du procédé d'électrocoagulation (**Tiaiba et al.2019**).

L'objectif de notre travail est une étude comparative, sur l'élimination d'un colorant textile le vert de malachite, par l'utilisation du jus des cladodes de *Opuntia Ficus Indica* (méthode biologique) et par le procédé d'électrocoagulation.

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties.

Introduction générale

La première partie est consacrée à la synthèse bibliographique. Elle comprend trois chapitres :

- ▶ Chapitre I : Une étude bibliographique sur les colorants textile et leur impact sur l'environnement.
- ▶ Chapitre II : Généralités sur *l'Opuntia Ficus Indica*.
- ▶ Chapitre III : Nous avons donné une synthèse bibliographique qui rassemble des données essentielles sur le procédés de l'électrocoagulation.

La deuxième partie renferme la partie d'expérimentation, qui est subdivisée en deux chapitres :

- ▶ chapitre IV : Montre la procédure expérimentale adopté et les méthodes d'analyses utilisées pour le traitement.
- ▶ Chapitre V : Consacrée à la présentation des différents résultats expérimentaux obtenus ainsi que leurs discussions.

En fin on termine notre travail par une conclusion générale.



Chapitre I :

Généralités sur les colorants

Généralités sur les colorants

I.1-Historique ces colorants

L'utilisation des colorants dans la vie humaine date de l'antiquité. Des populations primitives ont utilisé les peintures pour les décors corporels, les anciens égyptiens ont aussi utilisé les colorants pour teindre les rupestres et les céramiques. A l'époque, les matières colorantes utilisées étaient d'origine naturelle extraites soit des végétaux comme l'indigo ou d'animaux comme le carmin qui est extrait de la cochenille. L'utilisation de ces colorants naturels s'est prolongée jusqu'à la première moitié du 19ème siècle (**Berkane.2019**).

L'industrie des colorants synthétiques est née en 1856 , quand le chimiste anglais W. H. Perkin, dans une tentative de synthèse de la quinine artificielle, pour soigner la malaria a obtenu la première matière colorante synthétique qu'il appela "mauve" (aniline, colorant basique). Perkin a breveté son invention et a installé une chaîne de production, qui serait bientôt suivie par d'autres. De nouveaux colorants synthétiques commencent à apparaître sur le marché. Ce processus a été stimulé par la découverte de la structure moléculaire du benzène en 1865 par Kékulé. En conséquence, au début du 20ème siècle, les colorants synthétiques ont presque complètement supplantés les colorants naturels (**Merzoug.2014**).

Les colorants sont employés aussi dans différents domaines à savoir: la coloration du papier, du cuir, des matières plastiques, vernis, peintures, encres, cosmétique, produits pharmaceutiques, et en biologie coloration des préparations microscopiques ainsi que dans les indicateurs colorés de pH(**Zawlotski.2004**).

I.2-Définition du colorant

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre une substance d'une manière durable. Il possède des groupements qui lui confèrent la couleur appelés chromophores et des groupements qui permettent sa fixation: auxochromes. Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750nm)(**Capon et al.1993**). La couleur est donnée par la fraction de lumière non absorbée par le colorant (figure I-1).

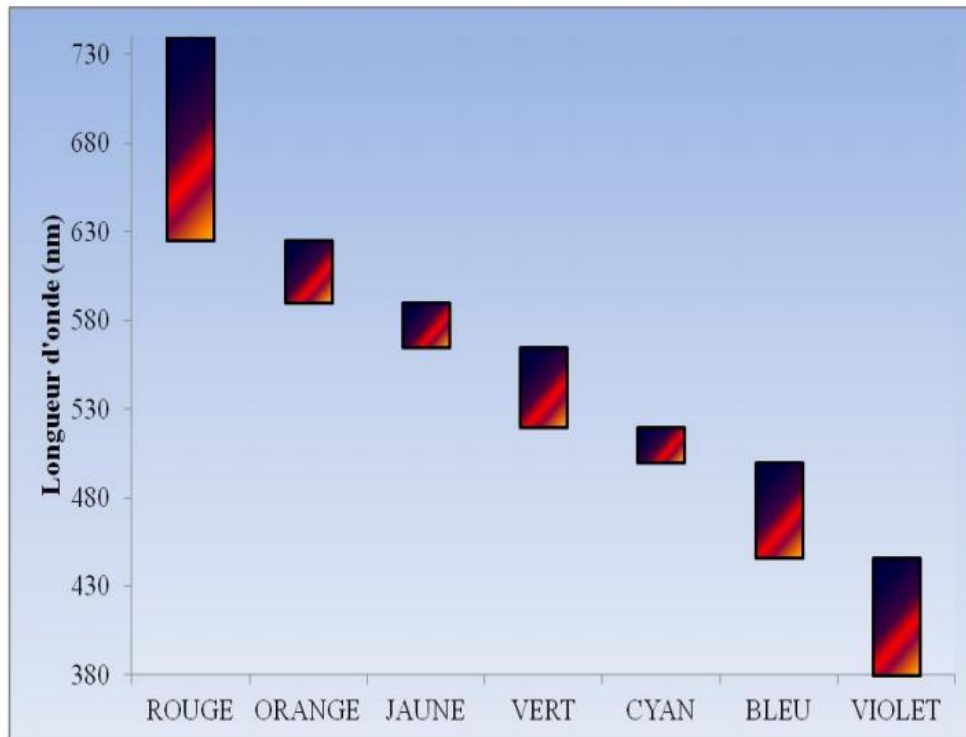


Figure I.1 Domaines d'absorption de quelques couleurs (Zhenwang et al.2000).

La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophores. La molécule colorante est un chromogène (l'assemblage de groupe chromophore et auxochrome forme le chromogène). Plus le groupement chromophore donne facilement un électron, plus la couleur est intense (**Capon et al.1993**).

Le tableau I.1 donne les groupements chromophores et auxochromes classés par intensité croissantes :

Généralités sur les colorants

Tableau I.1 Principaux groupements chromophores et auxochromes classé par intensité croissante (Zawlotski.2004).

| Groupements chromophores | Groupements auxochromes |
|------------------------------------|--|
| Azo (-N=N-) | Amino (-NH ₂) |
| Nitroso (-NO ou -N-OH) | Méthyl amino(-NHCH ₃) |
| Carbonyl (=C=O) | Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂) |
| Vinyl (-C=C-) | Hydroxyl (-OH) |
| Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH) | Alkoxy (-OR) |
| Sulfure (>C=S) | Groupements donneurs d'électrons |

I.3-Utilisation des colorants

L'industrie Hydroxyle (-HO) des colorants constitue un marché économique considérable car de nombreux produits industriels peuvent être colorés, principalement (Chebli.2012):

.Dans l'industrie textile, fourrure, cuir (textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport, textiles à usage médical etc.).

.Dans l'industrie des matières plastiques (pigments). X Dans l'industrie du bâtiment : peintures (pigments), matériaux de construction, céramiques etc.

.Dans l'imprimerie (encres, papier).

.Dans l'industrie pharmaceutique (colorants).

.Dans l'industrie des cosmétiques (dont les colorations capillaires).

.Dans l'industrie agroalimentaire (colorants alimentaires).

Généralités sur les colorants

.Dans diverses industries, utilisées pour des carburants et des huiles (Chebli.2012).

I.4-Classification des colorants

D'une façon générale, et d'un point de vue atomistique, les colorants peuvent être soit inorganiques (les atomes de carbone ne sont pas majoritaires dans la composition chimique de la molécule), soit organiques (abondance de carbone dans la formule chimique). Beaucoup d'auteurs ont proposés plusieurs classifications des colorants en se basant sur différents critères(Chebli.2012) :

I.4.1- Classification des colorants selon leurs natures

Le colorant, qu'il soit organique ou inorganique, peut être d'origine naturelle ou synthétique (Chebli.2012).

I.4.1.1- Colorants naturels

Il existe seulement une dizaine de colorants naturels, ils sont extraits des plantes, des fruits, des arbres, des lichens, des insectes ou des mollusques par des procédés simples comme le chauffage ou le broyage(Boukaous.2014).

I.4.1.2- Colorants synthétiques

Ce sont des composés ayant comme matières premières des molécules telles que le benzène, issu de la distillation de la houille. A partir des matières premières, c'est grâce à une série de procédés chimiques, qui correspondent en général au remplacement d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène du produit de départ par des éléments ou des radicaux particuliers pour avoir ce qu'on appelle les intermédiaires. Ces intermédiaires serviront à la fabrication du colorant final (Boukaous.2014).

I.4.2-Classification chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (Kadari.2016) :

- Les colorants azoïques : Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques(Kadari.2016).

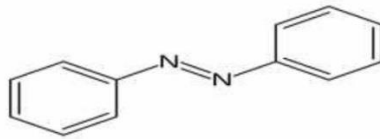


Figure I.2 Formule chimique des azoïque (Berkane.2019).

▪ Les colorants anthraquinoniques : le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino (Kadari.2016).

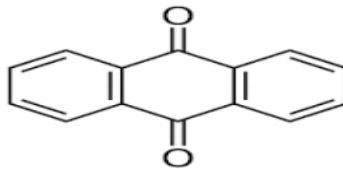


Figure I.3 Formule chimique des anthraquinoniques (Berkane.2019).

▪ Les colorants triphénylméthanés : La coloration intense des triphénylméthanés provient du large système conjugué de l'ion cationique. Le carbocation central est en conjugaison avec les trois noyaux benzéniques, par lesquels la charge positive est fortement délocalisée (Kadari.2016).

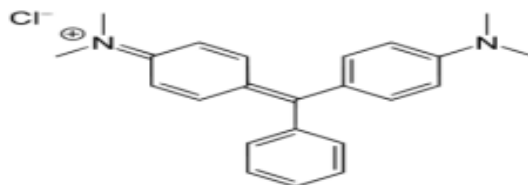


Figure I.4 Formule chimique des triphénylméthanés (Berkane.2019)

▪ Les colorants indigoïdes : Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Le plus important des colorants indigoïdes est l'indigo lui-même, qui à la structure suivante (Kadari.2016):

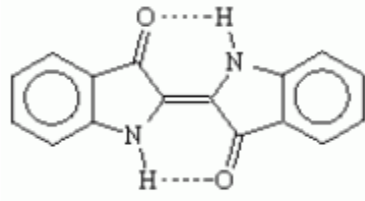


Figure I.5 Formule chimique des indigoïdes(Berkane.2019).

▪ Les colorants xanthènes : Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Le composé le plus connu est la fluorescéine. Peu utilisés en tant que teinture (**Kadari.2016**).

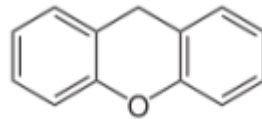


Figure I.6 Formule chimique des xanthènes (Berkane.2019).

▪ Les phtalocyanines : Les phtalocyanines ont une structure complexe basée sur l'atome central de cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.)(**Kadari.2016**).

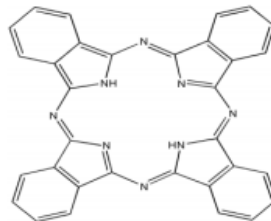


Figure I.7 Formule chimique des phtalocyanines(Berkane.2019).

▪ Les colorants nitrés et nitrosés : leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électro donneur (hydroxyle ou groupes aminés) (**Kadari.2016**).

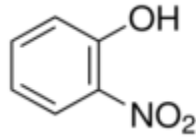


Figure I.8 Formule chimique des nitrosés(Berkane.2019).

I.4.3-Classification tinctoriale

Si la classification chimique présente un intérêt pour les fabricants de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaine d'application (tableau I.2). Ainsi il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de fixation ; celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant-substrat est de type ionique, hydrogène de Van der Waals ou covalente. Il ya différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes (**Shour.1990**).

Généralités sur les colorants

Tableau I.2 Classification tinctoriale des colorants (Zawlotski.2004).

| Colorants | Caractéristiques et propriétés générales |
|-------------------------|--|
| Réactifs | <ul style="list-style-type: none">-Présence de groupes chromophores issue essentiellement des familles azoïques, anthraquinoniques et phtacyanines-Présence d'une fonction chimique réactive de type triazinique ou vinylsulfone assurant la formation d'une liaison covalente forte avec les fibres-Solubles dans l'eau |
| Colorants à mordant | -Présence d'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. |
| Colorants de cuve | <ul style="list-style-type: none">-Insolubles dans l'eau-Utilisés pour l'application de l'indigo qui nécessite la préparation d'une cuve de bonne résistance aux agents de dégradation. |
| Directs | <ul style="list-style-type: none">-Capables de former des charges positives ou négatives électrostatiquement attirées par les charges des fibres.- Affinités élevées pour les fibres cellulosiques sans application de mordant (teindre directement le coton).-Prix modéré, facilité d'application et faible solidité aux traitements de lavage. |
| Acides ou anioniques | <ul style="list-style-type: none">-Solubles dans l'eau grâce à leurs groupes sulfonâtes ou carboxylates.-Affinités élevées aux fibres textiles.-Permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide). |
| Basiques ou cationiques | <ul style="list-style-type: none">-Solubles dans l'eau (car ils sont des sels d'amines organiques)-Forment des liaisons entre leurs sites cationiques et les sites anioniques de faibles résistances à la lumière. |
| Dispersés | <ul style="list-style-type: none">-Très peu solubles dans l'eau.-Application sous forme d'une fine poudre dispersée dans le bain de teinture. |

I.5-Définition du vert de malachite

Le vert de malachite (ou vert d'aniline, ou vert de diamant B) est un produit chimique cationique principalement connu pour ses qualités de colorant bleu-vert (Suhās et al.2007).

I.6-Utilisation

Le vert de malachite est un composé organique qui est utilisé en tant que matière colorante pour des matériaux tels que la soie, le cuir, la laine, le jute, le coton et le papier. Il est également utilisé comme colorant alimentaire, additif, désinfectant médical et anthelminthique (un médicament destiné à débarrasser l'organisme humain ou animal de la présence des helminthes). Il est controversé en tant qu'agent antimicrobien dans l'aquaculture en raison des risques qu'il présente pour les consommateurs de poisson traité (Chen et al.2006).

I.7-Propriétés du vert de malachite

Formule chimique: $C_{52}H_{54}N_4O_{12}$

Structure chimique du vert de malachite (Gnaoui.2017):

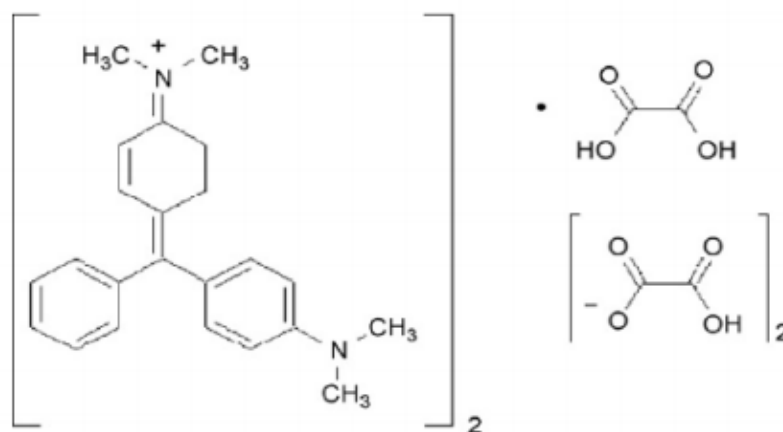


Figure I.9 Formule chimique du vert de malachite

Généralités sur les colorants

Nomenclature : triphénylméthane diamine.

Masse moléculaire : 927,00 g/mol.

Apparence : cristaux vert foncé

Goût : La solution aqueuse du vert de malachite à un goût légèrement amer

Structure moléculaire du vert de malachite (**Gnaoui.2017**):

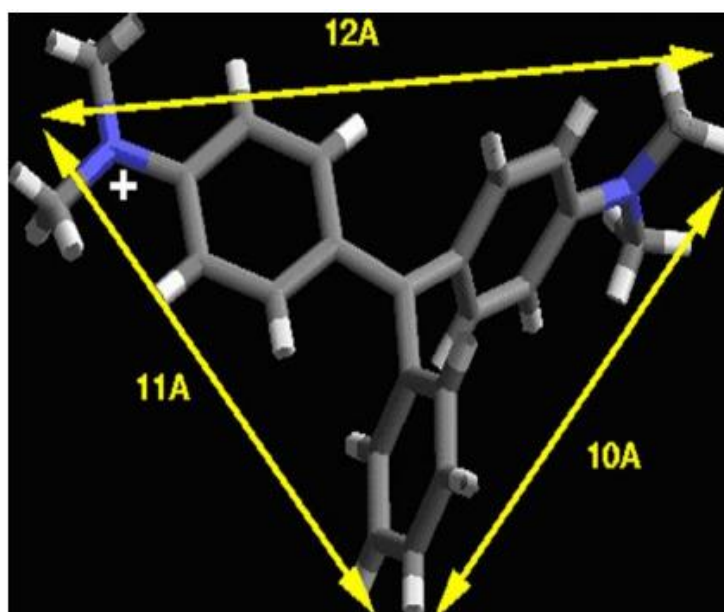


Figure I.10 Structure moléculaire du vert de malachite(**Gnaoui.2017**).

Le vert de Malachite est utilisé comme indicateur coloré dans les dosages acido-basiques en chimie. Il possède trois formes différentes caractérisées par différentes couleurs qui permettent de déterminer le pH d'une solution (**Gnaoui.2017**).

Généralités sur les colorants

Tableau I.3 Couleur du vert de malachite en fonction du pH (Gnaoui.2017).

| | | | |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| Couleur du vert de malachite | Formes acide jaune | Forme classique Bleu-vert | Forme basique incolore |
| Zone de virage de pH | 0.2-1.8 | 11.5-13.2 | >13.2 |

I.8-Toxicité

Les rejets d'effluents des eaux usées industrielles constituent un problème colossal, notamment ceux de l'industrie textile, qui sont très chargées en colorants et peuvent nuire aux espèces animales, végétales ainsi qu'aux microorganismes, vivant dans l'eau, responsables de l'eutrophisation et la bioaccumulation, qui peuvent affecter l'homme par le transport à travers les chaînes alimentaires(**Grafi.2021**).

Le vert du malachite est maintenant devenu un composé très controversé , en raison des risques qu'il présente pour les consommateurs de poisson traité, y compris ses effets sur le système immunitaire et le système reproducteur et ses génotoxiques et propriétés cancérogènes. Bien que l'utilisation de ce colorant ait été interdite dans plusieurs pays et n'est pas approuvé par (FDA) qui est l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux., il est encore utilisé dans certains pays en raison de son faible coût, de sa disponibilité immédiate et de son efficacité.

Beaucoup de recherches sont consacrées à ses effets biologiques, qu'il exerce sur différents animaux et sur les êtres humains(**Chen et al.2006, Liu.2016**).

I.9-Conclusion

Ce chapitre porte sur des généralités sur les colorants, à savoir leurs propriétés, classification et utilisation. Un intérêt particulier a été porté sur le colorant textile cationique, le vert de malachite.

Chapitre II :

Généralités sur

l'Opuntia Ficus Indica

II.1-Introduction

Le mot cactus vient du grec ancien *κάκτος/kakatoès* signifiant le chardon (**Habibi.2009**). Le figuier de Barbarie est une plante grasse appartenant à la famille des cactées et plus précisément au genre *opuntia*(**Ginestra et al.2009**).

La famille de Cactacées, comprenant environ 2500 espèces divisées en près de 90 genres, est subdivisée en trois sous familles : les Péreskioideae, les Cactoïdeae et les Opuntioïdeae (**Griffith (b) et Porter.2009**)

II.2-Histoire

Les Espagnols, qui n'étaient pas habitués à manger des fruits exotiques, ont été surpris par la couleur rouge vif de leur urine après avoir consommé des tunas. Ils ont cru qu'ils étaient empoisonnés et qu'ils allaient mourir saignants. Cependant, les autochtones les ont rassurés en leur expliquant que c'était simplement une réaction normale à la consommation de ce fruit (**Kiesling.1999**).

Aujourd'hui, les tunas sont très populaires dans les régions chaudes et arides du monde, où les cactus poussent. Ils sont riches en fibres, en vitamine C et en antioxydants, et peuvent être consommés crus ou cuits (**Inglese et al.2018**).

En effet, les *opuntias* étaient très présents dans les cultures préhispaniques d'Amérique. Cortés et les autres conquistadors espagnols ont rapidement remarqué l'importance économique et culturelle de ces plantes. Les Aztèques, par exemple, cultivaient plusieurs variétés d'*opuntias* pour leur fruit (tunas) et pour leurs cladodes (nopal), qui pouvaient être consommés crus ou cuits, séchés et conservés pour une utilisation ultérieure (**Inglese et al.2018**).

Les *opuntias* étaient également utilisés à des fins médicinales, pour traiter diverses affections telles que les maux de tête, les brûlures et les douleurs d'estomac. Les cladodes étaient également utilisés pour fabriquer des teintures et des colorants naturels (**Reyes Agüero et al.2005**).

II.3-Situation actuelle

L'espèce d'*Opuntia* la plus économiquement importante. Elle est cultivée en Amérique, en Afrique, en Asie, en Europe et en Océanie. Sa distribution s'étend du Canada à la Patagonie en Argentine, du niveau de la mer jusqu'à une altitude de 5100 m au Pérou (Inglese et al.2018).



Figure II.1 : Répartition mondiale de *l'Opuntia Ficus Indica*(Inglese et al.2018).

II3.1-L'Afrique

En milieu méditerranéen, le figuier de Barbarie fait depuis plusieurs siècles, partis intégrante du paysage des régions côtières et insulaires, comme en témoigne la facilité avec laquelle, il s'est adapté aux conditions climatiques Il existe depuis longtemps de vastes zones de culture d'*Opuntia* en Algérie, au Maroc, et en Tunisie (Mulas et al.2004)

Au 19^{ème} siècle, le comte Adrien De Gasparin, un personnage considérable, s'intéressa lui aussi au figuier de Barbarie, et par ses analyses originales de l'économie rurale et par son enthousiasme employé à la diffusion des techniques nouvelles, il contribua beaucoup à l'application des sciences exactes à l'agriculture. Considérant le figuier de Barbarie comme la providence des pays pauvres au sol aride, il voulut développer sa culture en Afrique du Nord et y créer des nopalérais, notamment en Algérie (Schweizer.1997).

Généralités sur *L'Opuntia Ficus Indica*

II3.2-L'Europe

Dans l'histoire de l'ancien monde, l'espèce a été connue depuis le début du 16^{ème} siècle. On pense que l'espèce a accompagné Christophe Colomb lors de son premier retour à Lisbonne en 1493. Les premiers botanistes européens (faisant souvent référence à Pline ou Théophraste) ont appelé ce cactus *Ficus Indica*, bien que certains pensent que ce nom est inapproprié car la plante n'est pas similaire à la figue indienne (peut-être *Ficus benghalensis* L.) (Griffith(a).2004)

II3.3-L'Asie

L'utilisation accrue des cactus comme fourrage et comme fruit contribue probablement à réduire les pénuries d'aliments pour le bétail, à améliorer la sécurité alimentaire et à diversifier les sources de revenus pour les agriculteurs pauvres en ressources dans les zones marginalisées de la région, Asie occidentale. Malgré leur grande capacité d'adaptation et leur capacité à pousser dans des sols dégradés et pauvres inadaptés à la plupart des productions agricoles courantes, les cactus ne semblent pas être largement cultivés en Asie occidentale et leur distribution peut être principalement influencée par l'hiver (Louhaichi et al.2015).

II3.4-L'Amérique

L'introduction de variétés sélectionnées aux États-Unis par le généticien américain Luther Burbank est également controversée. Le cactus a été utilisé comme fourrage après 1915, et à la suite de la grave sécheresse de 1932, le gouvernement fédéral a établi de nombreuses colonies de reproduction qui ont fourni la population nécessaire à la propagation de l'espèce dans le nord-est (Dos Santos et Albuquerque.2001).

II.4-Répartition de l'*Opuntia* en Algérie

L'introduction de ce végétal vivace est possible dans la steppe algérienne, pour la production de fourrage d'appoint, pour le maintien des sols dans le cadre d'une action

Généralités sur *L'Opuntia Ficus Indica*

défense et de restauration, pour produire des fruits pour la consommation humaine et pour la lutte contre la désertification (**Lallouche.2008**).

En zones steppiques algériennes, l'espèce *Opuntia* a été introduite à titre expérimental vers 1940 (**Lallouche.2008**).

Durant la période coloniale, les premières réalisations à base de cactus ont été menées dans le cadre des périmètres de défense et restauration des sols dans la région de Nédroma (Tlemcen) (**Chouaki.2006**).

En 1961, deux collections importantes de cactus ont été réalisées dans la région rurale de Zériba (Grande Kabylie), et à Chebli (**Khour.1970**). Le Centre National de Recherche et d'Expérimentation Forestières (C. N. R. E. F.) a installé diverses collections, dont une de référence située au petit Atlas. Les espèces qui la composent proviennent, du jardin d'Essai d'EL HAMMA (Alger) du jardin botanique de la faculté des sciences d'Alger, des horticulteurs de Paris et d'Alger, et de chez Vilmorin. Un lot a été envoyé par les mexicains, un autre par les siciliens de Catane et Palerme (**Kadik.1974**).

Aujourd'hui, selon les statistiques de la direction des services agricoles (DSA), le pays compte une superficie de plus de 150 000 ha dont 60% dans la zone de Sidi-Fradj, située dans la wilaya de Souk Ahras au Nord-Est de l'Algérie (**Boumali et al.2022**).

II.5-Description morphologie

Un figuier de Barbarie est une plante arborescente de grande taille (3 à 5 m) (figure II.2) forte avec : un tronc ligneux épais et des tissus aplatis, ovale ou ovoïde vert foncé, longueur (30 à 50cm) , largeur (15 à 30 cm) et épaisseur (1,5 à 3 cm) sont appelés pousses ou raquettes (figure II.3). Les cladodes branchues assurent la fonction de la chlorophylle et sont recouvertes d'une cuticule cireuse (cutine), limitant la transpiration et les protégeant des prédateurs (**Schweizer.1997, Park.2002**).



Figure II.2 la plante du figuier de Barbarie

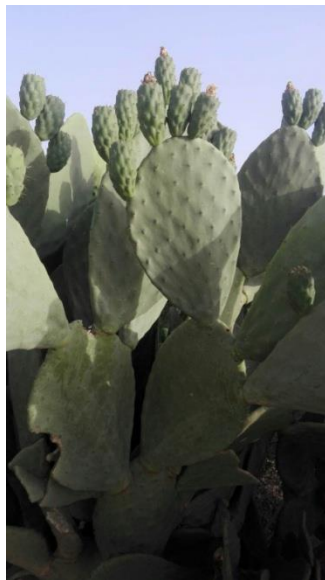


Figure II.3 Les Feuilles de la plante

Les fleurs sont de forme conique et ont quelques millimètres de long, éphémères, sont de couleur jaunâtre et deviennent rougeâtres à l'approche de la sénescence de la plante (figureII.4)(Boutakiout.2015)



Figure II.4 Les Fleures de la Plante (Boutakiout.2015).

La plante fleurit et porte des fruits deux fois dans l'année, de couleur variable (vert, jaune, rouge, violet...), de forme (ovoïde, ronde, elliptique, allongée), composé d'écorce, de jus pulpeux et de graines (figureII.5) **(Feugang et al.2006).**



Figure II.5 Les Fruits de la plante(Feugang et al.2006).

II.6-Composition chimique

La composition chimique des cladodes varie avec les facteurs du sol, site de culture, saison et âge de la plante. Par conséquent, les composants nutritifs respectifs diffèrent entre les espèces et les variétés, et les valeurs absolues ne peuvent pas être prises (tableau II.1) **(Boutakiout.2015).**

Tableau II. 1 Principaux composants des cladodes du figuier de Barbarie (Stintzing et Carle.2005).

| Composants | Matière sèche (g/100g) | Poids frais (g/100g) |
|------------|------------------------|----------------------|
| Eau | - | 88-95 |
| Glucides | 64-71 | 3-7 |
| Cendres | 19-23 | 1-2 |
| Fibres | 18 | 1-2 |
| Protéines | 4-10 | 0.5-1 |
| Lipides | 1-4 | 0.2 |

II.6 .1-Les principaux composants des cladodes

II.6 .1.1 -Les minéraux

Des études récentes montrent que la composition minérale est de 50 mg/100 g poids sec, potassium 18-57 mg/100 g poids sec, calcium et magnésium 11-17 mg/100 g, suivi du manganèse (62 -103 µg/100 g grammes), fer (59-66 µg/g), zinc (22 à 27 µg/g) et cuivre (8-9 µg/g). Encore une fois, ces valeurs doivent être considérées comme approximatives, car la teneur en minéraux varie selon les espèces, le site de culture et l'état physiologique du tissu du clade. Il est à noter que le calcium joue un rôle primordial dans la rétention d'eau des tissus succulents (**Stintzing et Carle.2005**).

II.6 .1.2-Les glucides

Sur une base de poids sec, la teneur en glucides est comprise entre 64 et 71 grammes pour 100 grammes. Les variations peuvent être dues à des facteurs agronomiques et environnementaux ainsi qu'à l'âge des cladodes. Les jeunes cladodes sont plus riches en glucides(**Ginestra et al.2009**).

II.6 .1.3-Acides organiques

Le malonate et l'acide citrique représentaient respectivement 36 et 178 mg/100 g de poids frais. En revanche, les cladodes plus anciennes ne contiennent plus de malonate.

Généralités sur *L'Opuntia Ficus Indica*

Seules des traces d'acides tartrique et succinique ont été trouvées. L'augmentation de l'acide piscidique est due à une augmentation avec l'âge, alors que l'acide phorbique diminue de moitié par rapport à sa valeur initiale. Les acides phorbiques et les acides piscidiques sont rarement rencontrés dans la nature et sont limités aux plantes à métabolisme succulent (**Teles et al.1984**).

II.6 .1.4-Acides aminés

Les cladodes du figuier de Barbarie contiennent 18 acides aminés. La concentration en protéines est de 11 g pour 100 g de poids frais ou de 0,5 g pour 100 g de poids sec. D'autres auteurs ont confirmé qu'elle varie de 77 à 112 mg/g de poids sec selon le mois de récolte. Le principal acide aminé est la glutamine, suivie de la leucine, de la lysine, de la valine, de l'arginine, de la phénylalanine et de l'isoleucine (**Boutakiout.2015**).

II.7-Nom et classification

Cactus est le nom usuel des plantes de la famille des cactacées, ordre des caryophyllales (**Langkawi.2001**).

Généralités sur *L'Opuntia Ficus Indica*

Tableau II .2 Classification de genre *Opuntia*

| | |
|--------------------------------------|--|
| Embranchement: | Phanérogames(Crête.1965) |
| Sous/embranchement : | Angiospermes (Crête.1965) |
| Classe : | Dicotylédones (Crête.1965) |
| Sous-classe : | Polypétales (Shweizer.1997) |
| Ordre : | Caryophyllales (Langkawi.2001) |
| Famille : | Cactaceae (Piedallu.1936) |
| Sous –famille : | Opuntioideae(Fournier.1954) |
| Tribu : | Opuntieae(Crête.1965) |
| Genre : | <i>Opuntia</i> (Crête.1965) |
| Sous-genre : | Consolea; Coryopuntia; Brasiliopuntia; Grusonia, Austrocylindropuntia; Nopalea, Cylindropuntia; Marenopuntia, Stenopuntia; Tephrocactus, Platyopuntia (Reynolds et Arias.2001) |
| Espèces de sous-genre : Platyopuntia | <i>Opuntia ficus indica</i> (figuier de Barbarie; <i>Opuntia inermis</i>); <i>O. vulgaris barbarica</i> Web; <i>Opuntia subterranea</i> ; <i>Opuntia monacantha</i> [39]. <i>O.robusta</i> Wendl; <i>O. engelmannis</i> ; <i>O. streptacantha</i> Lem (<i>Opuntia cardona</i> Web); tenuispin; lucens; <i>O.duranguensis</i> ; <i>O.chrysacantha</i> ; <i>O.leucotricha</i> (Flores et Aranda.1997) |

II.8-Utilisation du figuier de Barbarie

Le figuier de Barbarie est une plante très utile pour les régions arides.

Ses utilisations sont multiples :

. Alimentation humaine :

-Production de fruits (figues de Barbarie). Il existe plusieurs méthodes pour débarrasser le fruit des glucides en les frottant avec un balai, ou une brosse, à sec ou dans l'eau. Le fruit peut être pelé sans contact avec les doigts (**Aouabed et Mellaoui.2021**).

Généralités sur *L'Opuntia Ficus Indica*

- Produits dérivés: des huiles ou macéras très nourrissants à base de fleurs ou de fruits pour la peau, en Sicile en fait une liqueur, le Ficoïde.
- Les fruits sont gorgés de vitamine C (0,04 % du jus). Les fleurs aussi en contiennent une grande quantité (**Maataoui et al.2006**).
- Effet notoire de réduction des taux de glucose sanguin, de cholestérol et de triglycérides sanguins(**Lefrançois et al.2008**)
- Colorants alimentaires naturels : en effet 2 pigments ont été identifiés dans le figuier de Barbarie : un pigment jaune l'indice xanthine et un autre rouge violet la Bétadine (5-Oglucose Bétadine)(**Aouabed et Mellaoui.2021**). Le jus obtenu à partir du fruit contient de 0,22 à 0,25 % d'indixanthine et de Bétadine 0,027 % (fruit jaune orangé) à 0,3 % (fruit violacé)(**Maataoui et al.2006**).

. **Alimentation animale**

- Fruits
- Raquettes (à usage de fourrage)

. **Utilisation agricole :**

Formation de haies défensives.

- Sert de barrière coupe feux.

. **Environnement :**

- Lutte contre l'érosion
- Conquête des sols

. **Usage industriel :**

- Colorants naturels extraits des fruits
- Production d'un colorant rouge par l'élevage d'une cochenille
- Production de mucilages (notamment pour les adhésifs)

. **Usage thérapeutique et cosmétique :**

- La figue de Barbarie est un puissant anti diarrhéique, et un constipant.
- Médecine populaire du Mexique.
- Utilisation de la figue de Barbarie comme une crème de jour, après-soleils, antirides, anti-vergetures.

II.9-Conclusion

Le figuier de Barbarie connu sous le nom *d'Opuntia Ficus Indica*, est originaire des plateaux du Mexique et est bien adapté aux climats chauds et secs, il a été introduit dans de nombreuses régions du monde en raison de sa popularité croissante en tant que plante ornementale et pour ses fruits comestibles. Il appartient à la famille des cactées et au genre *Opuntia*, qui comprend de nombreuses espèces de cactus. Les cladodes du figuier de Barbarie, souvent appelés raquettes, sont les parties plates et ovales du cactus.

En Algérie cette plante est pratiquement délaissée pourtant cette source de richesse a une véritable valeur ajoutée qui peut constituer un créneau d'investissement à part entière.

Les cladodes du figuier de Barbarie sont riches en nutriments tels que les minéraux, les glucides et les fibres. Le figuier de Barbarie, est apprécié pour ses qualités culinaires et mais est aussi réputé pour ses vertus médicinales en complément alimentaire. Il aurait une action antioxydante.



Chapitre III :

L'électrocoagulation

III.1-Introduction

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement développée avant le 20^{ème} siècle. Un pilote a été construit à Londres en 1889 pour traiter l'eau de mer par électrolyse (**Brooks.1986**). L'électrocoagulation (EC) est un processus complexe impliquant beaucoup de phénomènes chimiques et physiques. L'efficacité de ce processus est contrôlée par l'effet des paramètres électrochimiques, physico-chimiques et hydrodynamiques (**Tiaiba et al.2019**). Le processus d'électrocoagulation a été rapporté comme méthode innovante et simple pour la couleur évacuation et traitement des eaux usées textiles (**El-Shafai et al. 2019**).

III.2-Définition

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement des eaux brutes naturelles et résiduaires. Elle est utilisée avec succès dans le traitement de ces eaux en raison de sa capacité d'élimination des matières solides en suspension et colloïdale et aussi l'élimination concomitante de substances inorganiques (phosphore, métaux) et organiques (huiles, graisses, hydrocarbures et autres) (**Drogui et al.2008, Bensadok et al. 2011**).

Tel que son nom l'indique, l'EC est la fusion des sciences de l'électrochimie et de la coagulation. En effet, l'EC est un procédé électrochimique complexe qui met à profit un éventail de phénomènes physiques et chimiques pour entraîner l'abattement des polluants disséminés dans l'effluent, ce phénomène s'opère à l'aide d'électrodes (anodes et cathodes), lesquelles sont plongées dans le milieu aqueux; la quantité d'ions métalliques injectés est contrôlée par le courant électrique (**Holt et al.2005**).

L'électrocoagulation (EC) est un processus complexe impliquant de nombreux phénomènes chimiques et physiques qui utilisent des électrodes consommables pour produire des ions dans le flux d'eaux usées. Dans un processus d'EC, les ions coagulants sont produits "in situ" et impliquent trois étapes successives : (i) la formation de coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle", (ii) la déstabilisation des contaminants, la suspension des particules et la rupture des émulsions et (iii) l'agrégation des phases déstabilisées pour former des floccs(**Mollah et al.2004**).

III.3- Description de la technique d'électrocoagulation

La technique EC utilise une source de courant continu entre des électrodes métalliques, qui est généralement constituée de fer ou d'aluminium immergé dans les eaux usées. Le processus EC comprend la dissolution électrochimique d'une anode sacrificielle et le dégagement simultané d'hydrogène gazeux à la cathode selon la loi de Faraday (Bayramoglu et al.2007).

En outre, les réactions physico-chimiques suivantes peuvent également avoir lieu dans la cellule EC(Mollah et al.2004):

- Réduction cathodique des impuretés présentes dans les eaux usées.
- Décharge et coagulation des particules colloïdales.
- Migration électro-phorétique des ions en solution.
- Électro-flottation des particules coagulées par les bulles d'O₂ et de H₂ produites aux électrodes.
- Réduction des ions métalliques à la cathode.
- Autres processus électrochimiques et chimiques.

Les principales réactions qui se déroulent avec les électrodes sont (Mollah et al.2004):

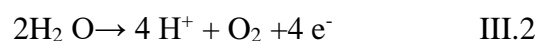
-A l'anode

* L'oxydation du métal :

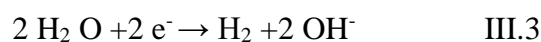


- Electrolyse de l'eau : l'électrolyse de l'eau se déroule en parallèle à l'anode et à la cathode, ce qui est à l'origine de la flottation des polluants par les bulles de gaz (Zongo.2009).

A l'anode:



A la cathode:



L'électrocoagulation

La figure III.1 présente le principe du procédé d'électrocoagulation :

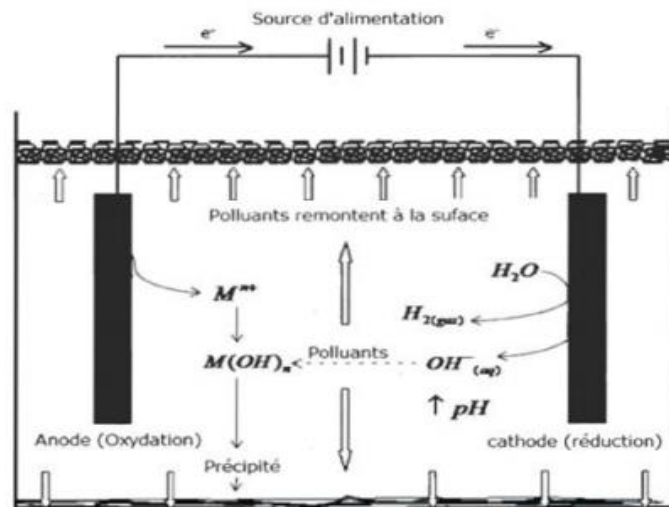


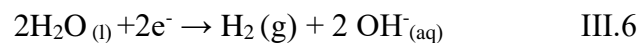
Figure III.1 Schéma du principe d'électrocoagulation (Mollah et al.2004)

Dans le cas de l'utilisation des électrodes de fer, il est à noter que, la plupart des formes de fer utilisées sont des alliages de fer, obtenus par coulage ou trempe, ce qui leur confèrent une dureté conséquente par la présence, d'une certaine quantité de carbone. Les réactions chimiques suivantes ont alors lieu (Modirshahla et al.2007) :

Anode:



Cathode:



Réaction globale:

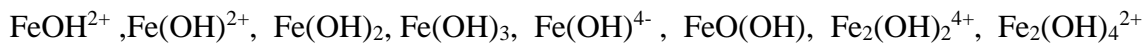


Selon le diagramme de Pourbaix (1938) ou diagramme potentiel-pH (ou E-pH), (Zongo.2009) (figure III.2), qui indique sur un plan E/pH les domaines d'existence ou de prédominance des différentes formes (ions, complexe, précipité, métal) d'un élément

L'électrocoagulation

chimique, on constate comme pour l'ensemble des métaux, l'apparition en solution d'espèces complexées et amorphes selon le pH du milieu.

Si des électrodes de fer sont utilisées, les ions $\text{Fe}_{(\text{aq})}^{3+}$ générés subiront immédiatement d'autres réactions spontanées pour produire les hydroxydes et/ou polyhydroxydes correspondants, tel que (Mollah et al.2004, Solak et al.2009):



Ces espèces complexes jouent le rôle de coagulant. Ils s'adsorbent sur les particules et annulent ainsi les charges colloïdales, ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion et à la formation de précipités, puis de floccs facilement décantables. Cependant la forme floculant à rendement optimal en décantation, est la forme amorphe $\text{Fe}(\text{OH})_3$ à pH compris entre 5,8 et 8,5.

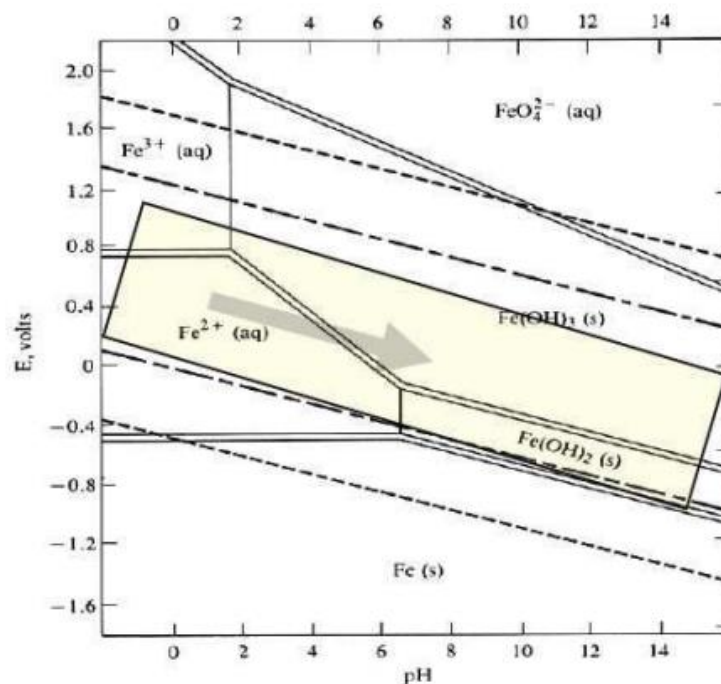


Figure III.2 Diagramme de Pourbaix des espèces de fer en fonction du pH (Moreno et al.2007).

L'électrocoagulation

III.4-Loi de faraday

L'électrolyse est la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique, dans le but de convertir des substances par oxydation ou réduction, afin que les produits soient formés, comme des éléments ou des composés appropriés. Michael Faraday a été le premier, en 1832 à déterminer la relation entre la charge traversant le système et la quantité de substance oxydée ou réduite à une électrode.

La loi quantitative de Faraday (1855) est ordinairement utilisée pour calculer la quantité de matériel séparé d'une électrode par électrolyse. Cette loi montre que la quantité d'ion métallique dissous par oxydation anodique, est directement proportionnelle à l'intensité imposée et à la durée d'électrolyse, mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion émis. Ottwill & Walsh (**Essadki et al.2007**) expriment la première loi de faraday, relative à une électrode, comme suit :

$$m_{\text{thé}} = I.M.t / n.F \quad \text{III.1}$$

Avec:

$m_{\text{thé}}$: masse théoriquement dissoute en métal;

I: intensité du courant imposé aux bornes des électrodes (A) ;

t : durée d'électrolyse (s) ;

M: masse molaire de l'ion considéré (g.mol^{-1}) ;

F: constante de faraday = $96485.3 \text{ (C.mol}^{-1}\text{)}$;

n: nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée.

III.5-Energie électrique consommée

L'énergie électrique totale consommée au cours des processus électrochimiques est calculée selon l'équation suivante (**Abrane.2021**):

$$E = U.I.t / V \quad \text{III.2}$$

L'électrocoagulation

Où :

E : énergie électrique consommée (kWh/m³) ;

t : durée d'électrolyse (s) ;

U : tension d'électrolyse (V) ;

I : intensité de courant d'électrolyse (A) ;

V : volume de l'effluent traité (m³).

La consommation d'électricité est décisive pour le choix du procédé. Il faut intervenir sur certains paramètres pour réduire les déperditions énergétiques.

III.6-Facteurs affectant le processus d'électrocoagulation

De nombreux facteurs affectent le processus d'électrocoagulation et ils se présentent comme suit (**Bennajah.2007, Asselin.2007**) :

-pH

-La présence d'un sel (salinité).

- Intensité du courant électrique (A).

-La nature de la solution et sa concentration.

-La nature de l'électrode.

-La distance entre les électrodes cm.

- Temps d'agitation

III.7-Avantages et inconvénients

Comme toute technique de traitement, l'EC présente des avantages et des inconvénients qu'on peut résumer comme suit :

L'électrocoagulation

III.7.1-Avantages du procédé d'électrocoagulation

1. Pas d'ajout de substances chimiques : même s'il semble nécessaire d'augmenter légèrement la salinité de l'effluent à traiter pour accroître la conductivité électrique de l'effluent, plusieurs études ont montré l'efficacité de l'électrocoagulation sans aucune variation de conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval. Des travaux ont confirmé cet avantage (**Essadki et al.2007**).
2. L'efficacité du procédé d'électrocoagulation pour des polluants colloïdaux très fins a été prouvée (**Persin et al.1989, Kannan et al.2006**). Avec d'autres procédés tel que la coagulation chimique, ces polluants imposent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées.
3. Des boues plus denses et moins hydrophiles ont été obtenues. Cela rend la décantation et la flottation plus aisées et diminue le volume des boues. Les travaux ont montré une réduction du temps et des coûts de traitement des boues (**Larue et al.2003**).
4. Le champ électrique entre les électrodes à une grande importance, il conduit à la destruction de certaines souches des bactéries (**Persin et al.1989**). L'utilisation des électrodes en titane, a confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore (**Patermarakis et al.1990**).
5. L'électrocoagulation offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures (**Bennajah.2007**).
6. La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée. Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisée et à la faible salinité du milieu (**Chion et al.1983**).
7. L'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation (**Cenkin et al.1985**).

L'électrocoagulation

III.7.2- Les inconvénients du procédé d'électrocoagulation :

1. Le procédé d'électrocoagulation est basé sur des réactions électrochimiques. L'effluent à traiter doit donc être un électrolyte, ce qui impose un ajout de sel(généralement NaCl) pour les effluents à faible conductivité.
2. La présence des ions calcium et hydrogénocarbonates provoquent la formation de dépôts de carbonates, de calcium sur la cathode, ce qui augmente la résistance électrique de la cellule. Les solutions à ce problème augmentent le coût de fonctionnement (**Sengil et al.2006**).
3. Les coûts de fonctionnement, y compris celui des électrodes consommables et l'énergie électriques, semblent les principaux inconvénients. L'utilisation des métaux recyclés et de nouvelles technologies a permis de palier partiellement à ces problèmes.
4. L'électrocoagulation est sans effet sur certains types de pollution tel que ceux dus a des fluides parfaitement miscibles à l'eau (exemple le benzène ou les solvants oxygènes).
5. La maintenance des installations est parfois coûteuse. Le nettoyage et lechangeement des électrodes impliquent une perte de temps dû à l'arrêt du procédé au cours de ces opérations (**Brett et al.1993**).

III.8-Conclusion

L'EC est déjà connue comme un procédé efficace d'élimination de la coloration et des polluants contenus dans les rejets de l'industrie textile, ainsi que pour l'élimination des polluants solubles et des colloïdes contenus dans l'eau potable.

Une série d'expériences a été réalisée afin de trouver les effets des paramètres influençant l'EC pour le traitement d'un effluent simulé constitué à base d'un colorant du vert de malachite.



Chapitre IV :

Matériel et méthodes d'analyses

IV.1-Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents produits utilisés, l'appareillage et la méthodologie expérimentale adoptée. Le but est la comparaison de la l'élimination d'un colorant synthétique(le vert de malachite), par deux méthodes expérimentales différentes :

- La 1^{ère}, consiste en l'utilisation d'un bio-floculant naturel, qui est le jus de cactus.
- La 2^{ème}, est une électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer.

IV.2-Matériel et méthodes

IV.2.1-Appareillage

IV.2.1.1-Le spectrophomètre UV-visibles

L'absorption de la lumière visible ou ultraviolette par une molécule organique implique des changements dans les niveaux d'énergie électroniques à l'intérieur de la molécule. Le spectre d'absorption électronique est un terme général qui couvre les régions visibles et/ou ultraviolettes, à partir de 190 nm jusqu'à 800 nm (**Kemp.1986**).

Un faisceau de lumière, de longueur d'onde donnée, traverse la solution à analyser. De la proportion d'intensité lumineuse absorbée par la solution, nous pouvons déduire la concentration de la substance absorbante. La spectrophotométrie est régie par deux lois qui sont exprimées en une seule relation : La loi de BEER LAMBERT (**Charlot.1978**).

La loi de LAMBERT affirme que l'absorbance d'un échantillon est proportionnelle à la longueur du chemin optique, ℓ , tandis que la loi de BEER établit la relation entre l'absorbance et la concentration de la substance. La combinaison entre ces deux lois donne ce qu'on appelle la loi de BEER-LAMBERT :

$$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda).L.C \quad \text{IV.1}$$

Où :

A : l'absorbance d'un échantillon

λ : longueur d'onde donnée (nm)

ε : coefficient d'extinction molaire (L. Mol⁻¹.cm⁻¹) ou spécifique (L .g⁻¹.cm⁻¹),

Matériel et méthodes d'analyses

L : chemin optique, longueur de la cuve d'échantillonnage (cm),

C : concentration du soluté à analyser dans la solution (mol/l).

Cette loi signifie que la proportion de la lumière absorbée ne dépend pas de l'intensité incidente mais du nombre total de molécules ou d'ions absorbants, rencontrés par la lumière.

Le coefficient d'extinction, ϵ , dépend de la nature du corps dissous, de la longueur d'onde et de la température, mais il est indépendant de la concentration (**Charlot.1978**).



Photo IV.1 Spectrophotomètre UV-visible (UV 3100)

IV.2.1.2-Le pH

Le pH (potentiel Hydrogène) permet d'évaluer la concentration de l'ion hydrogène dans une solution. Cette grandeur chimique mesure le caractère acide ou basique d'une solution aqueuse.



Photo IV.2 pH-mètre(basic 20)

IV.3-Effet du jus de cactus sur le colorant.

En premier lieu, nous avons étudié l'effet de jus de cactus sur l'élimination la coloration d'une solution synthétique du vert de malachite

IV.3 .1-Méthode d'extraction

Les raquettes du figuier de barbarie variété *Opuntia Ficus Indica* ont été prélevées dans la région d'Ain Defla (Khemis-Miliana) dans le quartier El_soumaa, pendant le mois d'Avril.

La méthode d'extraction du jus de cactus utilisée est la suivante (**Abid(a) et al.2009, Boutakiout.2015**) :

- Nettoyage des cladodes avec l'eau de robinet puis l'eau distillé.
- La couche rigide été enlevée à l'aide d'une pince.
- Les cladodes ont été découpées on petit dés.
- Broyage de 500g de cactus d'un blinder domestique.
- Filtration à l'aide d'une passoire domestique.
- Le jus a été dilue 10% avec l'eau distillé, suivi d'une agitation modérée pendant 15 à 20 min.
- Ce jus a été conservé dans une bouteille en verre enveloppé dans un papier sombre à l'abri de la lumière et mis à une température 4°C.

Matériel et méthodes d'analyses

- Décantation de 30 minutes des extraits de jus.

(a).



(b).



(c).



Photos IV.3

(a) La cladodes, (b) La cladode après le découpée, (c) Jus de cactus

IV.3 .2-Solution du colorant synthétique

Après nous avons préparé une solution du colorant vert de malachite, de concentration ($c=30\text{mg/l}$), en dissolvant une $m=0.03\text{g}$ de vert de malachite dans un 1 litre d'eau distillée. La solution a été mise sous agitation à une vitesse de (1400 tr / min), pendant une durée de 1h30min afin de la rendre plus homogène.



Photo IV.4 Solution du vert de malachite

IV.3 .3-Démarche expérimental

Le premier essai, consiste à varier la concentration du jus de cactus, à un pH fixé au pH naturel égale à 6.72. On a choisi 8 valeurs de concentration, et allant de 15 ml à 140 ml dans 25ml de solution colorée à traitée, a suivi (15, 20, 40, 60, 80, 100,120et 140ml).les analyses ont été effectuées en utilisant un spectrophotomètre (UV 3100) afin de déterminer le pourcentage d'élimination de la couleur, s'il y a lieu.

Deuxièmement, nous avons opté pour le meilleur volume de jus de cactus (80ml) et on a varie le pH de mélanges (jus de cactus (80ml) + colorant (25ml)) à pH= (3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9) ajusté avec NaOH (0.1N) et HCl (0.1N), avec une agitation de t=10 min à 150 tr/min.

IV.4- Elimination du colorant par le procédé de l'électrocoagulation

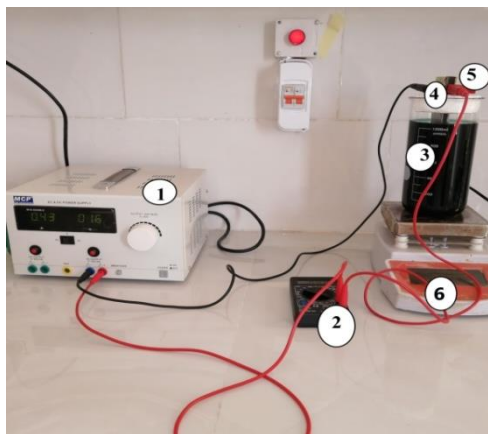
En deuxième lieu, nous avons étudié l'effet des paramètres expérimentaux sur l'élimination du colorant par l'électrocoagulation.

Matériel et méthodes d'analyses

IV.4.1-Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de l'électrocoagulation est représenté sur la figure ci-dessous. Un béccher de 1litre avec un volume effectif de 1litre de colorant est placé sous une agitation modérée de 200tr/min. Deux électrodes identiques en fer, aux dimensions suivantes ont été utilisées comme anode et cathode : longueur (L)= 20cm, largeur(l)= 4.2cm, épaisseur(e)=0.2cm. Ces deux électrodes ont été immergées dans une solution pour obtenir une surface de contact égale à 106.44 cm². La distance entre-ode est fixée à 1 cm.

Les électrodes sont connectées à une alimentation en DC (courant direct) stabilisé (M10-AD360-2,0-3v, 2A) et un multi-paramètre pour contrôler l'intensité de courant (DT-830B digital multimètre).



Photos IV.5 Dispositif expérimental

1-alimentation en DC
2-multi-paramètre
3-solution du vert de malachite

4-cathode
5-anode
6-agitateur magnétique

IV.4.2-Démarche expérimentale

La solution à traiter (1litre) a été préparée, on a mesuré son absorbance initiale avant le traitement, puis NaCl a été ajoutée dans la solution comme un électrolyte, pour augmenter sa conductivité et faciliter le traitement par électrocoagulation. La solution a été mise sous agitation modérée.

Matériel et méthodes d'analyses

Nous avons relié les électrodes au générateur électrique et au ampèremètre en série (l'intensité du courant électrique est la même en tous points), avec une agitation modérée pour assurer un mélange homogène.

Il est important de noter que, les électrodes ont été rincées à l'eau distillé, frottées avec du papier de verre, pour éliminer les résidus, avant chaque essai, puis elles ont été séchées. On a pesé la masse de la cathode et de l'anode avant et après chaque essai.

Les mesures de l'absorbance, initiales et finales, ont été effectuées en utilisant un spectrophotomètre, afin de déterminer le pourcentage d'élimination de la couleur.

Les expériences sont effectuées à température ambiante, soit 25°C environ.

Les paramètres retenus sont :

- L'intensité (0.1A ; 0.25A ; 0.5A ; 1A),
- La salinité (NaCl) ;
- Le pH naturel et un pH ajusté soit avec NaOH (1N) soit avec HCl (1N).

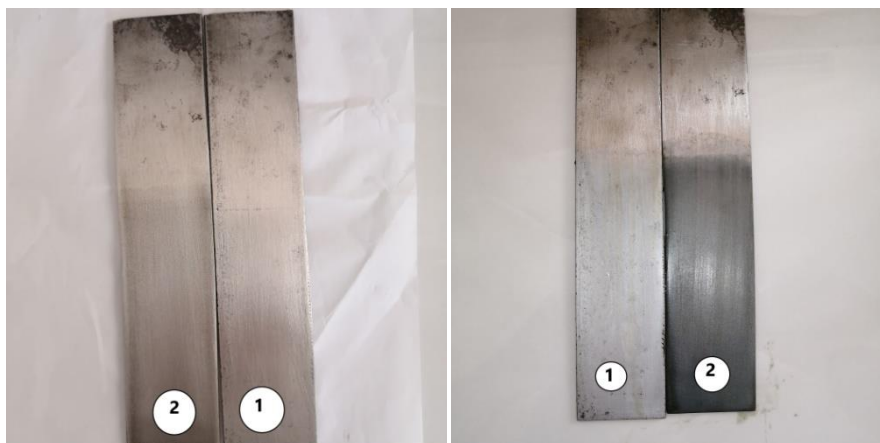
IV.4.3 Les plaques d'électrodes avant et après l'électrolyse

Deux électrodes en fer sont utilisées comme électrodes. (Photos IV.6).

(1). La cathode (2). L'anode

(a).

(b).



Photos IV.6. Les électrodes en fer
(a). Avant l'électrolyse, (b). Après l'électrolyse



Chapitre V :

Résultats et discussion

V.1-Introduction

Ce chapitre présente les résultats de les deux méthodes qui on a utilisé.

1^{ere} Partie effet de jus de cactus sur l'élimination de colorant.

2^{eme} Partie effet de l'électrocoagulation sur l'élimination de colorant.

V.2 Détermination de la longueur d'onde maximale

Le spectre d'absorption du colorant de vert de malachite (Figure V.1) a été réalisé à l'aide d'un spectrophotomètre de type (UV 3100). Le choix de la longueur d'onde a été effectué, suite à un balayage entre 500 nm et 700 nm (figure V.1). L'évolution de la densité optique en fonction de la longueur d'onde a une allure gaussienne, dont le maximum se situe à 617 nm.

Cette longueur d'onde se situe dans l'intervalle compris entre [617nm-620nm] trouvée par différents auteurs(Djebri.2014, Boudergua.2015, Gnaoui. 2017, Ben Amor et Nasri .2018,Bossour.2019).

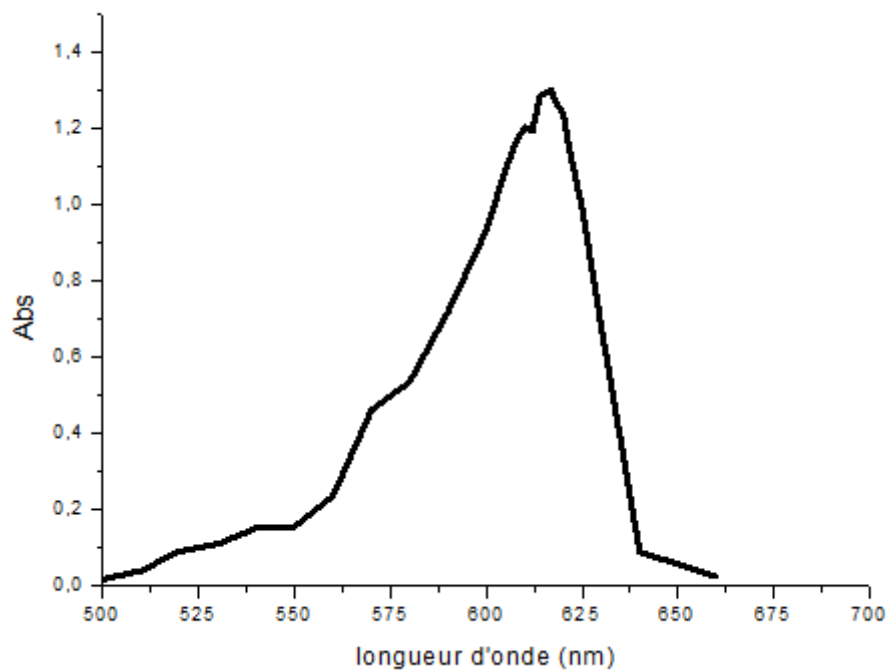


Figure V.1 Spectre d'absorption en UV-visible du colorant

V.3-Courbe d'étalonnage

Nous avons établi une courbe d'étalonnage qui nous a permis de déterminer le domaine de concentration pour lequel la loi de BEER-LAMBERT est respectée.

Le tracé de la courbe d'étalonnage est représenté sur la figure V.2. L'absorbance du vert de malachite a été effectuée à 617 nm. Les solutions étalons considérées, varient de 0.4 à 8mg/L. L'évolution de la densité optique est linéaire, avec un coefficient de détermination, R^2 , égal à 0.9987.

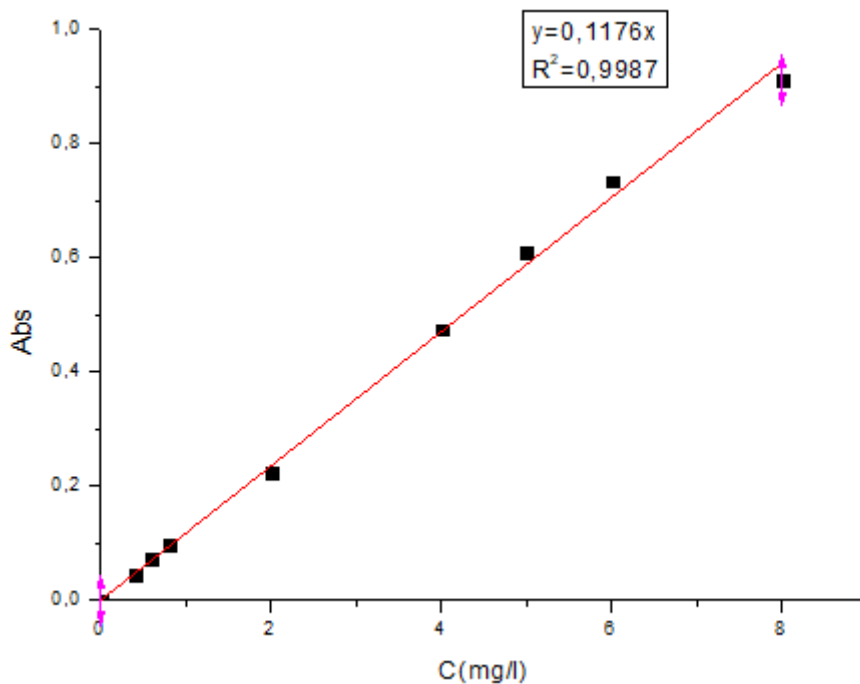


Figure V.2 Courbe d'étalonnage du vert de malachite à 617nm

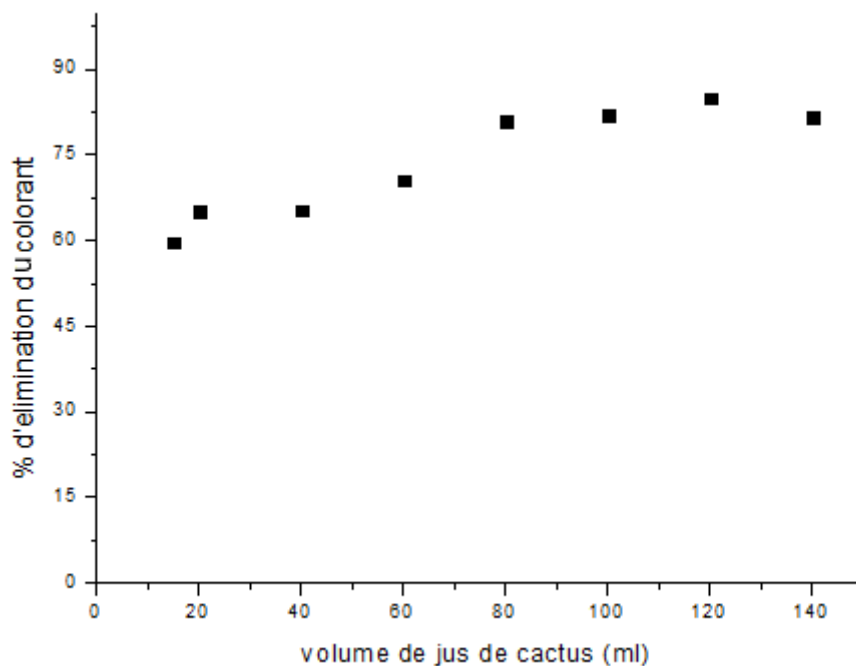
V.4-Effet du jus de cactus sur l'élimination du colorant

Les pH du jus de cactus dilué et de la solution colorée de vert de malachite ont été mesurés :

- Celui de jus de cactus est égale à 6.72. On constate qu'il se rapproche de la valeur de 6.5 trouvé par ces auteurs (**Abid (a) et al.2009, Abid (b) et Zouhri.2017**).
- Le pH de la solution coloré est égal à 4.42.

V.4.1-Effet de la variation du volume de jus de cactus

On a travaillé avec des différents volumes de jus de cactus, en allant de 15ml jusqu'à 140ml, dans un volume $v= 25$ ml de colorant, de concentration $c=30$ mg/l, toujours aux pH naturels du jus et du colorant. Une agitation de 150tr/min pendant une durée de 20 min, a été effectuée.



FigureV.3 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction du volume de jus de cactus.

Résultats et discussion

On remarque d'après la courbe obtenue, que les pourcentages d'élimination du colorant, à pH naturel, varient de 60 à 84% environ, pour des doses de jus ,allant de 15 à 140 ml, pour des volumes de 25ml de colorant.

Pour des volumes inférieures à 80ml, les pourcentages d'élimination sont inférieurs à 80%. Par contre, pour des volumes supérieurs à 80 ml, ils sont de l'ordre de 80%.

Le choix du meilleur volume ajouté de jus de cactus, a été guidé par le pourcentage d'élimination du colorant. Pour cela, le volume de 80ml a été pris en considération, vu que pour une différence de 40 ml de jus ajouté (de 80à 120 ml) le pourcentage d'élimination varie seulement de 3%.

Il a été démontré que les cultures de cellules de cactus et les plantes intactes (cladodes) Peuvent transformer les colorants textiles toxiques, en métabolites moins phytotoxiques. L'analyse des enzymes impliquées dans la biotransformation des colorants montre la présence de diverses enzymes chez le cactus, telles que la laccase, la tyrosinase, l'azoréductase et la 2,6-dichlorophénolindophénol réductase (**Adki (b) et al.2012, Ben Rebah et al. 2017**)

Ces résultats sont en accord avec ce qui a été rapporté par concernant le potentiel de phytoremédiation et les mécanismes biochimiques impliqués, dans diverses espèces végétales. Généralement, les enzymes rapportées sont bien étudiées dans diverses plantes et micro-organismes et sont responsables de la transformation des aromatiques xénobiotiques (**Adki (a) et al.2010, Ben Rebah et al. 2017**).

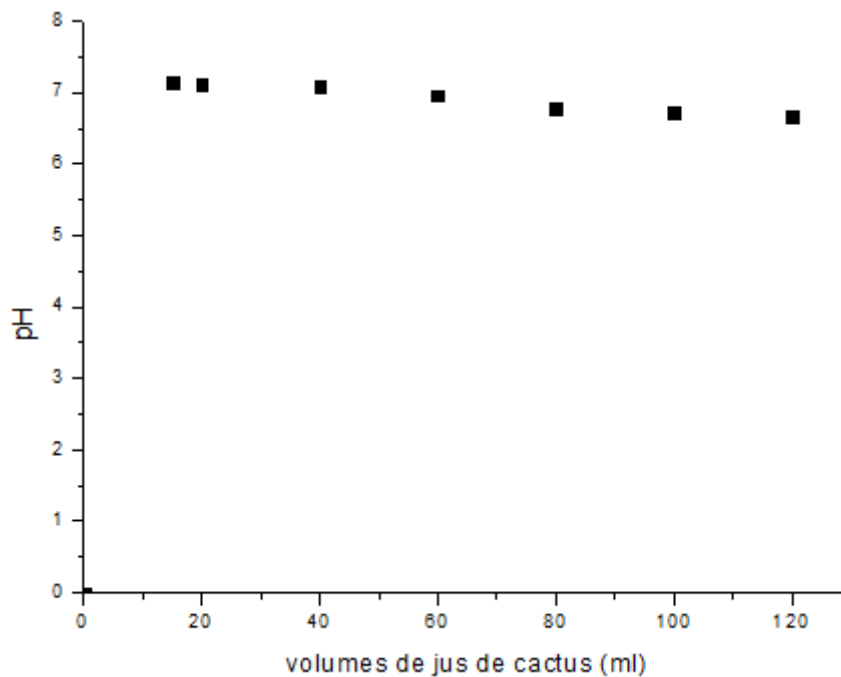
La phytoremédiation ou la phytodégradation , est un ensemble de technologies, utilisant les plantes pour réduire, accélérer la dégradation , ou immobiliser des composés organiques polluants (naturels ou de synthèse) (**Adki (a) et al.2010, Ben Rebah et al.2017**).

Cette dégradation peut avoir lieu soit hors de la plante, grâce à l'activité des micro-organismes présents dans l'environnement des racines (rhizosphère), soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules par des enzymes spécifiques(**Ben Rebah et al.2017**).

De cette façon, le cactus peut être ajouté comme nouveau candidat potentiel pour traiter les eaux usées de teinture textile en utilisant son système enzymatique. Cependant d'autres investigations sont nécessaires pour explorer ce potentiel de véritables eaux usées colorées (**Ben Rebah et al. 2017**).

Résultats et discussion

Après le l'agitation du mélange on a vérifié le pH, les résultats sont présenté ci- dessous :



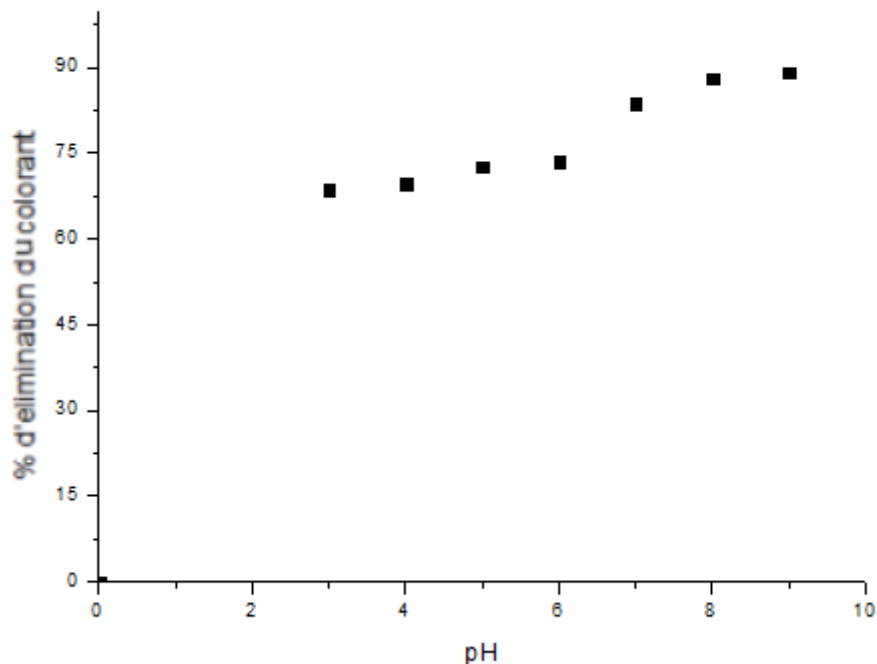
FigureV.4 Variation du pH en fonction des volumes de jus de cactus

D'après le tracé le pH en fonction du volume de jus de cactus, on remarque que :

Le pH du mélange varie légèrement (6.72 à 7.15)

V.4 .2-Effet de la variation du pH du mélange

On a ajouté dans les 7 échantillons de 25ml de colorant, le volume optimisé de jus de cactus égal à 80ml, à différents pH, sous une agitation de 150tr/ min, pendant 20 min.



FigureV.5 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction du pH

On constate d'après les résultats trouvée, que pour des pH variant de 3 à 9, les pourcentages d'élimination, varient de 68% environ 89%.

On constate que la variation de pH pour les valeurs allant de 3 à 6 n'a pas beaucoup d'effet sur l'atténuation de la couleur de cette solution à traiter

Le meilleur résultat est obtenu à pH basique égale à 9 avec un rendement d'élimination de 89.13%. Ceci est concordant avec les résultats trouvés par **(Abid (b) et Zouhri.2017)** pour les pH basiques supérieurs à 8.

La couleur du mélange a commencé à disparaître au fur et à mesure que l'alcalinité de la solution augmentait.

V.5- Elimination du colorant par le procédé de l'électrocoagulation

V .5.1-Effet de variation du pH

- a. Le pH est l'un des principaux facteurs qui contrôlent la performance de l'électrocoagulation **(Grini.2015)**

Dans notre cas nous avons varié le pH dans une gamme allant de 2.4 à 7.4 tous en maintenant les autres facteurs constants :

Résultats et discussion

- La concentration initiale du colorant : 30mg/l ;
- Le type d'électrodes : fer ;
- La distance entre-ode: 1 cm ;
- L'intensité constante : 0.5A ;
- La concentration de NaCl : 3g

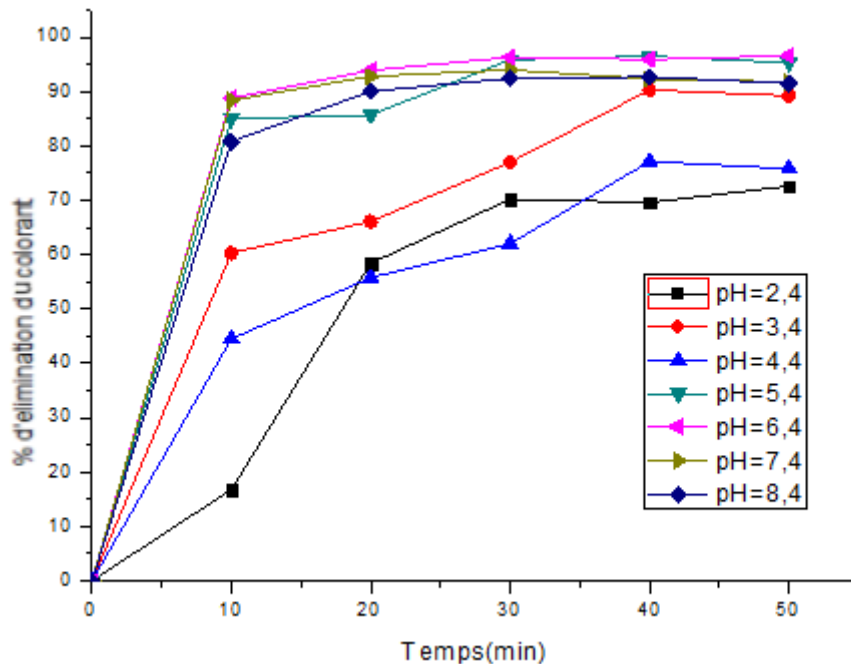


Figure V.6 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction du temps, à différents pH

A la lecture de la figure V.6, nous observons que plus de 96.6% de l'élimination est obtenue à pH=6.4. Plusieurs auteurs ont des pourcentages aussi élevés avec les électrodes en fer dans des gammes de pH entre 5-8 ou entre 6-9 selon le colorant utilisé (**Daneshvar (a) et al.2004, Daneshvar(b) et al.2007**).

Nous remarquons que le pourcentage d'élimination du colorant à des pH acides n'est pas important. Aux pH acides, les protons dans la solution sont réduits en H_2 à la cathode et la même proportion des ions hydroxydes ne peut pas être formée. Cet auteur a trouvé le même résultat (**Griini.2015**).

- b. L'évolution de la tension U (volt) en fonction du temps, pour même intensité et à différents pH :

La tension de cellule représente la valeur relevée de la tension sur le générateur stabilisé. Cette valeur de tension est fonction de l'intensité de courant, du matériau d'électrode, de l'effluent et de la connexion électrique des électrodes. Pour un effluent dont la conductivité

Résultats et discussion

est élevée, la tension est faible s'il n'y a pas de dépôt sur la surface des électrodes, qui empêchent le passage du courant (Attour et al.2016, Abdi et Elmoustapha.2021).

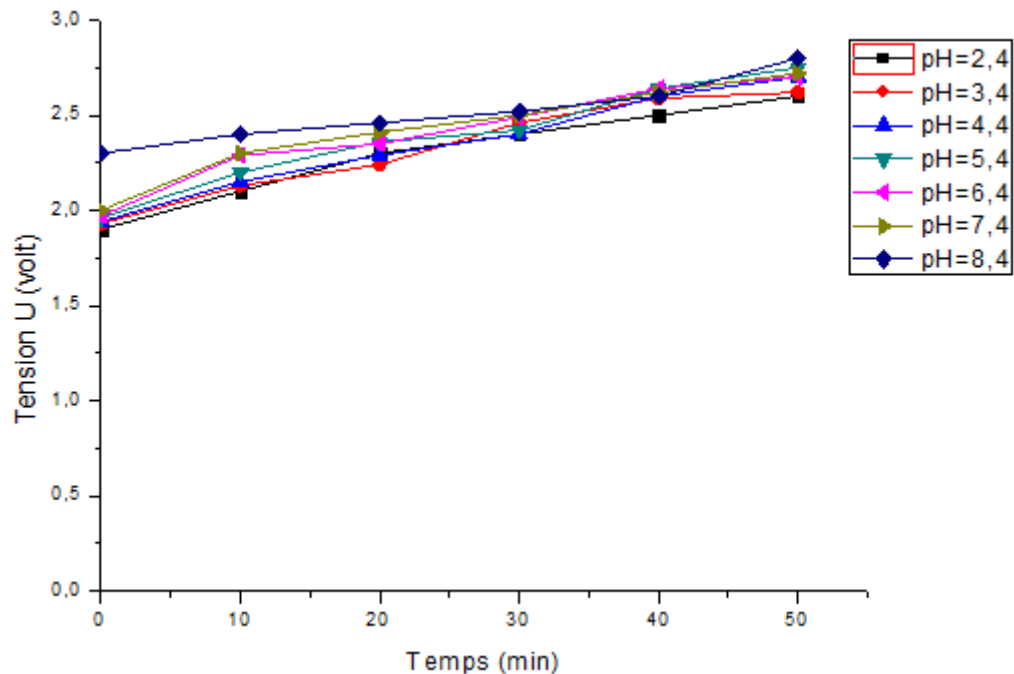


Figure V.7 Evolution de la tension en fonction du temps à différents pH

Nous remarquons que, l'évolution de la tension varie très peu pour des pH différents au cours de temps. Cette augmentation très faible.

L'expérience montre que le pH de la solution a peu d'effet sur la tension électrique du processus d'électrocoagulation.

c. Effet du pH sur la masse de l'anode

$I=0.5A$, $t=50min$

La masse expérimentale anodique est la variation de masse avant et après électrocoagulation

$$m_{exp} = m_2 - m_1 \quad V.1$$

m_1 : la masse de l'anode avant l'électrocoagulation

m_2 : la masse de l'anode après l'électrocoagulation

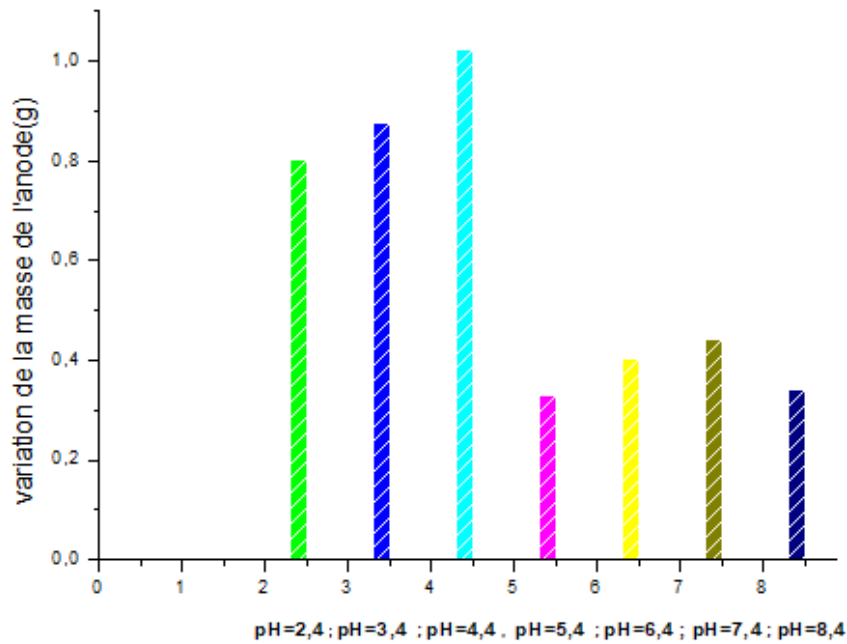


Figure V.8 Variation de la masse de l'anode en fonction du pH.

Nous remarquons d'après la figure V.8, que la masse de l'anode varie selon le pH de la solution :

Dans les pH acide, la variation de la masse de l'anode est très élevée. Elle dépasse les 1g pour un pH égal à 4.4

Dans les pH neutre ou basique, la variation de la masse de l'anode ne dépasse pas $m=0.5g$.

d. Variation du pH en fonction du temps

Soulignons cependant que le pH change au cours de l'électrocoagulation, comme mentionné dans quelques articles (Mollah et al.2004,Bayramoglu et al.2007). Ces auteurs précisent que cette évolution dépend du pH initial et des capacités tampons de la solution, en raison de la production et la consommation des ions OH^- au cours de l'électrocoagulation, ce qui, permet d'éviter une variation brusque du pH de la solution, dans la solution à traité pendant l'électrocoagulation qui est produit suite à la réduction de l'eau au niveau de la cathode comme le montre l'équation :(Belayachi.2016):



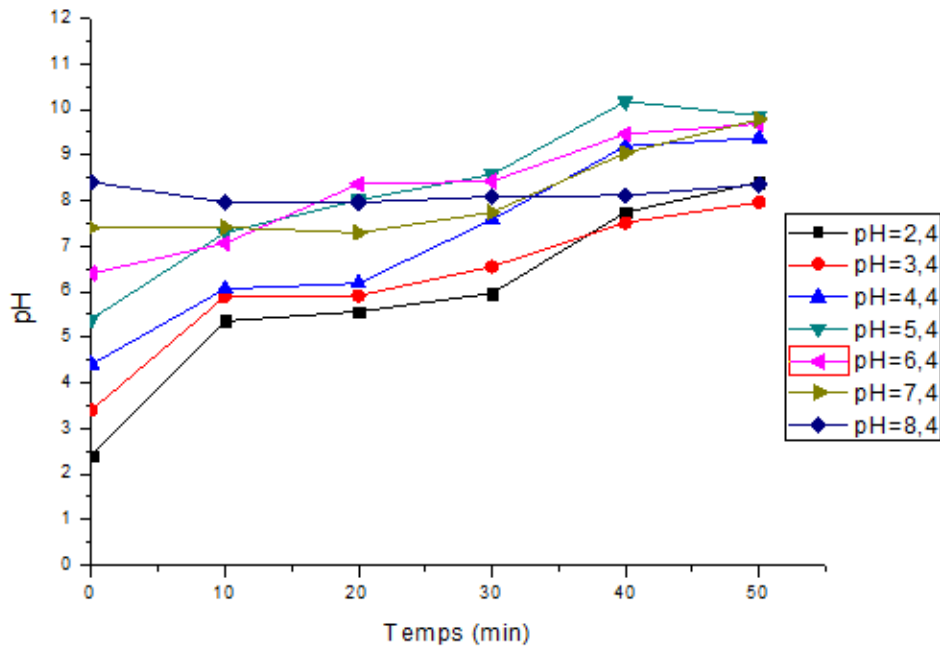


Figure V.9 L'évolution du pH en fonction du temps

Nous remarquons que le pH initial acide (2.4, 3.4, 4.4) et neutre (5.4, 6.4, 7.4) augmente d'une façon rapide au cours de temps, pour atteindre un pH final basique.

Par contre le pH basique 8 diminue légèrement pour atteindre un pH neutre.

V.5 .2-Effet de la variation de l'intensité

Plus l'intensité du courant appliqué ou/et le temps de contact sont élevés, plus le taux d'abattement est très important. En effet l'application d'une intensité élevée favorise la cinétique des diverses réactions d'électrocoagulation, provoquant ainsi une libération importante des ions Fe^{2+} , OH^- (Ameziane et al.2013). Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des bulles d'hydrogène augmente. Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation (Bennajah.2007, Abbas et Messaad.2017).

- a. L'évolution de l'efficacité du procédé d'électrocoagulation en fonction du temps pour les différentes intensités (0.1A ; 0.25A ; 0.5A ; 1A) .Les autres facteurs restent constants :
 - pH constant : 6.4 ;
 - La distance entre-ode : 1cm ;

Résultats et discussion

- La concentration de NaCl : 3g ;
- La concentration initiale de colorant : 30 mg/l ;
- Type de l'électrode : fer ;

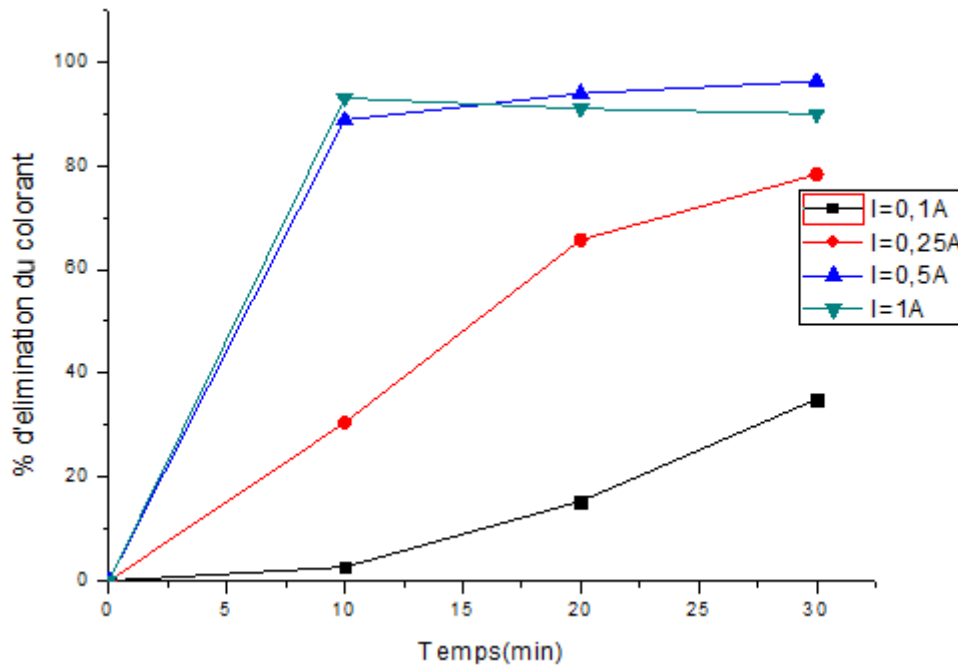


Figure V.10 Pourcentage d'élimination du colorant en fonction du temps à différentes intensités

La figure V.10 indique que plus l'intensité élevée, plus le pourcentage de l'élimination important.

Pour les 10 premières minutes, sous une intensité de 0.5 et 1 A, l'élimination du colorant est très élevée. Elle atteint les 93% sous une intensité de 1A. Puis jusqu' à 30minutes la réduction de la couleur ne change pas vraiment.

Par contre pour des intensités, plus faibles, à savoir 0.1A et 0.25A, le pourcentage d'élimination augmente au cours des 30min d'électrolyse.

- L'évolution de la tension en fonction des différentes intensités (0.1A ; 0.25A ; 0.5A ; 1A) pendant un même temps (30min),

L'efficacité du traitement augmente significativement avec l'augmentation de la tension électrique. Cela est attribué au fait que, à tension électrique élevée, l'intensité au sein de la cellule s'élève également, d'ailleurs d'autres études confirment les mêmes résultats que les nôtres (Zongo.2009)

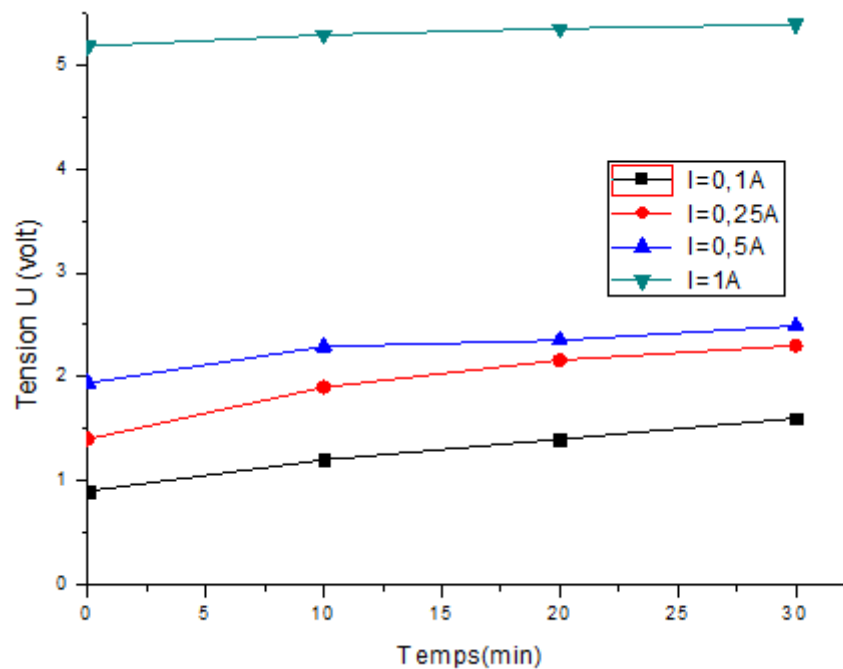


Figure V.11 Variation de la tension en fonction du temps à différentes intensités

Cette figure V.11 montre que lorsque l'intensité augmente la tension augmente aussi, Cependant au cours de temps, l'évolution de la tension électrique reste quasiment constante, pour les différentes d'intensités utilisées.

c. Effet de l'intensité sur la variation de la masse de l'anode et de la cathode :

Nous remarquons après chaque essai, que la masse de la cathode ne varie pas vraiment par rapport l'anode, avec une différence masse d'environ -0.0050g.

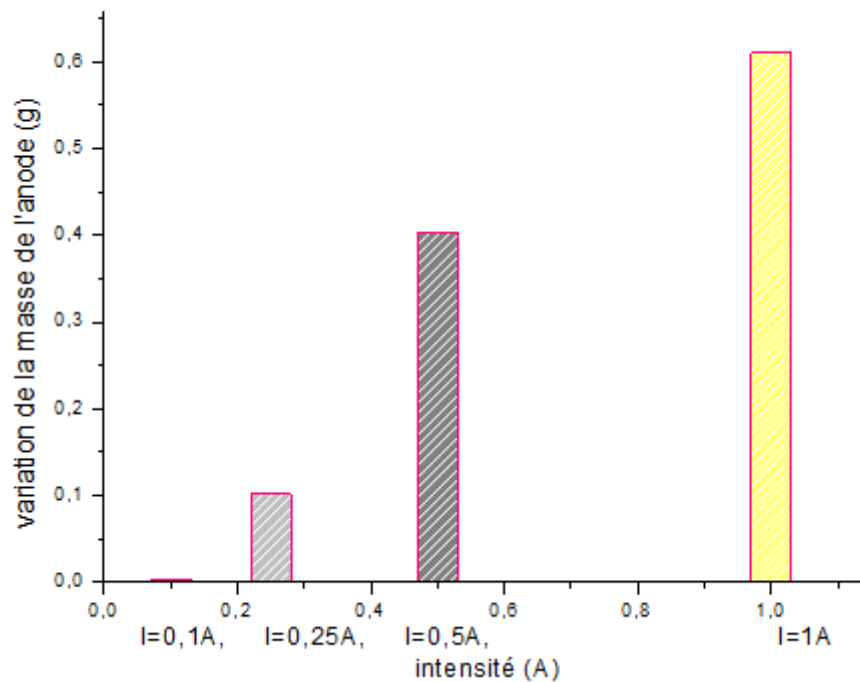


Figure V.12 Variation de la masse de l'anode en fonction de différentes intensités

D'après la figure V.12 nous remarquons une grande différence entre les variations des masses de l'anode pour chaque intensité utilisée.

Pour 0.1A la masse de l'anode ne change presque pas, la différence de masse est seulement de -0.0033g.

Pour 0.25A, la variation de masse est un peu plus élevée, par contre pour une intensité de 1A, la masse de l'anode diminue de -0.1014g.

Par cet histogramme, on peut constater que l'augmentation de la variation de la masse de l'anode, est proportionnelle à celle de l'élévation de l'intensité électrique utilisée

- d. L'énergie consommée en fonction des différentes intensités (0.1A ; 0.25A ; 0.5A ; 1A) pendant une durée d'électrolyse de 30min.

L'énergie consommée :

$$E=U.I.t/v \quad V.2$$

I : l'intensité en (A)

U : tension en (volt)

t : temps en (h)

E : énergie consommée en (kW*h/m³)

Résultats et discussion

v : volume de la solution à traité (m³)

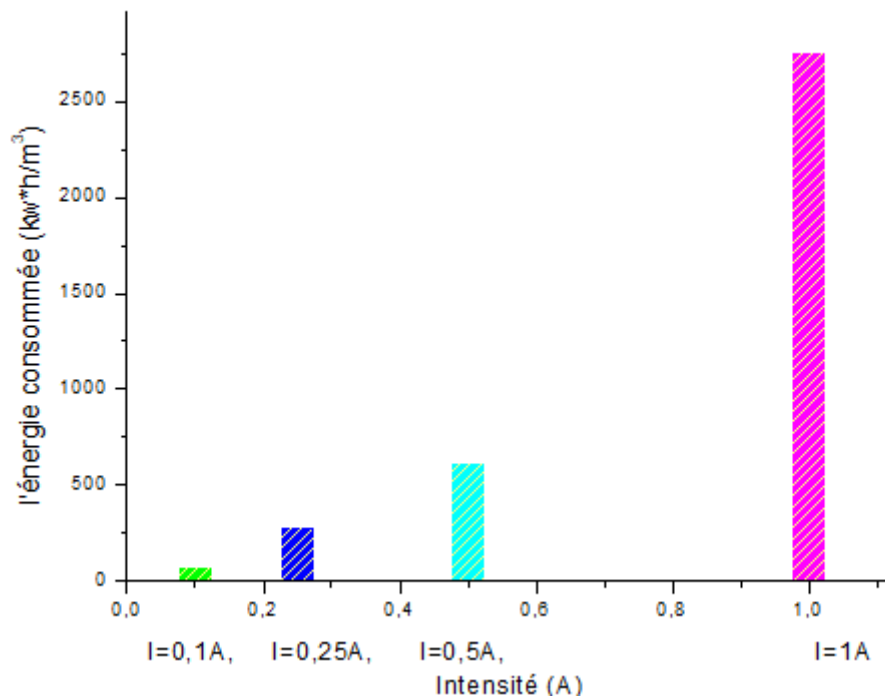


Figure V.13 L'énergie électrique consommée en fonction de l'intensité.

Après avoir étudié l'effet de l'intensité du courant utilisé, sur l'énergie électrique consommée, pour le procédé d'électrocoagulation, ce qui est représenté sur la figure V.13, il apparaît que l'énergie consommée, augmente proportionnellement à l'intensité électrique. Ces observations sont en bon accord avec les données, déjà rapportées dans la littérature pour les eaux usées des industries de textile (**Marzouk et al.2011**).

V.5 .3-Effet de la salinité

Un des principaux paramètres influençant le traitement des eaux par électrocoagulation, est la conductivité du milieu réactionnel, qui peut être modifiée par l'ajout d'un sel (**koubayaet al.2006,Kushwaha et Neha Gupta.2011**)

Dans notre cas nous avons varié la masse de NaCl (3g et 1.5g) tout en maintenant les autres facteurs optimisés constants :

- La concentration initiale du colorant : 30mg/l ;
- Le type d'électrodes : fer ;
- La distance entre-ode : 1 cm ;

Résultats et discussion

- L'intensité constante : 0.5A ;
- Le pH=6.4.

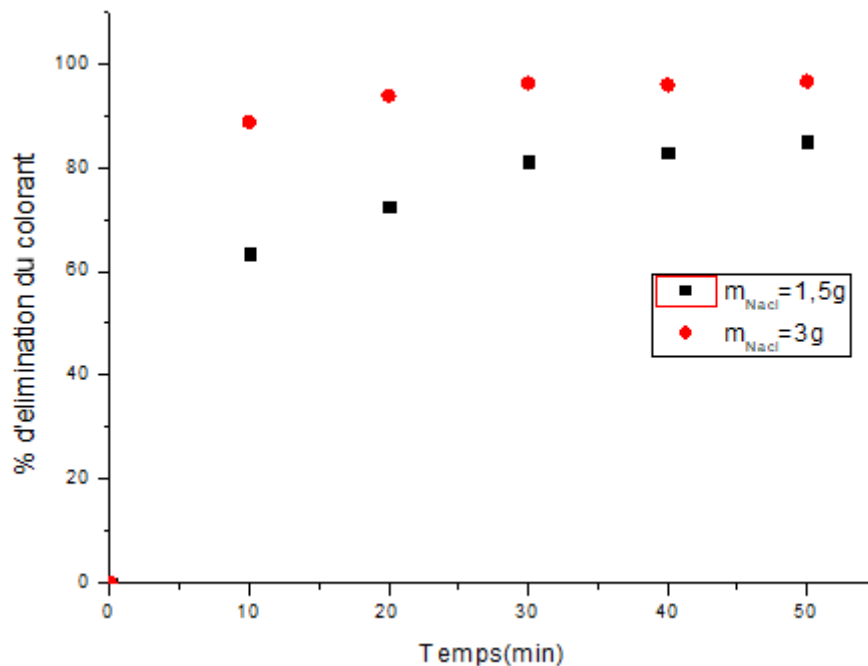
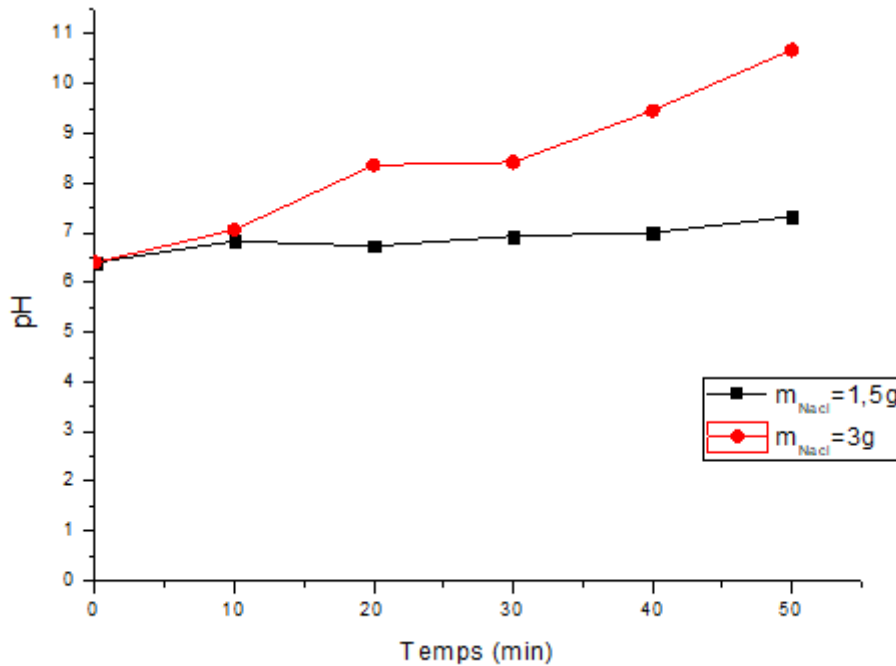


Figure V.14 Effet de la masse de NaCl sur l'élimination du colorant en fonction du temps

D'après la figure V.14 nous remarquons que par l'augmentation de la masse de NaCl, le pourcentage d'élimination augmentait, entraînant une cinétique de la décoloration.

Pour une $m_{NaCl}=3g$, le pourcentage d'élimination atteint 96.6% par contre pour $m_{NaCl}= 1.5g$ le pourcentage d'élimination ne dépasse pas 85.2%.

- L'évolution du pH en fonction du temps pour différentes masses de NaCl (I=0.5A, pH=6.4).



FigureV .15 L'évolution du pH en fonction du temps

La figure V.15 montre que la masse du sel affecte sur pH. Pour la $m_{NaCl} = 1,5g$ le pH reste quasiment constant au cours de temps, par contre pour $m_{NaCl} = 3g$ le pH augmente plus rapidement au cours du temps (NaCl à des capacités basique).

V.6-Etude comparative

Dans cette dernière partie, on a fait une étude comparative, entre les performances de l'extrait du jus de cactus et le procédé de l'électrocoagulation, sur les pourcentages d'élimination du colorant textile, vert de malachite. Les principaux paramètres pris en considération sont le pourcentage d'élimination, la durée pendant la quelle s'est effectuée cette élimination et l'énergie électrique consommée. Les résultats sont regroupés dans le tableau V.1 ci-dessous :

Résultats et discussion

Tableau V.1 Eléments comparatifs pour les deux procédés de décoloration.

| | pH | Pourcentage d'élimination (%) | Durée pour l'élimination (min) | Energie électrique consommée (kw*h/m ³) |
|--------------------------|-----|-------------------------------|--------------------------------|---|
| Extrait du Jus de cactus | 9 | 89.13 | 20 | 0 |
| Electrocoagulation | 6.4 | 96,6 | 50 | 622.5 |

On constate que pour aucune consommation énergétique électrique, le pourcentage d'élimination du colorant, vert de malachite, est de l'ordre des 89%, en utilisant uniquement le jus de cactus naturel extrait des cladodes. Mais le procédé de l'électrocoagulation à une très bonne élimination du colorant pour un pourcentage de l'ordre 96.6%, on peut dire que c'est une élimination totale du colorant.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les eaux contaminées par des teintures textiles contiennent des substances nocives pour l'environnement, notamment les milieux aquatiques, lorsqu'elles sont rejetées sans traitement préalable. Ces eaux méritent une attention particulière, compte tenu de leur niveau de pollution très élevé.

Il existe des nombreuses façons efficaces de traiter l'eau contaminée par des colorants textiles, comme le vert de malachite. Ceci nous a incités, à mener une étude comparative pour l'élimination de ce colorant, en utilisant un produit naturel, le figuier de Barbarie et un procédé électrochimique, à savoir l'électrocoagulation.

Les résultats obtenus, ont montré que le procédé de traitement par l'électrocoagulation, a été plus efficace que le jus des cladodes de *l'Opuntia Ficus Indica*. L'électrocoagulation permet une élimination de 96.6 % du vert de malachite en 50 minutes, à un pH neutre, égal à 6,4. La meilleure intensité de courant utilisé est égale 0.5A, avec une concentration en électrolyte NaCl égale à 3 g/l. L'inconvénient majeur, du procédé d'électrocoagulation, est la production de floes à la surface de la solution, qu'il faudra éliminer ultérieurement.

Pour ce qui est du jus de cactus, le pourcentage d'élimination du vert de malachite est de 89.13%, dans 80 ml de jus, à un pH basique égale à 9, pour une consommation énergétique électrique nulle.

La phytodégradation enzymatique semble être très efficace par la plante de *l'Opuntia Ficus Indica*.

Perspectives

En perspective, voici quelques propositions que nous formulons, pour de futurs essais de décoloration :

- Optimiser les paramètres opératoires influençant l'EC.
- Approfondir l'étude biologique enzymatique des cladodes de l'OFI utilisé.
- Sécher les cladodes et en extraire du gel ou de la poudre.
- Effectuer un calcul socio-économique
- Calculer les coûts du projet sur sa durée totale.
- Identifier et mesurer les impacts de l'investissement avec des indicateurs pertinents.
- Monétariser ces indicateurs.
- Calculer le bénéfice net entre les avantages et les coûts (analyse coût-bénéfice)

Références et Bibliographiques

A

Abbas, M ; Messaad, A. Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile. Mémoire de master académique. Université Mohamed Boudiaf - M'sila. Algérie .2017

Abdi,M.M.M.L ; Elmoustapha, E.K. L'apport de l'électrocoagulation dans le domaine d'épuration des eaux usées – Etat de l'art et perspectives. Mémoire de master académique. Université Mohamed Boudiaf - M'sila. Algérie.2021.

Abid (a), A; Zouhir,A ; Ider,A et. Kholtei,S. 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. Volume 12 N°2. P. 321 – 330. 2009.

Abid (b), A; Zouhri, A. Substitution des flocculants chimiques par le cactus dans le procédé de traitement par coagulation-floculation des rejets industriels de textile. Revue des Energies renouvelables .Volume 20 N°1.P. 61 – 67.2017.

Abrane,R .Dépollution d'un effluent de laiterie par électrocoagulation et comparaison d'efficacité avec d'autres techniques de traitement. Thèse de doctorat. Faculté des sciences département de chimie. Université Badji-Mokhtar. Algérie.2021.

Adki (a), V.S;Shedbalkar,U; Jadhav ,J.P; Bapat ,V.A. Opuntia and other cacti: Applications and Biotechnological insights. Tropical Plant Biol. Volume 3 .P.136-150.2010

Adki (b), V.S; Jadhav, J.P; Bapat,V.A. Exploring the Phytoremediation potential of cactus (Nopalea Cochenillifera Salm. Dyck) Cell cultures for textile dye degradation. International Journal Of Phytoremediation. Volume 14:6.P.554-569. 2012.

Attour, A; Grich, N.B; Tlili, M.M; Amor, M.B; Lapique, F; Leclerc, J.P. Intensification of phosphate removal using electrocoagulation treatment by continuous pH adjustment and optimal electrode connection mode. Desalination and Water Treatment. Volume57. P. 13255–13262.2016

Ameziane, N; Khennoussi,A ; Benaabidate,L. Effet De L'épuration par électrocoagulation sur la pollution des effluents de l'hôpital Mohamed v de Meknès. European Scientific Journal. Volume 9. P.291-308.2013.

Références et Bibliographiques

Aouabed, N; Mellaoui, H. Traitement des colorants des rejets textiles, par l'Opuntia Ficus-Indica. Mémoire de Master. Université Bounaama Djilali - Khémis Miliana. Algérie. 2021

Asselin, M. Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique. Mémoire du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.). Institut national de la recherche scientifique Centre Eau, Terre et Environnement. Université du Québec. Canada. 2007.

B

Bassour, F. Dégradation du vert malachite par emploi d'un catalyseur à base d'argile et de dioxyde de titane. Mémoire de Master. Université De Blida 1. Algérie (Blida). 2019

Ben Amor, L; Nasri, A. Élimination des polluants organiques sur la vermiculite modifiée. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - Msila. Algérie (Msila). 2018.

Bengueddach, A; Moursli, A. JIMP10 Recueil. Journées internationales sur les matériaux poreux. Volume 155-164. 2010.

Bayramoglu, M; Eyvaz, M; Kobya, M. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economical evaluation. Chem. Eng. J. Volume 128. P. 155–161. 2007.

Belayachi, A. Élimination d'un colorant anionique par adsorption, électrocoagulation, fenton. Thèse de doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis. Algérie. 2016.

Bennajah, M. Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift. Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse. France. 2007.

Bensadok, K; El Hanafi, N; Lopicque, F. Electrochemical treatment of dairy effluent using combined Al and Ti/Pt electrodes system. Desalination. Volume 280. P. 244–251. 2011.

Ben Rebah, F; Siddeeg, S. M. Cactus an eco-friendly material for wastewater treatment: A review JMES. Journal of Materials and Environmental Sciences. Volume 8. Issue 5. P. 1770- P. 1782. 2017.

Berkane, N. Développement et caractérisation de nouveaux adsorbants pour l'élimination des polluants organiques en solution aqueuse. Thèse de doctorat en chimie. Faculté des sciences département de chimie. Université Mouloud Mammeri. Algérie. 2019.

Références et Bibliographiques

Bouderga, M. Adsorption du vert malachite par des Composites « Alginate/Bentonite ».Mémoire De Master. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. Algérie(Tlemcen).2015.

Boukaous, N. Extraction du colorant noir bleu naphthol et du médicament ibuprofène en milieu aqueux par membrane liquide émulsionnée. Mémoire de magister. Université d'Annaba. Algérie. 2014.

Boumali,N ; Mamine, F; Cheriet, F; Montaigne, E; Arbouche, F. Analyse du processus d'émergence de la filière figue de barbarie et de ses coproduits en Algérie : potentiel, contraintes et perspectives. New Medit. Volume3.P.113-127.2022.

Boutakiout, A. Etude physico-chimique, biochimique et stabilité d'un nouveau produit : jus de cladode du figuier de barbarie marocain (*Opuntia Ficus-Indica* et *Opuntia megacantha*). Thèse De Doctorat. L'université Nantes Angers Le Mans Et l'universitéde Sultan Moulay Slimane. Maroc.2015.

Brett, A.M.C; Olivier Brett, A.M.C; Pereira, J.L.C; Rebelo, C. Journal of applied electrochemistry. Volume23. P. 332. 1993.

Brooks,C.S. Metal recovery from industrial wastes.CRC Press.1^{er} édition. France .1986.

C

Capon,M ; Valette, V ; Courilleau,V. Chimie des couleurs et des odeurs. Editions Cultures et Techniques. France. 1993.

Cenkin, E.V; Belevstev, N.A.Electrochemical treatment of industrial wastewater, Effl. Water treat. Jour. 25, 243-247 (1985).

Charlot, G .Dosages absorptiométriques des éléments minéraux. 3^{ème}Ed. Masson. France. 1978.

Chebli, D. Traitement des eaux usées industrielles, Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique. Mémoire Doctorat en sciences. Université Ferhat Abbas .Algérie. 2012.

Références et Bibliographiques

Chen,C.C; LU, C.S; Chung,Y.C; JAN,J.L. UV light induced photodegradation of malachite green on TiO₂ nanoparticles.Elsevier. Institute of technology. Volume115. P. 520-528. Taiwan. 2006.

Chion, C; Porter, S.D.W. Schmediting .Environ. Sci. Technol .Volume17 .P. 227.1983.

Chouaki. S. Deuxième rapport national sur l'état des ressourcesgénétiques. Organisation des nations unies pour l'alimentation etl'agriculture INRAA/Juin 2006. p.91

Crête. P. Système des angiospermes. Précis de botanique. Tome II. 2^{ème}édition. P. 267-270. 1965.

D

Daneshvar (a),N; Sorkhabi, A.H;Kasiri,M.B.Decolorization Of Dye Solution Containing Acid Red 14 By Electrocoagulation With A Comparative Investigation Of Different Electrode Connevtions.Journal Of Hazardous Materials. Volume112.P.55-65.2004.

Daneshvar(b), N; Khataee, A.R; Ghadim, A.R; Rasoulifard,M,H. Decolorization of c.i.acid yellow 23 solution by electro-coagulation process ; investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption(sec). Journal Of Hazardous Materials.Volume 148(3).P.566-572.2007.

Djeberi, M.Y. Preparation de membranes chitosane/montmorillonite application a la rétention du vert de malachite. Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid – Telemcen-.Algerie (telemceb) .2014.

Dos Santos, D;Albuquerque, S.Opuntia as fodder in the semi-arid Northeast of Brazil.FAO. Volume169.P.37-50.2001.

Drogui ,P ; Asselin , M ; Satinder, K.B ; Benmoussa, H; FBlais ,J . Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. Separation and purification technology. Volume61. P. 301-310.2008.

Références et Bibliographiques

E

El-Shafai,S.A; Nasr, F.A; Sadik, M.A. Innovative electrochemical treatment of textile dye wastewater. Egyptian Journal of Chemistry. Volume62. P. 2019 - 2032. 2019.

Essadki,A.H; Bennajah,M; Gourich,B; Vial, C; Delmas, H. Electroagulation/ electroflotation in an external-loop airlift reactor-application to the decolonization of textile dye wastewater : a case study.Chemical Engineering and Processing. Process Intensification.Volume 47.Issue 8.P. 1211-1223.2007.

F

Feugang, J; Konarski, P; Zou, D; Stintzing, F; Zou, C.Nutritional And Medicinal Use Of Cactus Pear (Opuntia Spp.) Cladodesand Fruits. Frontiers inBioscience. Volume11.P.2574–2589.2006.

Flores,V.C.A; Aranda, G.O. «Opuntia-based Ruminant Feeding Systems in Mexico».University of Chapingo.P.8. Mexico. 1997.

Fournier, P «Les cactées et les plantes grasses».Ed.2^{eme}édition. Paullechevalier.P.108-305.France.1954.

G

Ginestra, G; Parker, M ; Bennett,R ; Robertson, J; Mandalari, G ; Narbad, A ; Curto,R.L ; Bisignano, G ; Faulds,C ; Waldron,K .Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [opuntia ficus-indica (l.) mill. Journal of Agricultural and Food Chemistry. Volume57. P 10323–10330. 2009.

Gnaoui, S. Séparation de vert malachite à partir de solution aqueuse par des argiles modifiées. Mémoire de magister en génie des matériaux. Faculté des sciences et de la technologie.Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Algérie .2017.

Références et Bibliographiques

Grabi,H.Purification d'une eau usée industrielle par des matériaux naturels et valorisation de la boue résultante.Thèse de doctorat.Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.Algérie.2021.

Griffith(a), M.P. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal of Botany*. Volume 91. P.1915–1921.2004.

Griffith (b), M.P; Porter,J.Phylogeny of opuntioideae (cactaceae). *International Journal of Plant Sciences*.Volume 170.P. 107–116.2009.

Griini, A. Etude cinétique de l'électrocoagulation d'un colorant cationique et test a l'absorbance sur des composes a base de fer. Mémoire de magister. Université de Blida1. Algérie .2015.

H

Habibi, Y. Contribution A L'étude Morphologique, Ultra Structurale et Chimique de la Figue De Barbarie, Les Polysaccharides Pariétaux : Caractérisation et Modifications Chimiques. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble I, Et Université Cadi Ayyad. Maroc.2004.

Holt,P.K; Barton, G.W; Mitchell, C.A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere*. Volume 59. P. 355-367 .2005.

I

Inglese, P; Saenz, C; Mondragon,C ; Nefzaoui,A ; Louhaichi, M. Ecologie, Culture Et Utilisations Du Figuier De Barbarie. FAO. Italy (Rome).2018.

K

Kadari,M .Etude de l'élimination de quelques éléments toxiques par différents extractants. Thèse de doctorat. Faculté des sciences exactes .Université Djilali LIABES. Algérie. 2016.

Kadik , B. «Les plantation semi forestières pastorales». *Revue INRA*.P. 83- 92.1974.

Références et Bibliographiques

Kannan , N. J. Hazard. Mater. Volume137. P. 1803-1809. 2006.

Kemp,W. Qualitative organic analysis: spectrochemical techniques.2nd Ed.Mc Graw Hill book company.United Kingdom. 1986.

Khouri, M.S.«Opuntia bilan écologique en Algérie».INRA et CAREF.P.59.1970.

Kiesling, R. Origen, domesticación y dis tribución de Opuntia ficus-indica. J. Prof. As soc. Cactus Dev.Volume 3.P. 50–59. (available at <http://www.jpacd.org>).1999.

Koubaya,M;Demirbas, E; Can, O.T; Bayramoglu,M. Treatment of levafix orange textile dye solution by electro-coagulation. Journal of Hazardous Materials. volume132,P.183-188.2006.

Kushwaha, A.K; Neha Gupta, M.C. Chattopadhyaya removal of cationic methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution by waste materials of daucus carota. Journal of Saudi Chemical Society. France.2011.

L

Lallouche, B. Hybridation de l'opuntia ficus indica mill .f. inermis par quatre especes d'opuntia (o. robusta var. robusta; o. engelmannii var. languiformis; o. ficus indica mill .f. amyclea; o. streptacantha lem.) dans les zones arides et semi-arides. Mémoire de magister. Université Saad Dahleb de Blida. Algerie .2008.

Langkawi , M .«Convention sur les commerce international des espèces defausse et de flore sauvages menacees d'extinction», Onzième session ducomité pour les plantes, Proposition relatives à des espèces à soumettre à la CdP12, Annexe1». Examen des propositions d'amenagement desannexes I et II de la convention, PC11 Doc.10 1.1, P.22 .2001.

Larue,O; Vorobiev,E.Inter. j. min. proc. Volume 71. Issue 1.2003.

Lefrançois,P ; Ruby,F ; Dionne, J.Y. «Nopal». ([Http://www.passeportsante.net/fr/Solutions/PlantesSupplements/Fiche.aspx?doc=nopal_ps](http://www.passeportsante.net/fr/Solutions/PlantesSupplements/Fiche.aspx?doc=nopal_ps)), PasseportSanté, Mars 2007.Consulté le 17/01/2008.

Références et Bibliographiques

Liu,C.G; Zheng,T; Liu,S ; Zhang,H.Y.Photodegradation of malachite green dye catalyzed by Keggin-type polyoxometalates under visible-light irradiation: Transition metal substituted effects .Elsevier. University NortheastDianli .PR China.P. 44-52. 2016.

Louhaichi, M;Hassan, S; Ates, S; Nefzaoui, A .Screening for cold tolerant cactus species (opuntia ficus-indica) for west asia region.Article in Acta Horticulturae. Volume 1067 .P.159-166.2015.

M

Maataoui, B.S ; Hmyene,A ; Hilali,S. Activités anti-radicalaires d'extraits de jus de fruit du figuier de Barbarie (Opuntia ficus indica). Lebanese Science Journal. Volume7. No. 1.

Merzouk,B;Yakoubi,M;Zongo,I;Leclerc,J.P;Paternotte,G.Pontviane,S;Lapicque,F.Effet of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency.desalination.Volume 275.P.181_186.2011.

Merzoug, N. Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques. Mémoire de magistère. Université Mohamed Cherif Massaadia. Algérie. 2014.

Modirshahla,N; Behnajady,M.A; Kooshaiian,S .Investigation of the effect of different electrode connections on the removal efficiency of Tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation, Dyes and Pigments. Dyes and Pigments.Volume74. Issue 2 .P. 249-257. 2007.

Mollah, M.Y.A; Morkovsky, P; Gomes, J.A.G; Kesmez, M; Parga, J.R; Cocke, D.L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J. Hazard. Mater. Volume 114.P.199–210. 2004.

Moreno, H.A.C; Cocke, D.L, Gomes J.A.G; Morkovsky, P, Parga, J.R; Peterson, E et Garcia, C. Electrochemistry behind electrocoagulation using iron electrodes.ECS Transactions. Volume 6. P 1-15. 2007

Mulas, M ; Mulas, G. «Potentialités d'utilisation stratégique dans des plantes des genres Atriplex et Opuntia dans la lutte contre la désertification», Short and medium – term priority environmental action programme (SMAP).Université des études de Sassari, groupe de la recherche sur la désertification. P.112.Italie .2004.

Références et Bibliographiques

P

Park ,S.N. Cacti : biology and uses. Univ of California Press .2002.

Patermarakis, G; Fountoukis,E. Wat. Res. Volume 24 .P.1496.1990.

Persin,F ; Rumeau, M . Tribune de l'eau. Issue 42. Volume 539. P.45-56.1989.

Piedallu. A «Le figuier de Barbarie sans épines en Algérie».Service botanique.Edition N° 77/MINERVA . P.143.Algérie.1936.

R

Reyes Agüero, J.A; Aguirre Rivera, J.R; Hernández, H.M. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). Agrociencia. Volume39.P.395–408.2005.

Reynolds, G.S ; Arias, E ; Mondragón, C; Pérezgonzález, J. «Cactus (*Opuntia* spp.) as forage».F. A. O Plant production and protection paper. Volume169. P.146.2001.

S

Schweizer, M. Docteur Nopal le Médecin Du Bon Dieu. Edition APB (Aloe Plantes Et Beauté).Ed.3^{eme} trimestre.P.81. France. 1997.

Sengil, I.A; Özacar, M.Treatment of dairywastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. J. Hazard. Mater. Volume137. P. 1197-1205. 2006.

Shour,J. Colorants and auxiliaries: Organic chemistry and application properties. Colorant BTTG Shirley: Society of dyers and colourists. Angleterre.1990.

Solak, M; Kih, M; Yazic, H; Sencan,A. Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: comparison of electrode materials and electrode connection systems. Journal of Hazardous Materials. Volume172. P. 345-35. 2009.

Stintzing, F.C; Carle,R.Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. Trends in food science & technology. Volume15.P. 19-38.2004.

Références et Bibliographiques

Suhas,P.J.G; Carrot,M.M.L;Carrott,R. Lignine frome natural adsorbent to activâtes Carbone.Bio. Technal. Volume 98, P .2301-2312, 2007.

T

Teles, A; Glänzel, W; Schubert,A. Characterization by truncated moments and its application to Pearson-type distributions. Z.Wahrscheinlichkeits theorieverw Gebiete. Volume66. P.173–183.1984.

Tiaiba, M; Merzouk, B; Mazour, M. Etude de l'appliquabilité du procédé d'électrocoagulation pour le traitement de rejets textiles. Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement .P.341-347. Algérie. 2019.

Z

Zawlotski, G.V. Traitements des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro-Fenton" Application à la minéralisation des colorants synthétique .Thèse de doctorat. Université de Marne La Vallée. France. 2004.

Zhenwang, L ; Zhenlu, C ; Jianyan, L. The PT dye molecular structure and its chromophoric,luminescences mechanism. WorldConferenceon Non-Destructive. Chemical industry machine. China. 2000.

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