

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



École Nationale Polytechnique  
Département de Génie de l'Environnement

## PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie de  
l'Environnement

### THÈME

*Traitement par EC des eaux de mer polluées à la  
Rhodamine B*

Présenté par :

**M<sup>elle</sup> BOUBEGRA DAHBIA**

Soutenu le 01/10/2015 devant le jury suivant :

Président :	Mr M. DROUCHE	Professeur	ENP
Promoteurs :	Mr N. MAMERI	Professeur	ENP
	Mme A. BAKALEM	Maitre assistante	UMBB
Examineur:	Mr. MAZIGHI	Chargé de cours	ENP

Promotion 2015

ENP- 10 avenue Hacén Badi – El Harrach - ALGER

## *Dédicace*

*Au nom du Dieu le clément et le  
miséricordieux louange à ALLAH le tout  
puissant.*

*Je dédie ce modeste travail en signe de  
respect, reconnaissance et de  
remerciement :*

*A mes chers parents*

*A mes frères : Ali & Omar*

*A mes sœurs : Hakima, Siham & Yamina*

*A mes deux petites nièces :*

*Thiziri & Thanina*

*À tous mes amis*

## *Remerciements*

Avant tout, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force de pouvoir accomplir ce travail.

Le présent travail a été réalisé au niveau du laboratoire des biotechnologies environnementales de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

En premier, j'adresse mes sincères remerciements à Monsieur N. MAMERI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, de m'avoir accueillie dans son laboratoire.

Ma plus grande gratitude va à Madame A. BAKALEM\_DJEMAI, Maitre Assistante à l'Université M'hamed Bouguerra de Boumerdès, pour son soutien, sa patience, la confiance qu'elle m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur M. DROUCHE, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

Que Monsieur MAZIGHI, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

Un grand merci s'adresse au département de Génie Minier et Génie Mécanique, particulièrement à Monsieur le M. MEZIANI, et Madame Rachida, techniciens en Génie Minier et Monsieur T. MEBROUK, technicien en Génie Mécanique, de nous avoir accueillies au sein de leurs laboratoires.

Je tiens également à remercier M<sup>elle</sup> Hanane doctorante au laboratoire des biotechnologies environnementales de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour son soutien, ses conseils et son aide.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous les enseignants et doctorants du laboratoire des biotechnologies environnementales de l'Ecole Nationale

Polytechnique d'Alger qui m'ont aidée lors de mes expériences, ainsi qu'à Madame H. BOUAM secrétaire du département.

Je tiens, également, à remercier mes camarades de classe pour leurs aides et à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

### ***Listes des figures :***

Figure III.1 : Structure chimique de la Rhodamine B.....	21
Figure IV.1 : Mécanisme de corrosion par piquuration du fer.....	29
Figure IV.2 : Schéma du principe de l'électrocoagulation.....	31
Figure IV.3 : Electrodes en mode parallèle monopolaires.....	37
Figure IV.4 : Electrodes monopolaires connectés en série.....	37
Figure IV.5 : Electrodes bipolaires en série.....	36
Figure V.1 : Schéma du dispositif expérimental de l'électrocoagulation.....	41
Figure V.2 : Schéma du protocole expérimental.....	43
Figure V.3 : Détermination de la longueur d'onde maximale.....	45
Figure VI.1 : Arrangement des électrodes en série.....	48
Figure VI.2 : Influence du nombre d'électrodes sur l'élimination de la rhodamine B.....	49
Figure VI.3 : Evolution de la concentration du métal en fonction du nombre d'électrodes.....	51
Figure VI.4 : Influence de l'intensité de courant sur l'élimination de la rhodamine B.....	52
Figure VI.5 : Evolution du temps pour 80 % d'élimination de la rhodamine Ben fonction de la densité de courant.....	53
Figure VI.6 : Evolution de la masse oxydée en fonction de la densité de courant.....	53
Figure VI.7 : Effet de la concentration initiale sur l'élimination de la rhodamine B.....	54
Figure VI.8 : Evolution du temps nécessaire pour éliminer 97 % de la rhodamine B en fonction de la concentration initiale.....	55
Figure VI.9 : Effet de la variation de la distance inter-électrodes sur l'élimination de la rhodamine B.....	56
Figure VI.10 : Influence de la variation de la concentration en sel sur l'élimination de la rhodamine B.....	57
Figure VI.11 : Evolution du taux de traitement de l'eau de mer et de l'eau synthétique dans les conditions optimales.....	59
Figure VI.12 : Evolution du temps nécessaire pour éliminer 80 % de la rhodamine B en fonction de l'effluent traité.....	60
Figure VI.13 : Evolution de la température en fonction du temps.....	60

Figure VI.14 : Evolution du pH en fonction du temps.....	61
Figure VI.15 : Evolution de la conductivité en fonction du temps.....	61
Figure A.1 : Courbe d'étalonnage de la rhodamine B.....	76

***Liste des tableaux :***

Tableau II.1 : Classification chimique des colorants.....	12
Tableau II.2 : Classification tinctoriale des colorants.....	13
Tableau III.1 : Propriétés physiques et chimiques de la rhodamine B.....	22
Tableau VI.1 : Conditions opératoires optimales de traitement du rejet réel.....	58
Tableau VI.2 : Caractéristiques de l'eau de mer à traiter.....	58

### ***Liste des abréviations :***

A : Surface active des électrodes (cm<sup>2</sup>)

ADN : Acide Désoxyribo-Nucléique

(aq) : Aqueux

C : Concentration (mg.l<sup>-1</sup>)

CAR/PP : Le Centre d'Activité Régionale pour la Production Propre

C.I : Coulor Index

C.mol<sup>-1</sup> : Coulomb par mole

°C : Degré Celsius

d<sub>i</sub> : Distance inter-électrodes

DBO : Demande Chimique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DL50 : Dose Létale 50 %

DO : Densité Optique

EC : Electrocoagulation

EESC : Energie Electrique Spécifique Consommée (kwh)

e<sup>-</sup> : Charge élémentaire (électron)

F : Constante de Faraday

FDA : Food and Drug Administration

h : Heure

I : Intensité de courant (A)

i : Densité de courant (A.cm<sup>-2</sup>)

ISO/EMAS : International Organization for Standardization / Eco-Management and Audit Scheme

(g) : gaz

l : trajet optique

m : Masse du métal oxydée (g)

M : Masse molaire (g.mol<sup>-1</sup>)

MATE : Ministère d'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

MEB : Microscope à Balayage

N : Nombre d'électrode

nm: Nanomètre

NTU: Nephelometric Turbidity Unit

pH : Potentiel d'hydrogène

R : Rendement faradique

R<sup>2</sup> : Coefficient de corrélation

RhB : Rhodamine B

R (%) : Rendement de traitement

(s) : Solide

t : Temps (s)

T : Température (°C)

U : Tension (V)

UV : Ultra-Violet

V : Volume réactionnel (l)

ε : Coefficient d'absorption molaire

[] : Concentration

λ : Longueur d'onde

μS : Micro Siemens

## Sommaire

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

### Partie bibliographique

#### Chapitre I : Pollution des eaux

Introduction.....	5
I.1. Définition.....	5
I.2. Origine de la pollution des eaux.....	5
I.2.1. Pollution urbaine.....	5
I.2.2. Pollution industrielle.....	5
I.2.3. Pollution agricole.....	6
I.3. Principales matières polluantes.....	6
I.4. Paramètres physico-chimique de la pollution des eaux.....	6
I.4.1. La température.....	7
I.4.2. Le pH.....	7
I.4.3. L'oxygène dissous (DO).....	7
I.4.4. Les MES.....	7
I.4.5. Matières organiques.....	8
I.4.6. Eléments en solution.....	8
I.4.7. Métaux lourds.....	8
I.4.8. Substances tensioactives.....	8
I.4.9. Matières colorantes.....	9
I.5. Conséquences de la pollution des eaux.....	9
I.5.1. Sur la santé.....	9
I.5.2. Sur l'environnement.....	9

#### Chapitre II : Les colorants

Introduction.....	11
II.1. Définition du colorant.....	11
II.2. Types des colorants.....	11
II.2.1. Les colorants naturels.....	11
II.2.2. Les colorants synthétiques.....	11
II.3. Classification des colorants.....	12

II.3.1. Classification chimique .....	12
II.3.2. Classification tinctoriale .....	13
II.4. Effet des colorants sur l'environnement et la santé humaine .....	15
II.4.1. Effet sur l'environnement .....	15
II.4.2. Effet sur la santé humaine.....	16
II.5. Procédés de traitement des colorants .....	17
II.5.1. Procédés physico-chimiques .....	17
L'adsorption.....	17
Les procédés membranaires .....	18
coagulation-floculation .....	18
II.5.2. Procédés chimiques.....	18
Procédés d'oxydation classique .....	19
Procédés d'oxydation avancée POA.....	19

### **Chapitre III : Généralité sur la Rhodamine B**

Introduction.....	21
III.1. Définition .....	21
III.2. Propriétés physiques et chimiques .....	22
III.3. Domaines d'application.....	22
III.4. Toxicité de la rhodamine B.....	23
III.5. Revu sur les méthodes d'élimination de la rhodamine B.....	24
III.5.1. Procédés d'adsorption .....	24
III.5.2. Photo-dégradation .....	25
Conclusion .....	25

### **Chapitre IV : l'électrocoagulation**

Introduction.....	27
IV.1. Principales lois d'électrolyse.....	27
IV.1.1. La loi de Faraday.....	27
IV.1.2. Le rendement faradique .....	29
IV.2. Définition et origine de l'EC .....	29
IV.3. Principe de l'EC :.....	30
IV.4. Les réactions mises en jeu.....	31
IV.4.1. Les réactions chimiques et physico-chimiques .....	31
IV.4.2. Les réactions électrochimiques.....	31

Les réactions à l'anode : .....	32
Les réactions à la cathode .....	32
Réaction dans l'électrolyte .....	32
IV.5. Conception de la cellule d'électrocoagulation.....	33
IV.6. Les types de connexion des électrodes.....	34
IV.6.1. connexion parallèle .....	34
IV.6.2. connexion en série .....	35
Electrodes mono-polaires .....	35
Electrodes bipolaires .....	36
IV.7. Avantages et inconvénients de l'EC .....	36
IV.7.1. Avantages.....	36
IV.7.2. Inconvénients.....	37

## **Partie expérimentale**

### **Chapitre V : Matériel et méthodes**

Introduction.....	40
V.1. Matériel.....	40
V.1.1. Dispositif expérimental de l'EC .....	40
V.1.2. Les effluents et les produits utilisés.....	42
Eau de mer synthétique .....	42
Eau de mer réelle .....	42
Le colorant.....	42
V.2. Méthodes .....	42
V.2.1. Description du protocole expérimental .....	42
V.2.2. Méthodes d'analyses .....	44
Mesure de la conductivité.....	44
Mesure de la densité optique .....	45
V.2.3. Détermination de $\lambda_{max}$ de la rhodamine B.....	45

### **Chapitre VI : Résultats et discussion**

Introduction.....	47
VI.1. Application de l'EC sur l'effluent synthétique.....	47
VI.1.1. La nature et la géométrie des électrodes .....	47
VI.1.2. Le choix du mode de connexion des électrodes .....	48
VI.1.3. La température initiale.....	48

VI.1.4. Le pH initial.....	48
VI.1.5. Influence du nombre d'électrode .....	49
VI.1.6. Influence de la densité de courant.....	51
VI.1.7. Influence de la concentration initiale en colorant .....	54
VI.1.8. Influence de la distance inter-électrode .....	55
VI.1.9. Influence de la concentration en sel .....	56
VI.2. Application de l'EC à un rejet réel.....	58
VI.2.1. Les caractéristiques de l'eau de mer.....	58
VI.2.2. Traitement de l'effluent réel.....	58
VI.2.3. Evolution de la température .....	60
VI.2.4. Evolution du pH.....	61
VI.2.5. Evolution de la conductivité.....	61
VI.2.6. Calcul de la masse de fer électro-dissoute et le rendement faradique .....	62
VI.2.7. L'énergie consommée .....	63
Conclusion .....	63
Conclusion générale.....	65
Références bibliographiques.....	68
Annexes.....	76

*« Le savoir n'est pas difficile, seule sa mise en pratique l'est »*

*Proverbe chinois*

# *Introduction générale*

# Introduction générale

---

Tout le monde s'accorde aujourd'hui à dire que notre planète se porte mal. Elle sera confrontée à une hausse drastique des besoins en eau dans un proche avenir. Ceci commence d'ailleurs déjà à se faire sentir dans certaines régions du globe.

La pollution des eaux soulève, une attention considérable à l'échelle mondiale vu les impacts toxicologiques dangereux qu'elles provoquent sur l'environnement. Les rejets de nombreuses industries (plastiques, détergents, papier et particulièrement le textile...) sont lourdement chargés en matières colorantes qui sont, le plus souvent, non biodégradables. [1]

Cette pollution constitue un problème majeur car elle peut conduire à une dégradation importante de la faune et de la flore par les effets toxiques des matières colorantes ainsi que la réduction de l'activité photosynthétique. [2]

Les ressources hydriques en Algérie restent limitées. L'accroissement rapide des besoins en eau reste continu, ce qui a mené à une surexploitation des réserves hydriques jusqu'à épuisement.

Dans le cadre de la rénovation des choix et des modes de gestion, le dessalement de l'eau de mer est apparu. Cette technique est une alternative stratégique qui permet, entre autre, de sécuriser l'alimentation en eau.

Un prétraitement en amont de dessalement pour éliminer d'éventuels polluants qui peuvent perturber le procédé est primordial.

Au cours des procédés physico-chimiques de traitement des eaux, des produits chimiques qui sont généralement toxiques et coûteux sont utilisés. De là, les procédés électrochimiques ont vu le jour.

L'électrocoagulation est parmi les procédés électrochimiques les plus efficaces pour l'élimination de plusieurs types de polluants. Elle consiste à utiliser des anodes sacrificielles pour produire les coagulants nécessaires à l'élimination de la pollution. [2]

Le rejet des agents colorants dans l'eau est particulièrement indésirable non seulement à cause de leurs aspects inesthétiques et leurs impacts sur la photosynthèse des plantes aquatiques, mais aussi parce que plusieurs colorants utilisés dans l'industrie textile et, particulièrement,

## Introduction générale

---

leurs métabolites sont toxiques (mutagènes, carcinogènes, tératogènes...) pour les êtres vivants. Sans traitement adéquat, ces colorants resteraient dans l'environnement pendant de très longues périodes. [2]

L'objectif du présent travail est le prétraitement d'une eau de mer polluée par de la rhodamine B par l'application d'un procédé électrochimique : l'électrocoagulation, en amont d'une station de dessalement. Pour cela une optimisation des principaux paramètres influençant ce procédé a été effectuée sur un effluent synthétique, par la suite une application du procédé optimisé sur un effluent réel a été réalisée.

Ce manuscrit est organisé en 3 parties :

- La première partie, une synthèse bibliographique exposera une brève description sur la pollution des eaux et les colorants, des généralités sur la rhodamine B ainsi qu'un résumé sur le procédé d'électrocoagulation.
- Une partie expérimentale présentant le dispositif expérimental, les effluents et les produits utilisés ainsi que les méthodes d'analyse appliquées.
- Une dernière partie sera consacrée à l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux.

## *Partie bibliographique*

# *Chapitre I*

## *Pollution des eaux*

## ***Introduction***

La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'écosystème aquatique. Les déversements de polluants peuvent, ainsi, modifier profondément les composantes physico-chimiques des milieux aquatiques récepteurs et générer donc de sérieux problèmes sur l'homme et l'environnement nécessitant des traitements de plus en plus drastiques.

### ***1.1. Définition***

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatique, elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu aquatique. [1]

### ***1.2. Origine de la pollution des eaux***

Divers critères de classification, reposant sur l'origine, la nature des polluants, la nature des nuisances créées (répercussions sur la santé publique, sur l'équilibre écologique en rivière ou en lac...) peuvent être utilisés: [2]

#### ***1.2.1. Pollution urbaine***

Les effluents urbains proviennent des eaux de ruissellements (essentiellement les eaux de pluies et de lavage des chaussées..), des eaux résiduaires d'origine domestique (eaux de cuisine, de lavage des locaux...etc.) et des eaux résiduaires d'activités artisanales (exemple : rejets divers provenant de petites entreprises). [3]

#### ***1.2.2. Pollution industrielle***

Dans les activités industrielles, les usines utilisent l'eau de manière répétée au cours des stades successifs de la chaîne de fabrication et donc générant de quantités énormes de rejet.

Trois grands types de rejets industriels peuvent être considérés : [4]

- Eaux à caractère minéral dominant : regroupent les eaux de lavage des gravières et toutes activités d'extraction de minéraux, eaux des usines chimiques minérales...
- Eaux à caractère organique dominant : essentiellement, le cas des industries agro-alimentaires, abattoirs, conserveries, laiteries et fromageries, brasseries, sucreries ...

## Chapitre I : Pollution des eaux

---

- Eaux de caractéristiques mixtes : elles incluent les effluents des industries textiles, papeteries et industries du bois, industries pharmaceutiques, industries mécaniques...

### ***1.2.3. Pollution agricole***

Au cours des dernières décennies, l'industrialisation de l'agriculture a provoqué de multiples impacts environnementaux. Le domaine agricole est ainsi devenu, au fil du temps, le principal secteur économique responsable de la contamination de plusieurs sources d'eau potable de surface.

Ce type de pollution intéresse les eaux de ruissellement et concerne deux familles de composés : les pesticides et les engrais.

- Pollution par les pesticides : regroupe les herbicides, les fongicides, les insecticides...
- Pollution par les fertilisants, entraînant une augmentation nette des teneurs en nitrates et en phosphates dans les eaux courantes et les eaux de nappe. [3]

### ***1.3. Principales matières polluantes***

On entend par substances polluantes pour l'eau celles qui rendent l'eau impropre à sa consommation ou qui dégradent certaines de ses propriétés. [5]

Parmi ces composés, outre certains composés biologiquement dégradables comme les substances nutritives, on compte aussi de nombreux polluants difficilement voire pas dégradables, par exemple ceux qui contiennent des huiles minérales, des résidus de pesticides, des métaux ou des hydrocarbures halogénés. Dans le cas idéal, les déchets organiques se décomposent par autoépuration biologique jusqu'à minéralisation complète pour finir sous forme de substances inorganiques. D'autres polluants, introduits dans l'environnement par l'industrie, sont pratiquement réfractaires à toute forme de dégradation par voie biologique. Leur teneur augmente dans les eaux, les sédiments et les organismes aquatiques. [6]

### ***1.4. Paramètres physico-chimique de la pollution des eaux***

L'appréciation de la qualité des eaux se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques, indicateurs d'une plus ou moins bonne qualité de l'eau.

Donc, on peut s'appuyer sur divers indicateurs pour qualifier une eau :

## ***1.4.1. La température***

La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique.

La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais également par d'éventuels rejets d'eaux résiduaires chaudes. Des changements brusques de température de plus de 3° C s'avèrent souvent néfastes. [7]

## ***1.4.2. Le pH***

Des pH faibles (eaux acides) augmentent le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons. [7]

## ***1.4.3. L'oxygène dissous (DO)***

L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques.

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (OD) est proche de la saturation, plus l'aptitude de la rivière à absorber la pollution est grande : [7]

- une valeur inférieure à 1 mg d'O<sub>2</sub> par litre indique un état proche de l'anaérobie.
- une valeur de 1 à 2 mg d'O<sub>2</sub> par litre indique une eau fortement polluée mais de manière réversible
- une teneur de 4 à 6 mg d'O<sub>2</sub> par litre caractérise une eau de bonne qualité ;
- des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense.

## ***1.4.4. Les MES***

Les matières en suspension comprennent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes de l'eau.[2]

Ces matières affectent la transparence de l'eau et diminuent la pénétration de la lumière et, par suite, la photosynthèse.

### ***1.4.5. Matières organiques***

Ce sont tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre et le lactosérum des industries agroalimentaires.

Deux méthodes permettant d'évaluer la quantité en matière organique présente dans l'eau sont généralement utilisées : la demande biologique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO). Ces deux méthodes se basent sur la différence entre la teneur en oxygène dissous initiale et la teneur en oxygène dissous finale après oxydation de la matière organique présente dans un échantillon d'eau. [7]

### ***1.4.6. Eléments en solution***

Les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) font généralement l'objet d'un suivi particulier.

Ce sont sur tous les changements brusques et importants des teneurs en ces ions qui se révèlent néfastes.

D'autres ions tels que le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), fluor ( $\text{F}^-$ ) peuvent être également mesurés. Les éléments en solution sont exprimés en  $\text{mg.L}^{-1}$ . [7]

### ***1.4.7. Métaux lourds***

Le suivi des concentrations en métaux lourds est particulièrement important vu leur toxicité et leur capacité de bioaccumulation le long des chaînes alimentaires. Contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement. [7]

### ***1.4.8. Substances tensioactives***

Elles comprennent un groupe de produits qui sont à la fois émulsionnants et moussants. Ils ont plusieurs inconvénients tels que la formation de mousse sur les surfaces des eaux, qui apparaît à partir de 0,3 à 1  $\text{mg.L}^{-1}$ . Leur dégradation par les bactéries peut aboutir à des molécules non moussantes mais non biodégradables qui peuvent s'accumuler dans les organismes. De même, en alimentation en eau potable, le goût de savon peut apparaître à des doses très faibles (quelques  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). [8]

### ***1.4.9. Matières colorantes***

Leur déversement dans le milieu aquatique même, à de très faibles concentrations, a un grand impact. Elles modifient la transparence et l'éclairement du milieu. L'action chlorophyllienne s'en trouve ralentie, la production d'oxygène en est diminuée et il y a tendance à l'installation des conditions anaérobies. [9]

### ***1.5. Conséquences de la pollution des eaux***

Les conséquences de la pollution des eaux se diffèrent selon l'origine de la pollution :

#### ***1.5.1. Sur la santé***

Les différents polluants cités avant génèrent des maladies pour l'homme et des dysfonctionnements sur l'activité de son organisme : [10]

- Ingestion et/ou inhalation des métaux lourds peut provoquer des cancers et des problèmes neurotoxiques
- Certains hydrocarbures sont reconnus par leur effet cancérigène, mutagène, reprotoxique.
- Effets épidémiologiques dus à la consommation des poissons et des fruits de mers.

#### ***1.5.2. Sur l'environnement***

- Des conséquences esthétiques présentées par la perturbation de la vue. Elles sont considérées les plus perceptibles car elles sont celles dont les riverains et le grand public auront, en premier, conscience. [8]
- empoisonnement de la flore et de la faune par les matières toxiques
- Accumulation et concentration des substances cancérigènes dans la chaîne alimentaire, et au terminus de cette chaîne, l'homme [11]
- Altération des ressources en eau naturelle

## *Chapitre II*

### *Les colorants*

### ***Introduction***

Depuis l'antiquité, l'homme utilisait des colorants pour modifier l'aspect extérieur de son environnement. Ces substances colorantes sont extraites des produits animaux ou plus souvent végétaux ou encore synthétisées à partir de produits chimiques.

Vu l'utilisation abondante des colorants dans de multiples volets industriels, notamment en textile, ces composés contribuent à la pollution des eaux naturelles. Donc, une nécessité de traitement des effluents générés est indispensable.

### ***II.1. 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: appelés auxochromes. [12]

### ***II.2. Types des colorants***

Les colorants peuvent être d'origine naturel ou synthétique : [13]

#### ***II.2.1. Les colorants naturels***

Peu de colorants naturels existent sur terre. Ces composés sont souvent extraits à partir de produits végétales tels que les fruits, les légumes, les lichens, et parfois à partir des espèces animales comme la pourpre des Phéniciens extraite du mollusque *Murex brandaris* ou les rouges cochenilles et kermès obtenus à partir d'insectes. [13]

#### ***II.2.2. Les colorants synthétiques***

Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la chimie naissante révolutionne l'utilisation des colorants. Avec la découverte des colorants synthétiques et leur production industrielle, les colorants naturels disparaissent progressivement et les opérations de teinture sont grandement simplifiées. Le premier colorant industriel, la mauvéine, fut découvert en 1856 par W. H. Perkin. [13]

Environ 8000 colorants synthétiques chimiquement différents sont dénombrés et répertoriés dans le Colour Index sous 40000 dénominations commerciales. [14]

### II.3. Classification des colorants

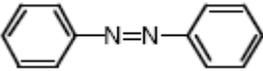
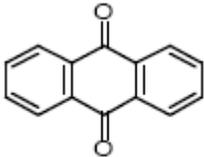
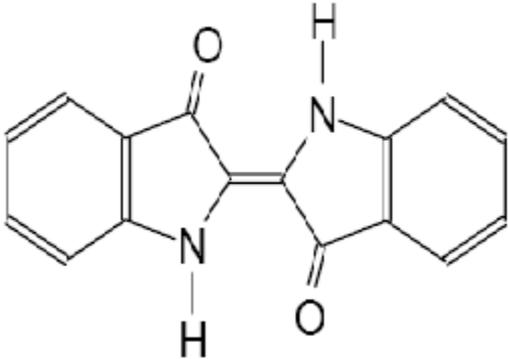
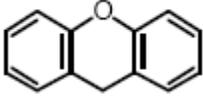
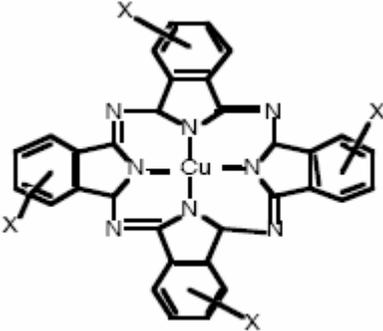
Les colorants peuvent être classés suivant plusieurs critères : [12]

#### II.3.1. Classification chimique

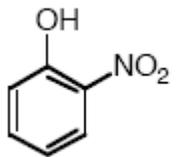
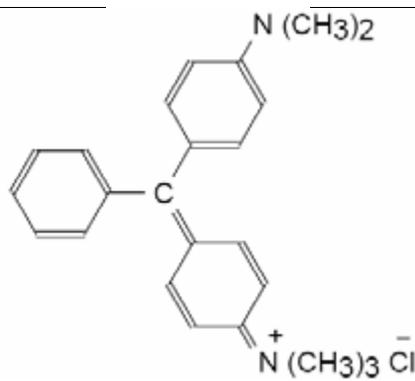
Cette classification repose sur la structure chimique du groupement chromophore. Elle est généralement utilisée par les chimistes.

Le tableau suivant résume la classification des colorants selon leur structure chimique.

Tableau II.1 : Classification chimique des colorants [12]

Le type de colorant	Structure chimique
<b>Les colorants azoïques</b>	
<b>Les colorants anthraquinoniques</b>	
<b>Les colorants indigoïdes</b>	
<b>Les colorants xanthènes</b>	
<b>Les phtalocyanines</b>	

## Chapitre II : les colorants

<b>Les colorants nitrés et nitrosés</b>	
<b>Les colorants triphénylméthanés</b>	

### *II.3.2. Classification tinctoriale*

Les technologues classent les colorants selon leurs applications. Ainsi, il est renseigné sur leur solubilité dans le bain de teinture, leur affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. Celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant - substrat est du type ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente. On distingue différentes catégories tinctoriales comme c'est présenté dans le tableau II.2 :

Tableau II.2 : Classification tinctoriale des colorants [15, 16, 17]

Type du colorant	Propriétés
Les colorants acides	<ul style="list-style-type: none"> <li>- anioniques</li> <li>- solubles dans l'eau</li> <li>- contenant des groupes acides sulfonique ou des groupes d'acide carboxylique</li> <li>- ont une affinité élevée pour la laine, fibres de protéine (la soie) et des polyamides</li> <li>- le procédé de teinture est plus rapide pour de faible pH</li> <li>- sont constitués d'azo, anthraquinone, triarylméthane</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cationiques (parfois), sont les sels de bases organiques</li> <li>- solubles dans l'eau</li> </ul>

## Chapitre II : les colorants

Les colorants basiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les principales classes chimiques sont diazahemicyanine, triarylméthane, cyanine, hémicyanine, thiazine, oxazine, et acridine</li> </ul>
Les colorants directs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anioniques</li> <li>- Solubles dans l'eau</li> <li>- contenant des groupes acides sulfonique dont la forte affinité pour les fibres cellulosiques</li> <li>- sont des composés azoïques</li> </ul>
Les colorants dispersés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- non ioniques</li> <li>- insolubles dans l'eau</li> <li>- sont la classe la plus importante de colorant pour la teinture de fibres synthétiques hydrophobes (le polyester et les acétates)</li> </ul>
Les colorants réactifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- former une liaison covalente avec la fibre</li> <li>- structures chimiques sont simples</li> <li>- spectres d'absorption montrent des bandes d'absorption étroites</li> <li>- les teintures sont beaucoup plus lumineuses</li> <li>- Leurs principales classes sont azoïques, triphénodioxazine, phtalocyanine, formazane, anthraquinone</li> </ul>
Les colorants des solvants	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Insolubles dans l'eau</li> <li>- dépourvu de groupes de solubilisation polaires tels que l'acide sulfonique, carboxylique l'acide, ou d'ammonium quaternaire</li> <li>- utilisés pour colorer des matières plastiques, de l'essence, les huiles et les cires</li> <li>- sont essentiellement azoïques et anthraquinone</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sont des molécules complexes contenant du soufre</li> <li>- actuellement leur structure est inconnue</li> </ul>

## Chapitre II : les colorants

---

Les colorants au soufre	<ul style="list-style-type: none"><li>- faible coût</li><li>- bonnes propriétés de résistance au lavage des teintures</li></ul>
Les colorants de cuve	<ul style="list-style-type: none"><li>- insoluble dans l'eau</li><li>- Leurs principales classes sont anthraquinone et indigoïde</li></ul>

### *II.4. Effet des colorants sur l'environnement et la santé humaine*

Diverses recherches et expériences ont prouvé l'effet nocif des colorants synthétiques sur l'environnement et sur la santé humaine, d'où l'interdiction de leur utilisation dans les produits alimentaires et certains sont interdits même dans les autres secteurs tels que le textile.

#### *II.4.1. Effet sur l'environnement*

La pollution des cours d'eau peut être à l'origine de divers rejets agricole ou industriel. Parmi les majeurs polluants, les colorants.

Les rejets d'effluents des différentes industries, chargés en colorants, dans le milieu aquatique, peuvent nuire considérablement aux espèces animales, végétales ainsi qu'aux divers microorganismes vivant dans ces eaux d'où le déséquilibre de la chaîne alimentaire.

Cette toxicité pourrait être liée à :

- La sous-oxygénation : à un certain seuil de pollution en matière organique dans le milieu aquatique, les processus naturels d'autoépuration ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène. [18]
- L'eutrophisation : sous l'action des microorganismes, les colorants libèrent des nitrates et des phosphates dans le milieu naturel. Ces ions peuvent devenir toxiques et altèrent la production d'eau potable. [18]

Ainsi, Les colorants absorbent fortement la lumière du soleil, empêchant de ce fait l'activité photosynthétique des différentes espèces aquatiques et menacent sérieusement l'écosystème. [19]

Par ailleurs, la très faible biodégradabilité des colorants, due à leurs poids moléculaires élevés et à leurs structures complexes, confère à ces composés un caractère toxique de degré

## Chapitre II : les colorants

---

différent d'un colorant à un autre. Pour évaluer ces effets toxiques dans le milieu environnant, le paramètre DL50 reste efficace. [20]

Ainsi, la DL50 représente, expérimentalement, la dose d'une substance qu'on estime létale pour 50 % des organismes.

### *II.4.2. Effet sur la santé humaine*

Le principal intérêt des colorants alimentaires est dû à l'aspect esthétique des aliments qui, dans la plupart de ces composés synthétiques, affectent la santé de l'être humain par différentes voies : cutanée, inhalation ou encore par ingestion.

Le profit est pratiquement l'unique objectif du producteur, ce qui a poussé ce dernier à intégrer plusieurs colorants dans les divers procédés de fabrication des aliments. Ceci a engendré des problèmes de santé à l'être humain, à cause de la toxicité de ces composés. Ils se manifestent par certains symptômes tels que : [21]

- Irritation du tube digestif.
- Diminution de la croissance.
  - Augmentation du poids des reins et du foie. Dermatite allergique de contact, érythémato-vésiculeuse prurigineuse, d'atteinte symétrique, prédominant aux plis de flexion. [22]

L'eutrophisation, la bioaccumulation et la sous-oxygénation, qui nuisent à la vie piscicole des différentes espèces et par conséquent celles de toute la chaîne alimentaire arrivant à l'espèce humaine. [23]

Une des plus graves conséquences de l'usage des colorants synthétiques réside en des effets cancérogènes suite à leur ingestion répétée. Ainsi, beaucoup de ces dangereux composés ont été mis en évidence après une expérimentation rigoureuse sur les animaux.

La plupart des colorants ne sont pas toxiques directement, leurs effets mutagènes, tératogènes ou cancérogènes apparaissent après dégradation de la molécule initiale en sous produits d'oxydation. [18]

### ***II.5. Procédés de traitement des colorants***

La pollution de l'eau par les matières colorantes générées par les différentes industries marque un enjeu environnemental. La diversification d'utilisation des colorants engendre des rejets de différentes usines de : textile, tannerie, papier et ancre, plastiques et peinture, produits pharmaceutiques et cosmétiques...

L'élimination des polluants organiques tels que les colorants est actuellement bien maîtrisé à l'échelle du laboratoire et appliqués à grande échelle incluant les traitements physico-chimiques (adsorption, les procédés membranaires, coagulation-floculation), chimiques (procédés d'oxydation classiques, par: oxygène, ozone, oxydants tels que NaOCl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ...ainsi que les procédés d'oxydation avancée), biologiques (traitement aérobie et anaérobie) et finalement les procédés électrochimiques. On s'intéressera à la technique de l'électrocoagulation que l'on détaillera dans le chapitre IV.

Les colorants organiques synthétiques sont des composés impossibles à éliminer par dégradation naturelle. [18]

En revanche, deux types de procédés pour l'élimination des colorants des effluents sont majoritairement appliqués :

- procédés physico-chimiques
- procédés chimiques

#### ***II.5.1. Procédés physico-chimiques***

##### **L'adsorption**

L'adsorption est un procédé de transfert de matière entre une phase liquide (ou gazeuse) chargée en composés organiques ou inorganiques et une phase solide, l'adsorbant. Pendant des décennies, les charbons actifs commerciaux ont été les principaux, voire les seuls adsorbants utilisés dans les filières de traitement des eaux. Comme les colorants ne sont pas tous ioniques, la plupart des adsorbants ne peuvent pas réduire tous les colorants.

L'adsorption est efficace dans le domaine des faibles concentrations. [24]

Toutefois, cette technique ne résout pas le problème, elle ne fait que déplacer la pollution de l'état liquide à l'état solide. De plus, ces techniques, non destructives, nécessitent des opérations postérieures onéreuses de régénération et de post traitement des déchets solides. [25]

### **Les procédés membranaires**

Les procédés membranaires sont des techniques de séparation par perméation à travers une membrane, sous l'action d'un gradient de pression. La séparation se fait en fonction des tailles moléculaires des composés, mais aussi de leur forme, leur structure, leur polarisabilité, leur solubilité, de la présence de co-solutés, du matériau et de la configuration de la membrane, des paramètres opératoires, des phénomènes de colmatage, etc.... Les techniques membranaires regroupent l'osmose inverse, la microfiltration, l'ultrafiltration et la nanofiltration. Ces dernières sont des techniques efficaces pour l'élimination de toutes les classes de colorants. [26, 27]

La nanofiltration s'applique surtout au traitement des bains de teinture de colorants réactifs en agissant comme un filtre moléculaire, tandis que la microfiltration retient les matériaux colloïdaux tels que les colorants dispersés ou de cuve grâce à une "membrane écran" [28]. L'ultrafiltration ne s'applique qu'à la réduction de la DCO et des solides en suspension et ne se montre réellement efficace qu'en combinaison avec la coagulation/floculation. [29]

### **coagulation-floculation**

L'élimination des colorants par coagulation-floculation se fait par l'ajout des réactifs chimiques (le sulfate d'aluminium  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , l'aluminate de sodium  $\text{NaAlO}_2$ , le chlorure ferrique  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , le sulfate ferreux  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , le sulfate ferrique  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) qui entraînent la déstabilisation des particules colloïdales, suivie de leur agglomération (floculation) en micro-flocs, puis en flocons volumineux et décantables. [30]

Cette technique est souvent appliquée pour le traitement des eaux usées de l'industrie de textile pour enlever davantage la demande chimique en oxygène (DCO) en amont d'un traitement biologique. Elle peut aussi être utilisée comme procédé principal de traitement [31].

L'inconvénient majeur de ce procédé est la génération des quantités énormes de boues en fin de traitement, ce qui nécessite des investissements supplémentaires pour leur traitement en vue de valorisation.

### ***II.5.2. Procédés chimiques***

Les procédés chimiques sont, généralement, appliqués lorsque les procédés biologiques deviennent inefficaces ou comme prétraitement à ces derniers.

On distingue 2 types de procédés chimiques :

### **Procédés d'oxydation classique**

Les techniques d'oxydation classique utilisent des oxydants puissants tels que l'hypochlorite de sodium (NaOCl), l'ozone (O<sub>3</sub>), ou encore le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), en présence ou non de catalyseur. Ces méthodes de traitement sont couramment utilisées pour l'épuration d'effluents contenant des polluants organiques, y compris des colorants. [32]

Il a été observé que l'oxydation chimique avec l'un de ces oxydants n'est pas toujours efficace pour le traitement des polluants organiques persistants. Dans ce cas, on fait appel aux procédés d'oxydation avancée.

### **Procédés d'oxydation avancée POA**

Les POA regroupent des méthodes chimiques, photochimiques ou électrochimiques. Le développement de ces méthodes est en plein essor depuis environ trois décennies. Ces méthodes de traitement consistent à dégrader les molécules de colorants en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O au moyen du rayonnement UV en présence peroxyde d'hydrogène. [33]

- Le principe des méthodes chimiques repose sur la réaction de Fenton. Le réactif de Fenton n'est autre que le peroxyde d'hydrogène activé au moyen d'un sel ferreux et constitue un agent oxydant adapté au traitement d'effluents contenant des colorants résistants à la biodégradation ou toxiques vis-à-vis des microorganismes [34].
- Les POA électrochimiques sont considérés comme des techniques plus intéressantes du point de vue de mise en œuvre et le volet économique. [35] Les POA photochimiques permettent la minéralisation complète du colorant par la réaction de photo-dégradation en présence ou non d'agent oxydant. [33]

## *Chapitre III*

### *Généralités sur la Rhodamine B*

### *Introduction*

La rhodamine B est un pigment synthétique de couleur vive. Cette substance est largement utilisée en tant que colorant dans de nombreuses industries, y compris celles qui produisent le papier, les peintures, les textiles, le cuir, et la porcelaine. [36]

### *III.1. Définition*

La rhodamine B est un composé organique, c'est un colorant basique appartenant à la classe des xanthènes, qui sont des composés constituant les dérivés de la fluorescéine halogénée. [36]

La structure chimique de la rhodamine B est présentée sur la figure III.1 :

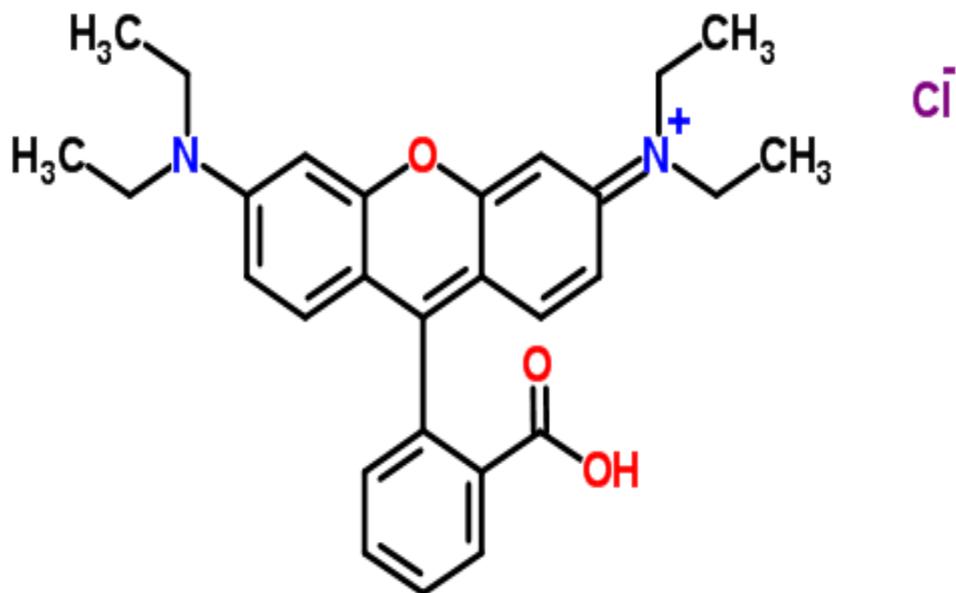


Figure III.1 : Structure chimique de la rhodamine B [37]

## Chapitre III : Généralités sur la Rhodamine B

### III.2. Propriétés physiques et chimiques

Le tableau suivant illustre les propriétés physiques et chimiques de la rhodamine B.

Tableau III.3 : Propriétés physiques et chimique de la rhodamine B [36, 37, 38]

Identification de la rhodamine	
Abréviation	RhB
Classe chimique	Xanthène
Formule brute	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$
Nom IUPAC	Chlorure de [9-(2-carboxyphényl)-6-diéthylamino-3-xanthénylidène]-diéthylammonium
Autres dénominations	Tetraethylrhodamine, C.I. 45170, Basic violet 10, Rhodamine O, Rhodamine 610, C.I. Pigment Violet 1
N° CAS	<a href="#">81-88-9</a>
Propriétés physiques et chimiques	
Poids moléculaire	479.010 g.mol <sup>-1</sup>
État physique	Poudre
Apparence	Vert-brun
Odeur	Inodore
Température de fusion	210–211 °C
Solubilité	50 g.l <sup>-1</sup> à 20 °C dans l'eau
Volatilité	0 % à 21 °C

### III.3. Domaines d'application

La rhodamine connaît de diverses applications industrielles :

- Teinture de fibres cellulosiques (coton, viscose, papier, bois), soie, laine, nylon, fibres acryliques [39]
- Teinture des cuirs et peaux [40]
- Encres [39]
- Coloration de produits chimiques [39]

## Chapitre III : Généralités sur la Rhodamine B

---

- Coloration de fleurs et feuillages [39]
- Vernis [39]
- Hydrologie :
  - repérage des cours d'eau ou des fuites dans les canalisations [39]
  - déterminer les volumes, débits et directions d'écoulement et de transport [41]
- Produits phytosanitaires [39]
- Utilisation dans des applications de biotechnologie telles que la microscopie à fluorescence, la cytométrie en flux, la spectroscopie de corrélation de fluorescence, l'ELISA. [41]

L'utilisation de ce composé est interdite dans les aliments et les produits cosmétiques en raison de sa toxicité et des risques chroniques que génère ce colorant sur la santé humaine. [42, 43]

Aux Etats-Unis, L'utilisation de la rhodamine B comme un additif cosmétique est limité par la FDA (Food and Drug Administration). A titre d'exemple, un rouge à lèvres ne peut contenir plus de 6% en poids rhodamine B et l'ingestion orale est limitée à 0,75 mg par jour. [44]

### ***III.4. Toxicité de la rhodamine B***

La rhodamine B est connue par sa toxicité aiguë sur les espèces animales. Cette nocivité provoque des irritations de la peau, les yeux et des voies respiratoires. [45]

Des tests d'exposition en rhodamine B montrent des effets aigus, à savoir : [38]

- Oculaire : Irritation de l'œil avec rougeurs, douleur et conjonctivite, possibilité d'une affection oculaire.
- Cutané : Peut causer une photosensibilisation de la peau.
- Inhalation : Matériel irritant pour les membranes muqueuses et les voies respiratoires.
- Ingestion : Provoque une irritation gastro-intestinale, affection de foie.

Egalement, des essais d'ingestion orale faits sur des souris et des rats ont provoqué des lymphomes, des polypes de l'estomac, un retard de croissance et de décès dus à des lésions hépatiques. Le composé a également montré une activité mutagène dans le test d'Ames et provoque des lésions de l'ADN dans des cellules ovariennes de hamster. [43]

Si la plupart des colorants ne sont pas toxiques directement, une portion significative de leurs métabolites l'est. Leurs effets mutagène, tératogène ou cancérigène apparaissent après dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation : amine cancérigène pour les azoïques, leuco-dérivé pour les triphénylméthanes. Ainsi, ce composé a des propriétés toxiques et est considéré comme une substance cancérigène. [40, 43]

### ***III.5. Revu sur les méthodes d'élimination de la rhodamine B***

La rhodamine B est un polluant représentatif de la pollution industrielle des eaux usées. Ce colorant est souvent utilisé pour développer ou tester de nouvelles méthodes pour l'élimination des espèces récalcitrantes. [46]

Compte tenu de son caractère dangereux et ses effets nocifs, il est impératif de procéder à l'élimination de la rhodamine B des eaux polluées.

Or cette toxicité élevée empêche ce colorant d'être traité par les procédés biologiques. A cet effet, des procédés physico-chimiques et électrochimiques sont davantage utilisés tel que : l'adsorption sur charbon actif, la coagulation, l'osmose inverse, les POA. [46]

#### ***III.5.1. Procédés d'adsorption***

L'adsorption est l'un des procédés qui offre une alternative intéressante pour l'élimination de colorant à partir de solutions aqueuses. [36]

Cette technique est l'une des meilleures méthodes pour réduire la pollution à de faibles concentrations, elle est également pratique et simple à mettre en œuvre, mais considérée un peu cher. [40]

Différents adsorbants ont marqués l'efficacité d'élimination de la rhodamine par ce procédé. A titre d'exemple :

- Les résidus de cône de cèdre sont utilisés comme un agent de sorption efficace dans l'élimination de la Rh B à partir des solutions aqueuses. [36]
- L'utilisation de charbon actif à partir des enveloppes de graines de *Moringaoleifera* est fiable pour l'enlèvement de la rhodamine B à partir d'une solution aqueuse rhodamine B artificiellement contaminés. [40]
- Un adsorbant carboné est fabriqué à partir de *Thespusia populinia* montre un enlèvement efficace de la rhodamine B. [47]

## Chapitre III : Généralités sur la Rhodamine B

---

- Les résultats d'une étude montrent que la céréale, un matériau abondant en Algérie, peut être utilisée efficacement pour l'élimination de la rhodamine B des eaux usées. [48]

L'utilisation de l'adsorption, quel que soit l'adsorbant, requière des opérations postérieures onéreuses de régénération et de traitement des déchets solides résultants en fin de traitement d'où le recours à des techniques plus économes.

### *III.5.2. Photo-dégradation*

Les chercheurs à travers le monde entier développent de plus en plus des matériaux pour la photocatalyse. [49]

De nombreux articles récents ont montrés que des solutions aqueuses de la rhodamine B peuvent être décolorées par des rayons UV en présence d'un catalyseur tel que le peroxyde d'hydrogène, [46] ou des semi-conducteurs tel le dioxyde de titane [50, 51] oxyde de vanadium [52] ...

Récemment le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) a reçu beaucoup d'attention en raison de sa stabilité chimique, non-toxicité, et à son faible coût. [53]

Étant donné que des radicaux hydroxyles sont des oxydants très forts, ils peuvent réagir avec les molécules de colorant pour produire des produits intermédiaires, ce qui peut provoquer une décoloration de la solution d'origine. [54]



Ces radicaux, une fois générés dans le milieu réactionnel, sont aptes d'oxyder une large gamme de polluants organiques de manière rapide et non sélective. [52]

### *Conclusion*

Vu la molécule géante de la rhodamine B pouvant être rejetée dans les milieux aquatiques, et après une recherche bibliographique sur les procédés d'élimination de celle-ci, les procédés électrochimiques s'avèrent être une bonne alternative pour l'élimination de la rhodamine B d'où le choix de l'électrocoagulation pour le traitement de cette substance qui n'a pas été utilisée jusqu'à présent.

## *Chapitre IV*

### *L'électrocoagulation*

### ***Introduction***

Les eaux de surface sont de plus en plus polluées par les colorants, De diverses études ont attiré l'attention sur l'efficacité du procédé d'électrocoagulation vu la simplicité de son principe de fonctionnement et de son coût raisonnable. [55]

### ***IV.1. Principales lois d'électrolyse***

Dans le but de la maîtrise et de l'optimisation du procédé d'EC, la compréhension des différents phénomènes mis en œuvre au sein de la cellule d'électrolyse est indispensable. [6]

#### ***IV.1.1. La loi de Faraday***

Faraday (1791-1867) a effectué des travaux sur l'électrolyse à une époque où la nature ionique des électrolytes n'était pas encore connue. Il a établi une loi quantitative qui peut s'expliquer très simplement lorsqu'on connaît la nature ionique des électrolytes. [55]

Dans notre cas, supposant que seules les réactions au niveau des électrodes ; l'oxydation à l'anode et la réduction à la cathode ; ont lieu dans le réacteur d'EC.[57]

Lors de l'oxydation de l'anode en fer, 2 e<sup>-</sup> sont libérés. Pour l'électro-dissolution d'une mole de fer, il faudra 2 moles d'électrons.[55]

La charge d'une mole d'électron :  $6.02 \cdot 10^{23} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} = 1 \text{ F}$

1 F= 1Faraday = charge d'une mole d'électrons. On peut faire passer le courant pendant un temps plus au moins long.[55]

La quantité de métal dissoute dépend de l'intensité du courant ainsi que la durée d'électrolyse. [55]

Donc, il faut 96500 C pour l'électro-dissolution d'un équivalent gramme d'un élément donné, donc par règle de trois, on peut tirer la masse théorique du métal dissous :

## Chapitre IV : L'électrocoagulation

---

$$96500 \text{ C} \rightarrow 1 \text{ équivalent gramme} = \frac{M}{n}$$

$$1 \text{ C} \rightarrow \frac{M}{n} * \frac{1}{96500}$$

$$I * t \text{ C} \rightarrow m = \frac{I * t * M}{n * F}$$

C'est la loi de Faraday :[55]

$$m = \frac{I * t * M}{n * F} \quad (\text{éq IV.1})$$

I = intensité du courant électrique imposé [C / s = A]

t = temps [s]

n= nombre d'électrons cédés ou gagnés.

M = masse moléculaire de la substance [g.mol<sup>-1</sup>]

m = masse du métal dissous. [g]

De même, la loi de Faraday permet d'estimer la quantité d'hydrogène formé. [57]

La quantité de fer mise en solution par électro-dissolution des anodes de fer semble supérieure à celle estimée par cette loi de Faraday.[58]

Les électrodes de fer sont attaquées par des ions hydroxydes produits par réduction ce qui contribue à la piquration du métal et sa mise en solution dans le milieu aqueux.[59]

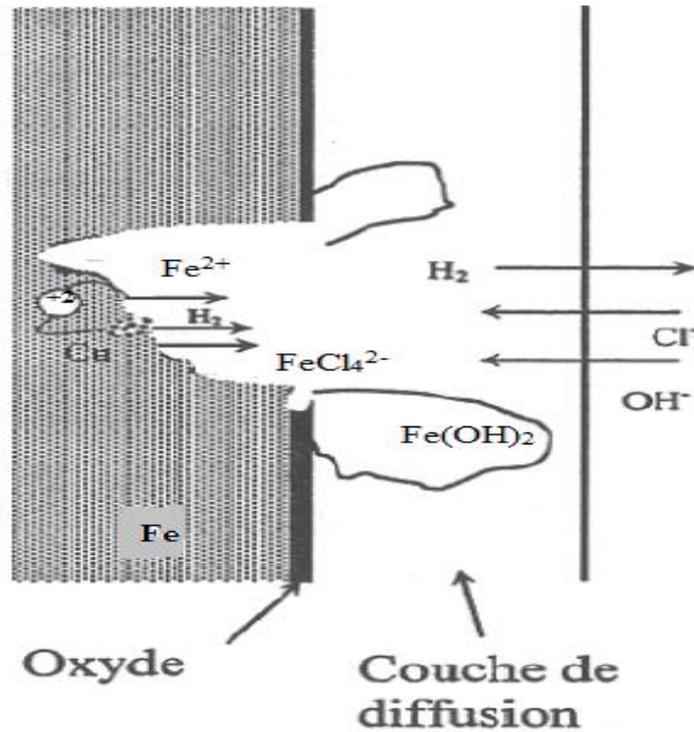


Figure IV.1: Mécanisme de corrosion par piquration de fer

### IV.1.2. Le rendement faradique

Le rendement faradique représente le rapport de la masse réelle du métal dissous mesurée expérimentalement sur la masse théorique déterminée par la loi de Faraday. [61]

$$R = \frac{m_{réelle}}{m_{théorique}} * 100\% \quad \text{éq IV.2}$$

Si le courant qui passe dans l'électrolyseur ou la pile ne sert pas uniquement à produire la réaction étudiée, le rendement faradique est inférieur à 1 (à 100 %). [62]

Lorsque plusieurs réactions se déroulent simultanément à l'interface électrode/solution, le rendement est le plus souvent inférieur à 1. [62]

### IV.2. Définition et origine de l'EC

Tel que son nom l'indique, l'EC est la combinaison du principe du procédé physicochimique la coagulation-floculation avec l'électrochimie. Ce procédé s'opère en présence d'anodes et de cathodes plongées dans la solution à traiter.

## Chapitre IV : L'électrocoagulation

---

L'EC est utilisée comme une technologie de traitement des eaux usées. Dans sa forme simple, elle utilise une cellule électrochimique avec application d'une différence de potentiel au niveau des électrodes généralement des électrodes en fer ou en aluminium et l'électrolyte est l'eau usées.[63]

Le premier document reportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer. [59]

Les recherches se sont poursuivies et de multiples articles et revues scientifiques sont publiés sur des effluents de caractéristiques très différentes telles les eaux de surface, les eaux usées, les effluents des industries agro-alimentaires...

En 1984, Vik réalise un travail démontrant la possibilité de produire de l'eau potable par le procédé d'EC à partir des eaux naturelles norvégiennes fortement chargées en substances humiques. [59]

L'importance de l'électrocoagulation s'est accrue du fait de son efficacité, généralement supérieures aux autres techniques, pour éliminer les différentes formes de pollution.[57]

### ***IV.3. Principe de l'EC :***

L'EC consiste à générer in situ dans la cellule d'électrolyse figure V.2 les ions susceptibles de provoquer la coagulation des particules colloïdales par dissolution d'anode métallique solubles appelé anode sacrificielle dans laquelle une réaction d'oxydation du métal aura lieu sous l'action de passage d'un courant électrique entre deux électrodes (généralement en fer ou en aluminium).[64]

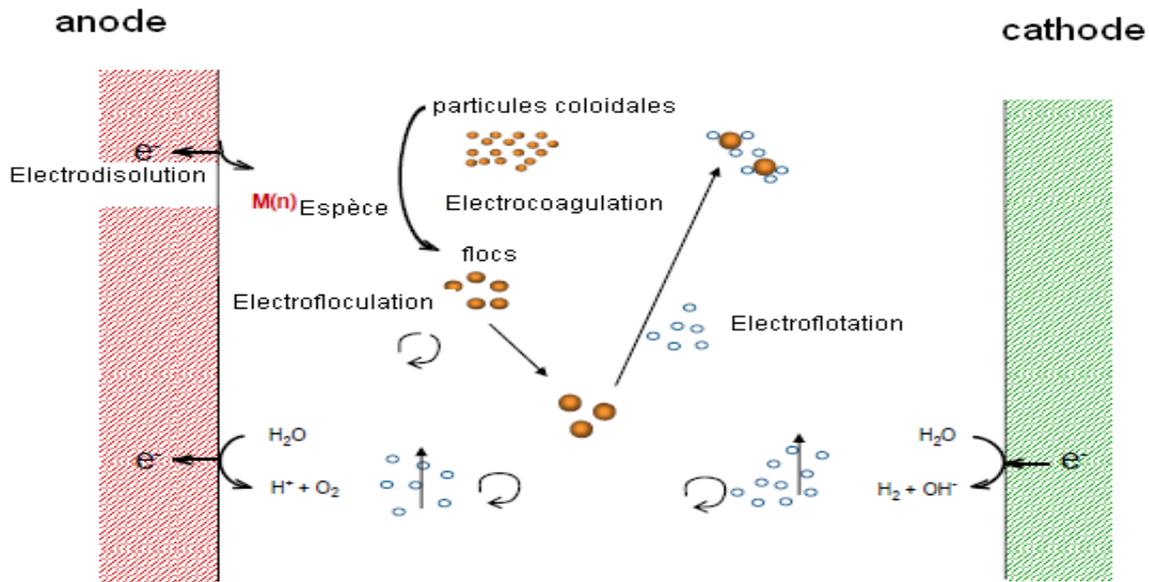


Figure IV.2 : Schéma du principe de l'EC [65]

### ***IV.4. Les réactions mises en jeu***

Au cours du traitement, plusieurs réactions, dont le type varie entre physico-chimique, électrochimique et chimique, peuvent être observées :

#### ***IV.4.1. Les réactions chimiques et physico-chimiques***

Elles sont présentées principalement par : [66]

- les interactions chimiques entre les ions  $Fe^{+2}$  (ou  $Al^{+3}$ ) générés par dissolution anodique, et les anions présents dans les eaux usées (sulfures, phosphates, etc.), lesquelles entraînent la formation de composés insolubles
- la flottation de particules solides et d'impuretés dissoutes dues à la présence de bulles de gaz d'hydrogène ( $H_2$ ) générées à la cathode
- l'adsorption des polluants à la surface des hydroxydes ferreux (ou des hydroxydes d'aluminium)

#### ***IV.4.2. Les réactions électrochimiques***

Elles sont présentées principalement par : [66]

- l'électrophorèse (déplacement de particules chargées sous l'effet du champ électrique).

## Chapitre IV : L'électrocoagulation

---

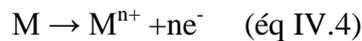
- la réduction cathodique et chimique des composés organiques et inorganiques ainsi que la formation de dépôts métalliques à la cathode.
- La réaction d'électro-chloration qui est une technique qui permet la production in situ d'une solution diluée d'hypochlorite de sodium et donc une désinfection de l'eau traitée : [67]



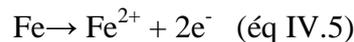
Le mécanisme de l'EC peut être évalué à partir des réactions suivantes : [68]

### Les réactions à l'anode :

La dissolution électrolytique de l'anode métallique (Aluminium ou fer) par oxydation produit des espèces aqueuses  $\text{M}^{n+}$  par l'équation suivante :



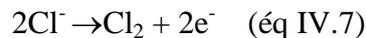
Cas de fer par exemple :



De plus, dans le processus électrochimique, l'électro-dissolution de l'anode est en compétition avec l'oxydation de l'eau présentée par l'équation suivante :

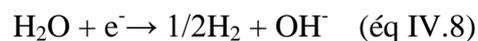


Comme réaction supplémentaires : [69]



### Les réactions à la cathode

La réaction qui a lieu au niveau de la cathode est la réduction de l'eau :



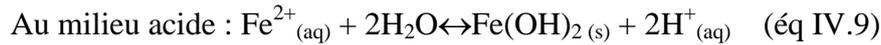
### Réaction dans l'électrolyte

Les bulles d'hydrogène flottent dans le réacteur d'EC. Le même principe que pour l'aluminium, Les ions de fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ) réagissent avec l'eau pour former le complexe  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  qui va précipiter. Ces précipités forment des floccs qui, à leur tour, se combinent avec les espèces polluantes présentes dans l'eau selon la réaction suivante : [70]

---

## Chapitre IV : L'électrocoagulation

---



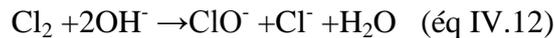
En présence de gaz O<sub>2</sub> dissous, des complexes de Fe(OH)<sub>3</sub> sont générés à partir de l'oxydation de Fe<sup>2+</sup> par l'intermédiaire de l'équation éq IV.11.[70]



Ces coagulants formés déstabilisent les particules en suspension ou précipitent et adsorbent les polluants dissous.

L'agent coagulant produit, l'hydroxyde d'ions ferreux Fe(OH)<sub>2</sub>(s), est favorable dans les conditions de forte alcalinité du milieu. Cependant, l'hydroxyde d'ions ferriques Fe(OH)<sub>3</sub>(s) est produit dans les conditions de présence d'une teneur élevée en O<sub>2</sub> dissout. [65, 71]

Encore, d'autres réactions ont lieu à l'anode et à la cathode, il se forme :[69]



Plus particulièrement, en cas d'élimination de colorants par ce procédé, celui-ci sert de ligand à se lier à un fragment de fer hydraté qui donne un complexe comme le montre la réaction (éq IV.14) . Les charges positives ou négatives des floccs attirent les régions opposées des colorants. [65]



La coagulation de ces floccs conduit à des particules qui sont en outre séparés de l'effluent par sédimentation ou électroflottation. [65]

### ***IV.5. Conception de la cellule d'électrocoagulation***

La conception d'une cellule d'EC dépend des objectifs épuratoires à atteindre et des contraintes inhérentes à son installation pour une application particulière. Une liste exhaustive des facteurs doivent être vérifiés : [72]

- La chute ohmique entre les électrodes doit être réduite au minimum.

## Chapitre IV : L'électrocoagulation

---

- L'accumulation des bulles des gaz  $O_2$  et  $H_2$  à la surface des électrodes doit être réduite au minimum.
- L'empêchement du transfert de masse à travers l'espace entre les électrodes doit être minimum.

La chute ohmique dépend de : [73]

- La conductivité de la solution d'électrolyte
- La distance entre les deux électrodes
- La géométrie des électrodes

Pour diminuer l'erreur due à la chute ohmique, trois astuces peuvent être appliquées : [75]

- Utilisation d'une solution fortement conductrice (1000 à 2000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ).
- Diminuer la distance entre les électrodes.
- Conception d'un moyen électronique de compensation de la chute ohmique (action de rétroaction d'un potentiostat).

Le transfert de masse peut être amélioré en augmentant la turbulence dans le réacteur d'EC et cela par un débit à l'intérieur du réacteur plus élevé. Cette augmentation de turbulence permet également la réduction de la couche de passivation près des électrodes.

Pour réduire au minimum l'accumulation de bulles de gaz d'hydrogène et d'oxygène, on doit assurer un écoulement de l'électrolyte autour des électrodes.

### ***IV.6. Les types de connexion des électrodes***

Le mode de connexion des électrodes joue un rôle significatif dans le prix du processus d'EC. Trois types d'arrangement des électrodes sont possibles. La différence entre ces trois modes se trouve dans la connexion entre les électrodes qui entraîne une différence des expressions des tensions et des intensités de courant dans les cellules.[55, 58]

#### ***IV.6.1. connexion parallèle***

Les anodes et les cathodes sont connectées en parallèle, elles sont monopolaires.[58]

Un nombre de  $n$  électrodes donne  $(n-1)$  résistance montées en parallèle. La cellule est soumise à la même tension  $U$  fournie par le générateur. [55]

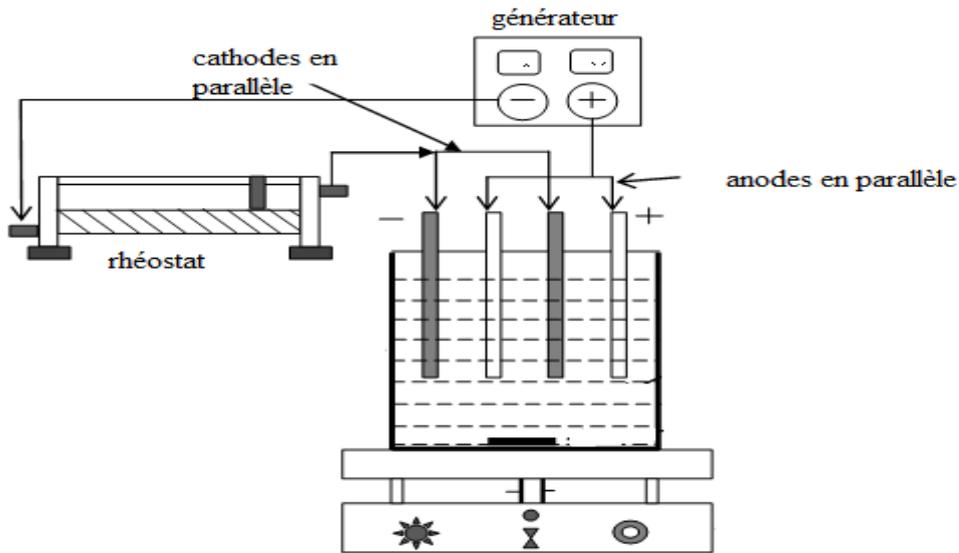


Figure IV.3 : Electrodes en mode parallèle monopolaires

## IV.6.2. connexion en série

Ce mode regroupe deux sous-types :

### Electrodes mono-polaires

Chaque paire d'électrodes sacrificielles est reliée de manière interne avec l'autre. L'addition des tensions des cellules conduit à une différence de potentiel plus élevée pour un courant donné. [58]

Or, si le générateur fournit une tension  $U$  et une intensité  $I$ , chaque résistance est traversée par un courant  $I$  et soumise à une tension  $U/2n$ . [55]

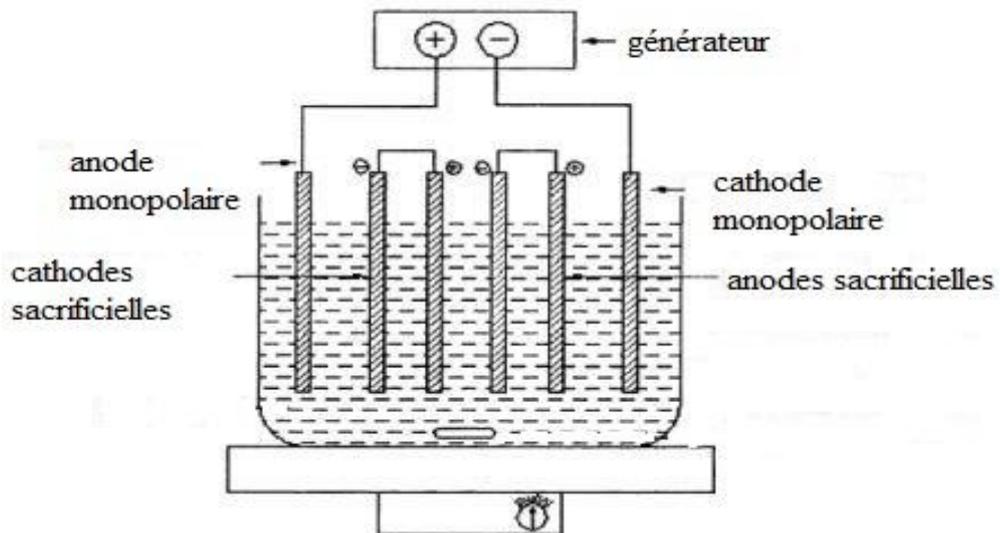


Figure IV.4 : Electrodes monopolaires connectés en série

### Electrodes bipolaires

Dans ce mode de connexion, les électrodes externes sont connectées au générateur, or les électrodes internes ne sont pas connectées entre eux.

Le même courant  $I$  passe à travers les résistances qui sont soumises à la tension  $U/n-1$ . On remarque toutefois une différence dans le nombre de résistances. Pour  $n$  électrodes, il y a  $(n-1)$  résistances.[55]

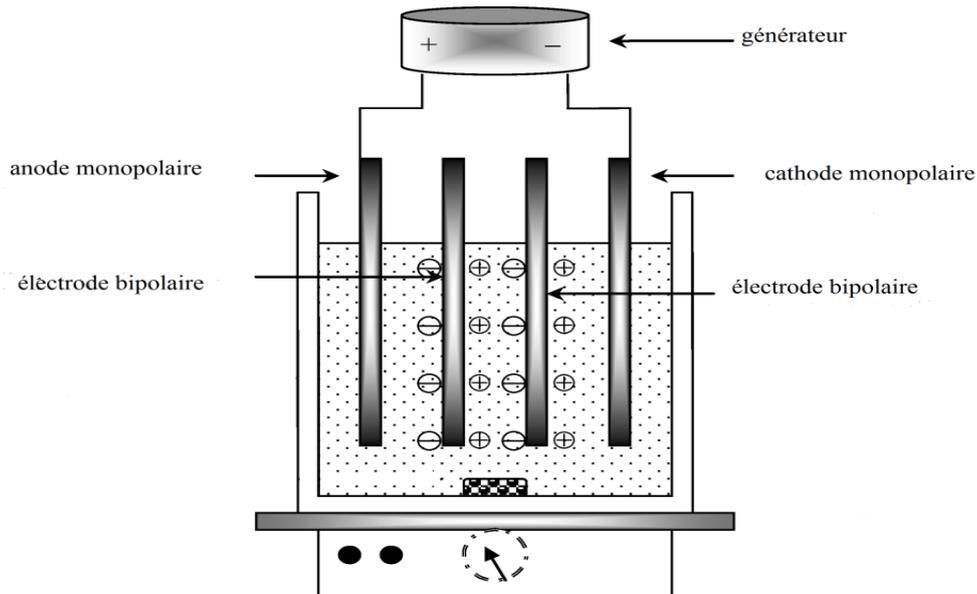


Figure IV.5 : Electrodes bipolaires en série

Ce mode de connexion permet de travailler à de faibles densités de courant et de générer de manière plus efficace et plus rapide les espèces coagulantes.

### *IV.7. Avantages et inconvénients de l'EC*

#### *IV.7.1. Avantages*

- Le procédé d'EC est une méthode simple et efficace dont l'agent coagulant est généré in situ donc pas d'ajout de réactif chimique d'où la réduction de la boue produite. [75]
- Efficacité d'élimination des particules et la possibilité d'une automatisation complète du procédé.[76]

## Chapitre IV : L'électrocoagulation

---

- L'EC est une technique rapide, consomme moins de matériels et plus économique dont son coût est d'environ 3 fois moins cher que la coagulation chimique dans les conditions optimales.[77]
- Génération des bulles résultantes des gaz produits au niveau des électrodes ( $O_2$  et  $H_2$ ) qui permettent la coalescence (électro-flottation).[71]
- la présence du courant électrique dans l'EC facilite la migration des espèces chargées et leur adsorption sur les particules polluantes.[78]

### *IV.7.2. Inconvénients*

- Les procédés classiques basés sur la coagulation chimique n'ont besoin que d'énergie mécanique pour réaliser l'agitation tandis que l'EC consomme aussi de l'énergie électrique, pour dissoudre l'anode sacrificielle. [78]
- L'EC est utilisée pour le traitement des eaux et des eaux usées à l'échelle laboratoire et industrielle. Or, les résultats obtenus au laboratoire sous des conditions contrôlées ne peuvent pas être prolongés en industrie. Ce qui rend l'EC une technologie énigmatique.[63]
- Absence du véritable consensus sur l'approche la plus appropriée d'une application donnée, cela est due à l'insuffisance des règles systématiques de la conception du réacteur et presque rien de modélisation. [63]
- Les bulles de gaz formées sont des sphères isolantes, et une fois accumulées sur la surface des électrodes, elles augmenteront la résistance électrique de la cellule d'EC et en conséquence une plus grande énergie électrique doit être fournie. [73]

## *Partie expérimentale*

# *Chapitre V*

## *Matériel & Méthodes*

### ***Introduction***

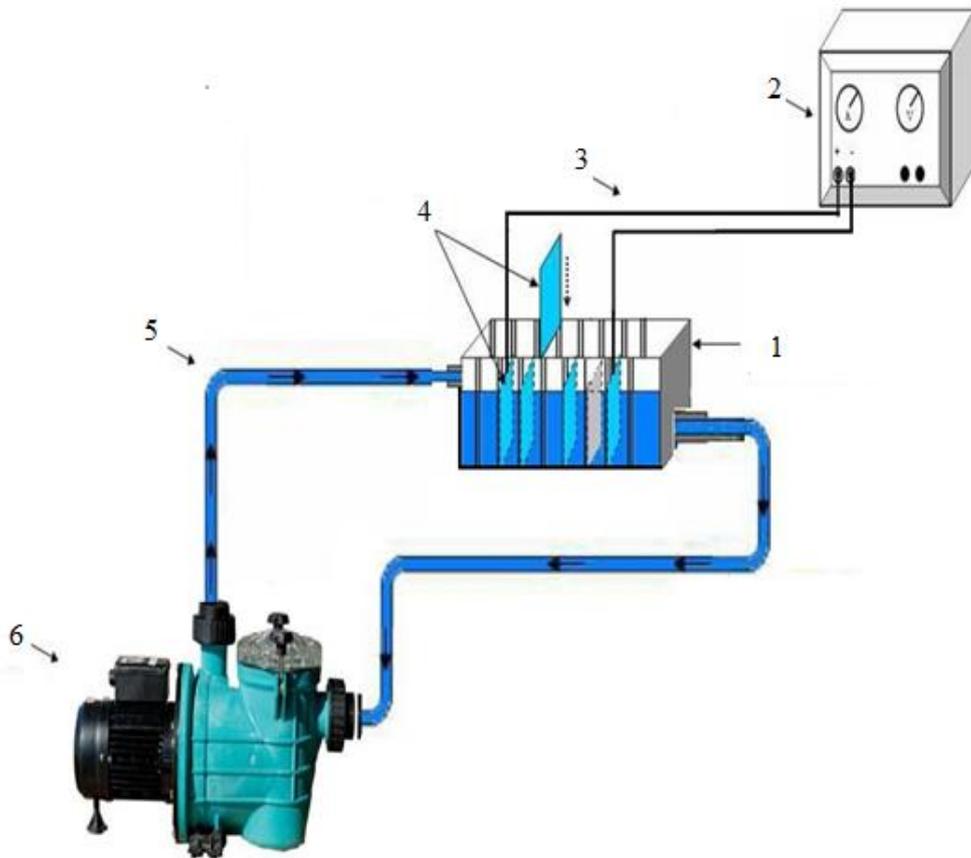
Le présent chapitre décrit le dispositif expérimental utilisé, les effluents traités lors des expériences effectuées, ainsi que les méthodes d'analyse.

### ***V.1. Matériel***

#### ***V.1.1. Dispositif expérimental de l'EC***

Le dispositif expérimental d'électrocoagulation est, tel que schématisé par la **figure** constituée de :

- une enceinte en plexiglas de volume de 2 l en mode batch.
- Une pompe EHEIM servant à recirculer le liquide à traiter et à maintenir l'homogénéisation.
- Un intensiomètre MCP M10-SP-303E assurant l'alimentation électrique.
- Des électrodes en fer rectangulaires de dimension 95\*50\*1 mm.mm.mm Cela correspond à une surface active des électrodes de 47.5 cm<sup>2</sup>.



1 : la cellule d'électrocoagulation

2 : générateur de courant

3 : fils électriques

4 : les électrodes

5 : les conduites de passage de l'effluent

6 : pompe

Figure V.1 : Schéma du dispositif expérimental de l'électrocoagulation

### *V.1.2. Les effluents et les produits utilisés*

Durant les manipulations, deux types d'effluents ont été utilisés, une eau de mer synthétique et une eau de mer réelle.

#### **Eau de mer synthétique**

Les solutions servant aux essais d'optimisation ont été préparées à partir de l'eau distillée équilibrée à la température ambiante. Une quantité de chlorure de sodium (NaCl) permettant d'obtenir une concentration massique de  $35 \text{ g.l}^{-1}$  a été dissoute dans l'eau. Selon l'essai, différentes quantités de polluant ont été dissoutes dans l'eau salée. Le pH de la solution n'a pas été modifié

#### **Eau de mer réelle**

L'effluent réel sur lequel nous avons travaillé est une eau de mer prélevée du côté de la plage située sur la rive Est d'Alger, à côté du centre commercial ARDIS. Cette eau est initialement vierge en colorant, que nous contaminons avec de la rhodamine B.

L'effluent ainsi préparé a été traité par électrocoagulation dans les conditions optimales déterminées sur l'effluent synthétique.

#### **Le colorant**

Notre étude a été faite sur un polluant organique : le colorant Rhodamine B. une étude détaillée de ce composé a été faite dans le chapitre III.

### *V.2. Méthodes*

#### *V.2.1. Description du protocole expérimental*

Le schéma suivant représente le protocole expérimental suivi :

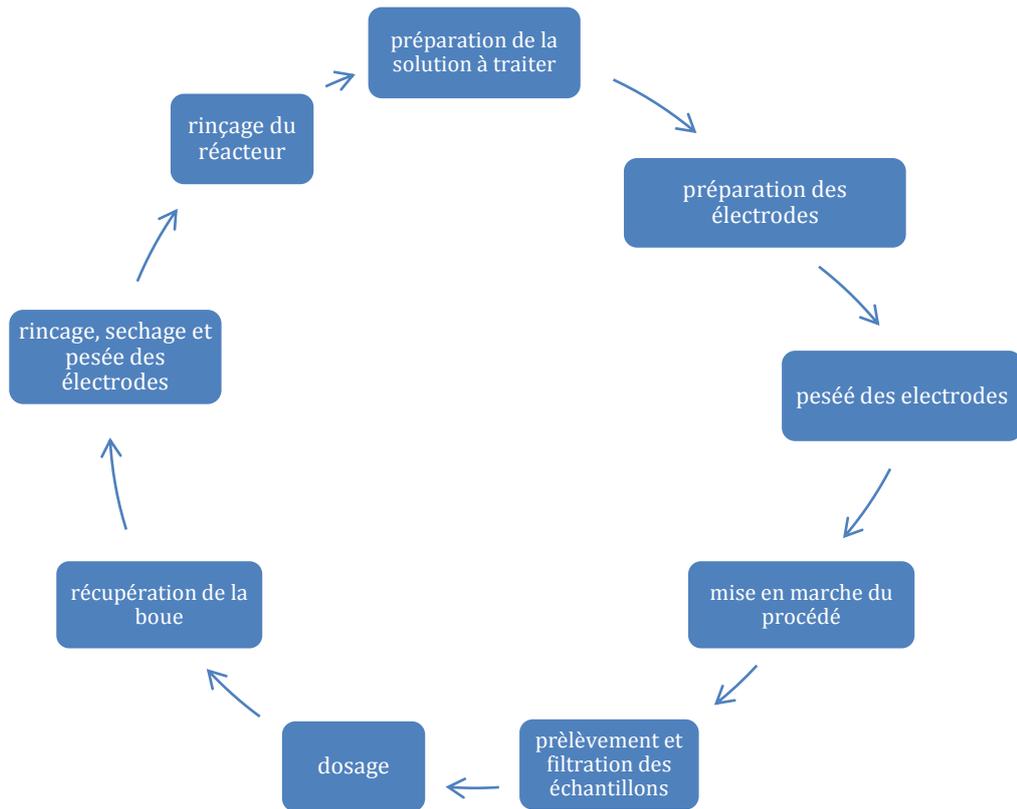


Figure V.2 : Schéma du protocole expérimental

- Le volume réactionnel est de 1.5 l, Pour assurer l'homogénéisation de la solution préparée, on a procédé à une agitation pendant quelques minutes.
- Les électrodes ont été décapées à l'aide du papier verre, immergées pendant quelques minutes dans une solution de HCl 5N, dans le but de nettoyer leur surface et d'éviter une éventuelle passivation, rincées avec de l'eau distillée, et enfin pesées.
- Avant la mise en marche du procédé, le pH, la température, la conductivité ainsi que la DO ont été mesurés, cela correspond au temps zéro. Le montage (voir la figure V.1) a été établi et mis en route pendant un temps de réaction de deux heures.
- Au cours du traitement, la prise des prélèvements a été faite à l'aide d'une pipette et filtrés afin d'éliminer les floccs de boue flottants. Les filtrats sont été dosés par la suite.

Un certain nombre de paramètres a été étudié dans le but d'optimiser le procédé d'EC, à savoir :

- Nombre d'électrodes : 2, 3, 4, 5, 6.
- L'intensité du courant électrique : 0.25, 0.50, 0.75 et 1.00 A

## Chapitre VI : Matériel et méthodes

---

- La concentration initiale en rhodamine B : 30, 50, 75, 100 mg.l<sup>-1</sup>
  - La distance inter-électrode : 1 et 2 cm
  - Concentration en NaCl : 35 et 2 g.l<sup>-1</sup>
- En fin de traitement, la boue formée a été récupéré dans une éprouvette conique pour se décanter et récupérer le culot et la sécher dans l'étuve pendant 24h à une température de 105 °C. Ces échantillons de boue séchée sont analysés par microscope à balayage électronique (MEB).
- Pour déterminer la masse oxydée des électrodes, ces dernières sont pesées en fin de réaction après les avoir rincées avec de l'eau distillée et séchées.
- à la fin de chaque manipulation, l'enceinte du réacteur est minutieusement rincée avec de l'eau de javel et de l'eau chaude.

### V.2.2. Méthodes d'analyses

Différentes cinétiques ont été suivies pour la détermination du taux d'épuration de l'effluent :

- la température
- le pH
- la conductivité
- la densité optique

Pour la température, le pH et la conductivité, les sondes sont directement immergées dans la cellule d'EC. Or pour la DO, des prélèvements d'un volume réactionnel de 10 ml sont effectués chaque dix minutes dans la première heure et chaque vingt minutes pendant la deuxième heure de traitement.

La durée totale du traitement est de deux heures.

Mesure de pH et de la température Le pH et la température ont été suivi en utilisant un multimètre de type *HANNA instruments, HI 8314 membrane* Possédant une sonde de pH et une autre pour la température.

### Mesure de la conductivité

La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre de type *HANNA instruments, EC 214*

### Mesure de la densité optique

La spectrophotométrie UV-visible est une méthode de caractérisation basée sur la mesure de la densité optique d'un milieu à une longueur d'onde donnée.

La lecture des valeurs de la DO est effectuée sur un spectrophotomètre de type *JENWAY, 6705 UV/Vis*

#### V.2.3. Détermination de $\lambda_{max}$ de la rhodamine B

Un balayage de diverses longueurs d'onde est effectué, le spectre UV montre une absorbance maximale atteinte à  $\lambda_{max}$  de l'ordre de 554 nm. (Voir figure V.3). [79]

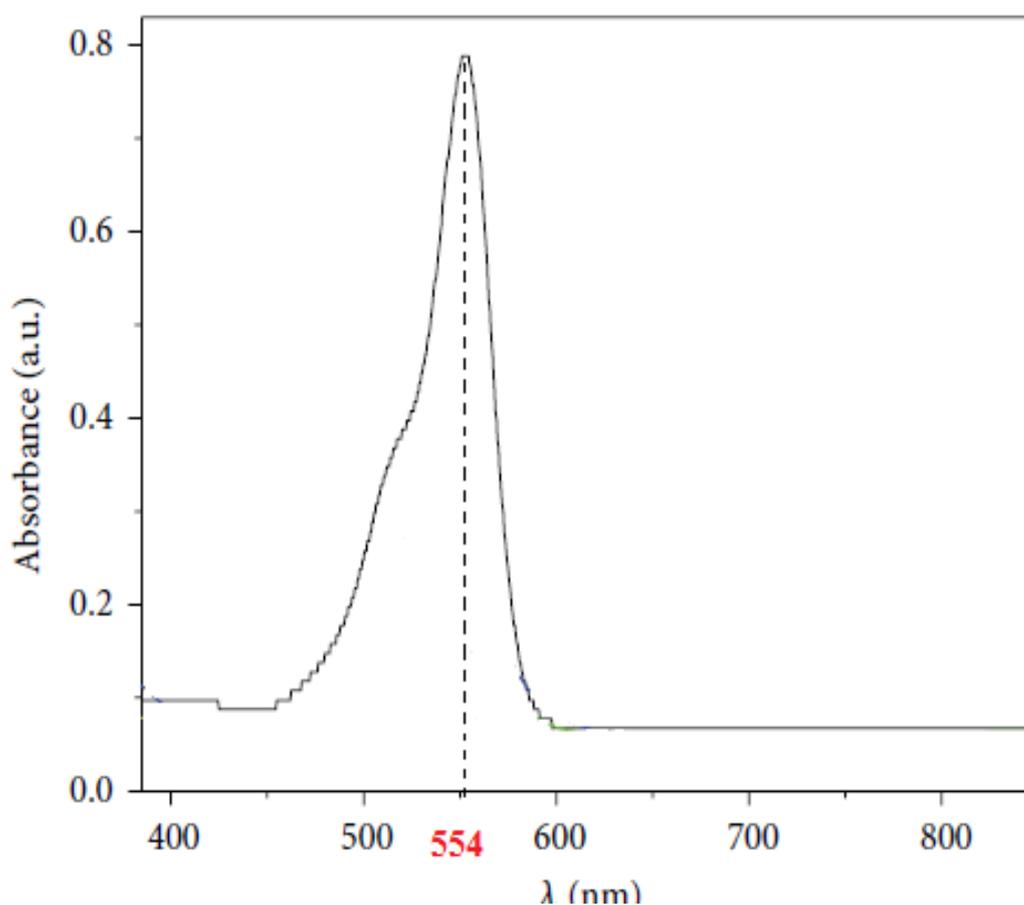


Figure V.3 : Détermination de la longueur d'onde maximale

Sur la base de ce résultat, on a établi une courbe d'étalonnage de la rhodamine B afin de déterminer le domaine de concentration pour laquelle la loi de Beer-Lambert est respectée (obtention d'une droite).

## *Chapitre VI*

### *Résultats & discussion*

### ***Introduction***

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux du traitement de la rhodamine B par le procédé d'EC. Pour ce faire, l'influence de nombreux paramètres a été étudiée pour aboutir à optimiser l'élimination de la pollution colorée de l'effluent liquide.

Finalement, une eau de mer polluée artificiellement par la rhodamine B a été traitée dans les conditions optimales précédemment déterminées.

### ***VI.1. Application de l'EC sur l'effluent synthétique***

D'après l'étude détaillée menée au chapitre III, on a conclu que la technique d'EC dépend de différents paramètres expérimentaux. Ces points sont vérifiés lors de nos expériences :

- Le nombre d'électrode
- L'intensité de courant
- La concentration initiale en colorant
- La distance inter-électrode
- La concentration en sel

A cause du temps limité des expériences, certains paramètres influençant l'EC ne sont pas optimisés. Ils ont été fixés au début des manipulations en se basant sur la littérature ou bien on a juste opéré dans les conditions initiales de l'effluent.

#### ***VI.1.1. La nature et la géométrie des électrodes***

Une étude comparative entre l'aluminium et le fer comme métal des électrodes montre que d'un point de vue économique, le fer est moins onéreux que l'aluminium.[77]

Les électrodes en Fer sont capables d'atteindre un rendement de décoloration similaire que celui des électrodes en aluminium mais à une basse intensité de courant et de conductivité.[77]

Lorsque la dimension du réacteur atteint une certaine taille, les électrodes planes offrent un montage et un nettoyage faciles.[80] D'où le choix de la géométrie plane des électrodes.

De plus l'effet nocif de l'aluminium sur la santé humaine fait qu'il est de moins en moins utilisé dans le domaine du traitement des eaux.

## Chapitre VI : Résultats et discussion

---

De ce fait, au cours de toutes nos expériences, des électrodes en fer ont été utilisées.

### *VI.1.2. Le choix du mode de connexion des électrodes*

L'arrangement des plaques métalliques a été fixé en mode en série avec électrodes bipolaires. Cela est plus économique et plus efficace en termes de rendement. [81]

Dans ce mode de connexion, les électrodes externes sont connectées au générateur, or les électrodes internes ne sont pas connectées entre elles.

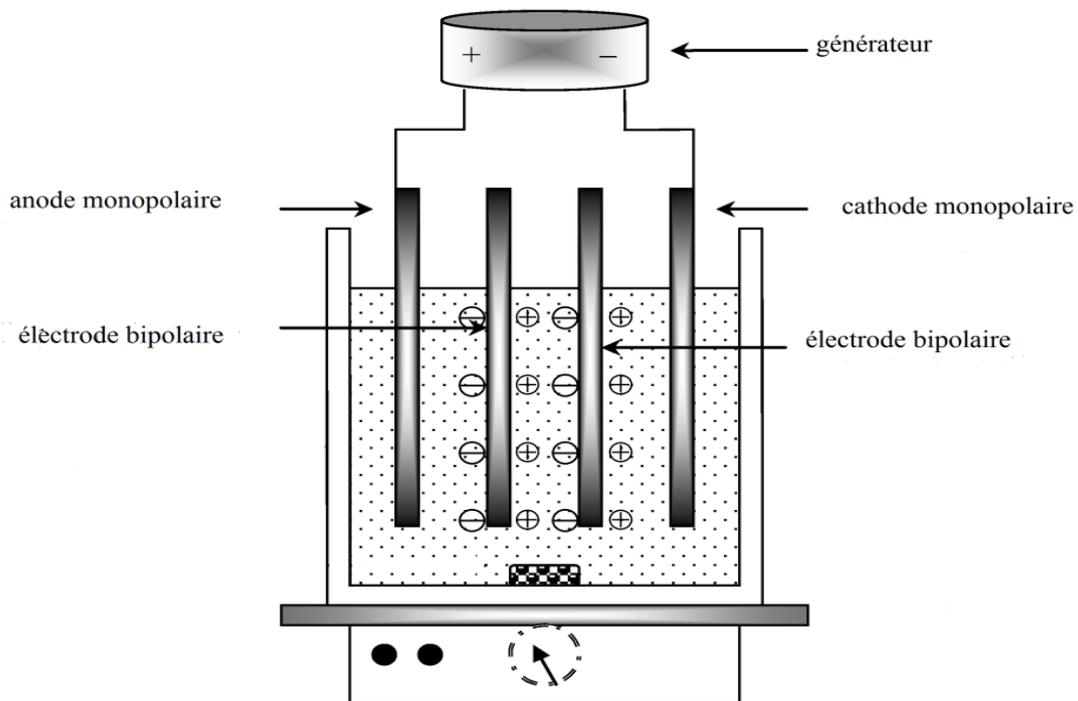


Figure VI.1 : Arrangement des électrodes en série

### *VI.1.3. La température initiale*

Au cours des manipulations, la température ne sera pas maintenue constante. G. Chen et all montrent que l'augmentation, non exagérée, de la température influe positivement sur l'activité d'oxydation de l'anode.[82]

### *VI.1.4. Le pH initial*

Il a été montré que pour une conductivité élevée, comme dans notre cas, l'effet du pH devient non significatif. [82]

## Chapitre VI : Résultats et discussion

Particulièrement, en utilisant des électrodes en fer, il a été prouvé que l'EC est peu dépendante du pH. [77]

### VI.1.5. Influence du nombre d'électrode

L'effet du nombre d'électrode sur l'efficacité du procédé d'EC est examiné par la variation de celui-ci et le maintien de tous les autres paramètres constant, à savoir :

L'intensité de courant : 0.75 A

La concentration initiale en colorant : 50 mg.l<sup>-1</sup>

La distance inter-électrode : 1 cm

La concentration en sel : 35 g.l<sup>-1</sup>

Comme déjà indiqué, les électrodes sont en fer.

Les résultats obtenus pour les différents nombre d'électrode sont représentés sur la figure VI.2

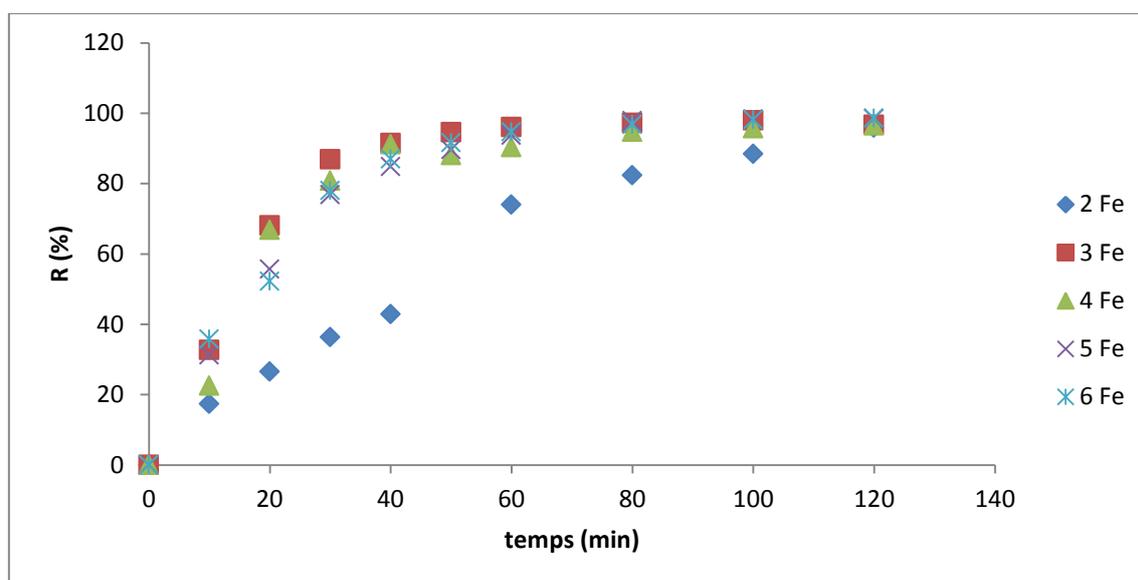


Figure VI.2 : Influence du nombre d'électrode sur l'élimination de la rhodamine B

$$C_i=50 \text{ mg.l}^{-1}, I= 0,75\text{A}, d_i=1\text{cm}, [\text{NaCl}] = 35\text{g.l}^{-1}$$

Mis à part de 2 électrodes, l'allure des courbes présente le même profil, un abattement du même ordre est observé. Cette différence d'allure peut être expliquée que pour un système d'arrangement des électrodes en série avec électrodes bipolaires est plus efficace qu'un mode

## Chapitre VI : Résultats et discussion

---

de connexion monopolaire puisque en mode bipolaire la surface active des électrodes est plus grande. Par exemple, Les rendements d'élimination de la rhodamine pour 2 et 3 électrodes sont de 43% et 92% respectivement pour une durée de traitement de 40 minutes.

La figure montre une cinétique plus rapide pour 3 électrodes.

D'autre part, la quantité de fer dissoute lors du traitement est maximale dans le cas de 3 électrodes, ce qui génère une concentration optimale en complexes responsables de la fixation de la pollution colorée.

Le nombre optimal de trois électrodes correspond à rapport surface/volume (S/V) optimal calculé par l'équation VI.1 : [58]

$$\frac{S}{V} = \frac{\text{surface active des électrodes}}{\text{Volume réactionnel}} = \frac{9.5*5*3}{1.5} \quad (\text{éq VI.1})$$

$$\frac{S}{V} = 9.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

La concentration en métal dissous à partir des électrodes est calculée par la relation suivante :

$$C = \frac{m_i - m_f}{V} \quad (\text{éq VI.2})$$

Avec,

C : concentration en métal ( $\text{mg.l}^{-1}$ )

$m_i$  : masse initiale des anodes (mg)

$m_f$  : masse finale des anodes (mg)

V : volume de l'eau traitée (l)

Un tracé de la concentration du métal dissous en fonction du nombre d'électrode est illustré par la figure VI.3 :

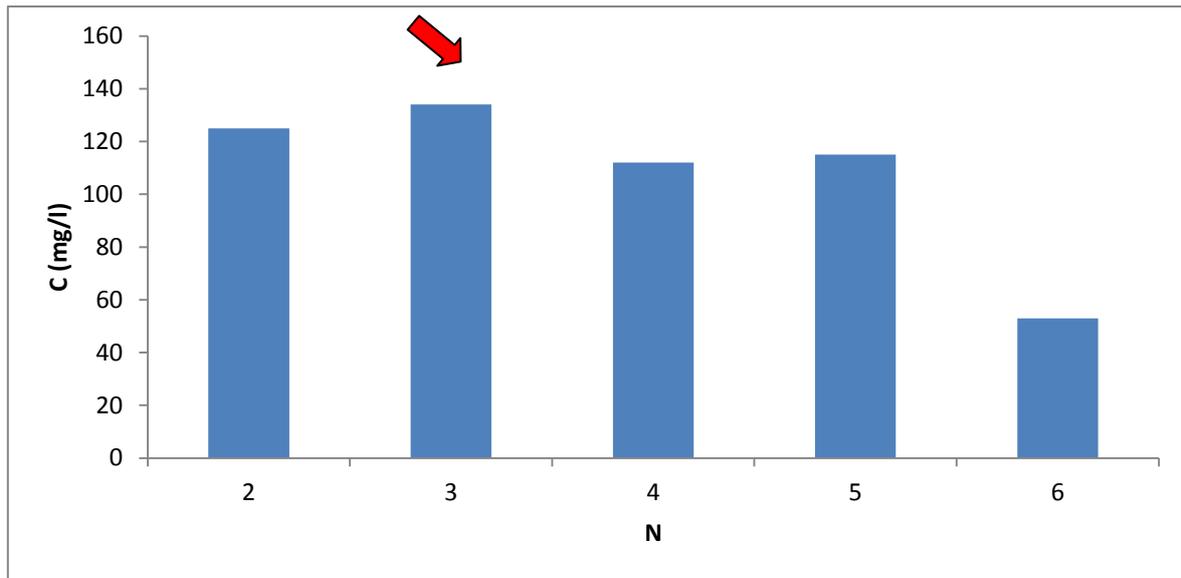


Figure VI.3: Evolution de la concentration du métal oxydé en fonction du nombre d'électrode

Cet histogramme confirme le choix de 3 électrodes comme nombre optimal d'électrodes. En passant de 2 à 3 électrodes, la concentration passe de 125 à 135  $\text{mg.l}^{-1}$ . Cependant, au-delà de ce nombre de plaque, la concentration décroît jusqu'à aboutir à 53  $\text{mg.l}^{-1}$  pour 6 électrodes.

### VI.1.6. Influence de la densité de courant

La densité de courant consiste en le courant traversant un plan entre surfaces de polarité opposées, elle est calculée en faisant le rapport entre le courant total et la surface totale des faces d'électrodes ayant une polarité positive [83]

La relation entre l'intensité et la densité de courant est représentée par la formule suivant :

$$i = \frac{I}{A} \quad (\text{éq VI.3})$$

$i$  : la densité de courant ( $\text{mA/cm}^2$ )

$I$  : l'intensité de courant (A)

$A$  : surface des électrodes chargées positivement ( $\text{cm}^2$ )

La densité de courant est un paramètre essentiel dans le processus d'EC car il est le seul facteur qui peut être contrôlé directement. Celui-ci ajuste le débit et la taille de production des bulles dans le milieu réactionnel et donc affecte la croissance des floccs, ce qui peut influencer l'efficacité de l'EC.[84] Une intensité trop élevée entraîne une mousse abondante ce qui n'est pas intéressant.

## Chapitre VI : Résultats et discussion

Le même design expérimental est répété sauf que cette fois ci le nombre d'électrode, après être optimisé, a été fixé à 3 plaques. Donc, un intervalle d'intensités de courant allant de 0.25 à 1.00 A par pas de 0.25 A est appliqué.

La figure VI.4 représente l'influence de l'intensité de courant sur le taux d'élimination de la rhodamine B.

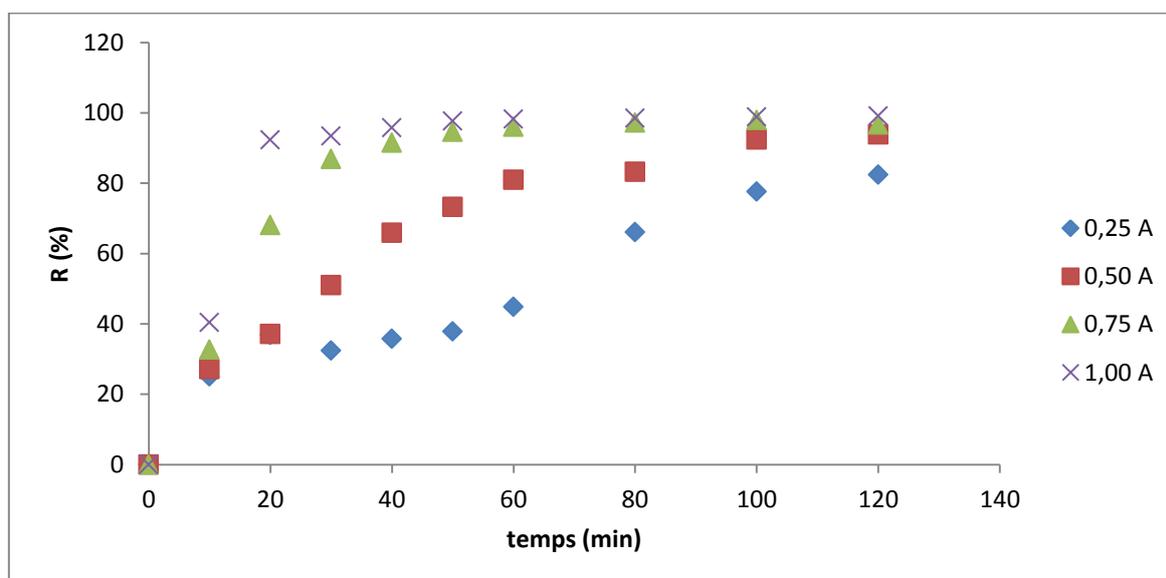


Figure VI.4: Influence de l'intensité de courant sur l'élimination de la rhodamine B

$$C_i = 50 \text{ mg.l}^{-1}, N = 3, d_i = 1 \text{ cm}, [\text{NaCl}] = 35 \text{ g.l}^{-1}$$

Le passage de l'intensité de courant de 0.25 A à 1.00 A entraîne un passage du taux d'enlèvement de la couleur, respectivement, de 25 % à 40 % au bout des dix premières minutes et de 37 % à 92 % après 20 min de traitement. Le rendement, donc, d'élimination de la couleur croît significativement avec l'augmentation de la densité de courant.

L'augmentation de la tension aux bornes des électrodes favorise le transport électrique et par la suite les réactions de réduction de l'eau à la cathode et de dissolution du métal (Fe) à l'anode expliquent l'amélioration du rendement en passant d'une intensité de courant à une autre plus élevée.

La figure VI.5 représentant l'évolution du temps nécessaire pour éliminer 80 % de la rhodamine B en fonction de la densité de courant montre clairement que le traitement sera plus rapide pour une intensité de courant plus élevée.

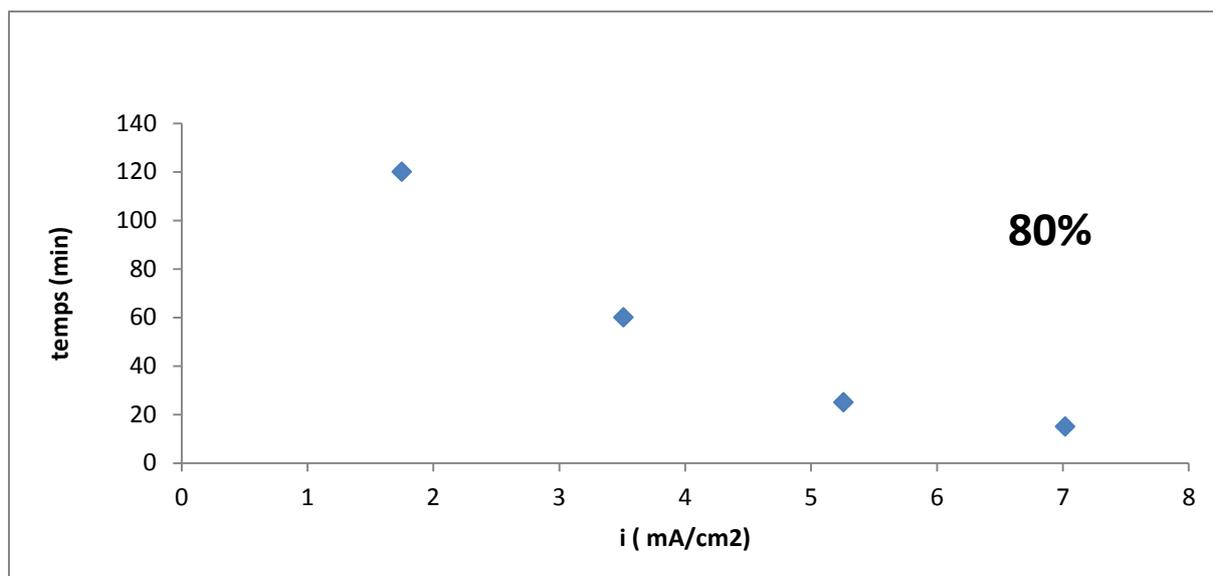


Figure VI.5: Evolution du temps pour 80 % d'élimination de la rhodamine B en fonction de la densité de courant

Environ 120 min sont nécessaires pour un taux de 80 % d'élimination de la couleur pour une densité de courant de 1.75 mA/cm<sup>2</sup>. Or que, seulement 15 min suffise pour un même rendement d'élimination mais avec une densité de 7 mA/cm<sup>2</sup>.

Contrairement au facteur temps, la quantité de métal oxydée est plus élevée pour une densité de courant plus grande. La figure VI.6 illustre l'évolution de la masse oxydée en fonction de la densité de courant.

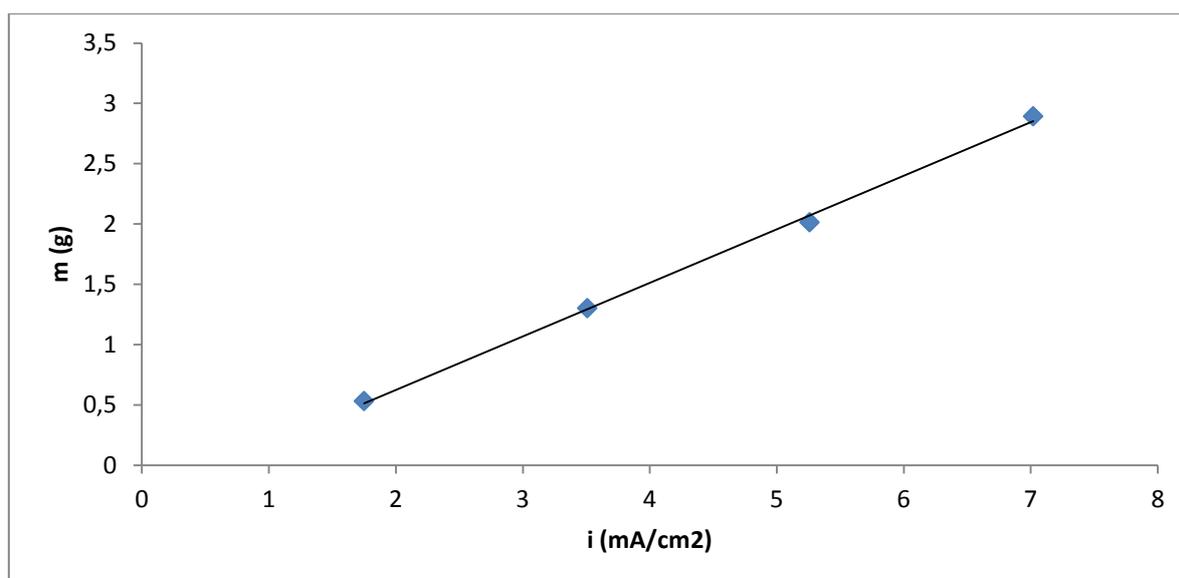


Figure VI.6: Evolution de la masse oxydée en fonction de la densité de courant

## Chapitre VI : Résultats et discussion

Ainsi, l'augmentation de l'intensité de courant influe considérablement sur la masse des électrodes oxydées, par conséquent une quantité suffisante de floes sera disponible pour l'élimination de la pollution.

En conclusion, la densité de courant qui optimale est de  $7 \text{ mA/cm}^2$  qui correspond à une intensité de courant de 1 A.

### VI.1.7. Influence de la concentration initiale en colorant

Pour évaluer la quantité maximale en rhodamine B que pourra ce procédé d'EC traité et pour laquelle on aura un meilleur rendement d'élimination, la concentration en ce polluant organique a été étudiée dans la plage de 30 à  $100 \text{ mg.l}^{-1}$ . Le nombre d'électrode et l'intensité de courant ont été préalablement optimisés respectivement en 3 électrodes et 1,00 A. les autres paramètres sont gardés constants.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure VI.7:

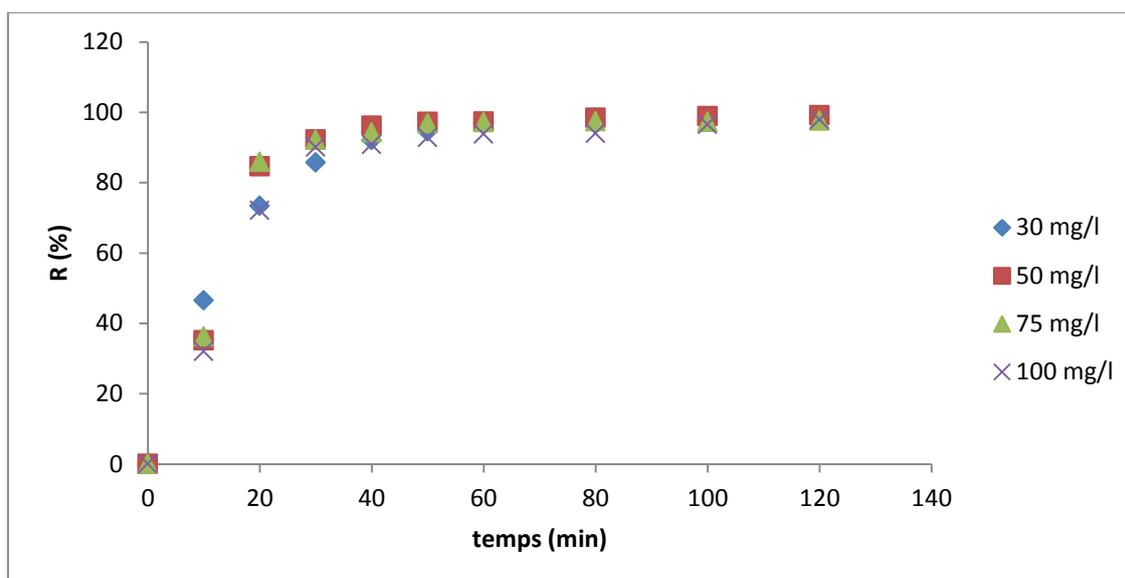


Figure VI.7: Effet de la concentration initiale sur l'élimination de la rhodamine B

$$N = 3, I = 1 \text{ A}, d_i = 1 \text{ cm}, [\text{NaCl}] = 35 \text{ g.l}^{-1}$$

La lecture de ce graphe montre que les courbes représentant le taux d'élimination du colorant pour 50 et  $75 \text{ mg.l}^{-1}$  semblent identiques. Cependant, après 30 min de traitement, la cinétique d'élimination de la rhodamine B est plus rapide pour une concentration de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$ .

## Chapitre VI : Résultats et discussion

---

Quelque soit la charge traitée, le taux de traitement dépasse 97 %, ce qui rend ce procédé efficace pour l'élimination de la pollution colorée.

On remarque aussi que le pourcentage de décoloration est d'autant plus élevé pour une concentration petite. Une exception est observée pour la manipulation de  $30 \text{ mg.l}^{-1}$ .

La figure VI.8 représente l'évolution du temps nécessaire pour éliminer 97 % de pollution en fonction de la concentration initiale en colorant :

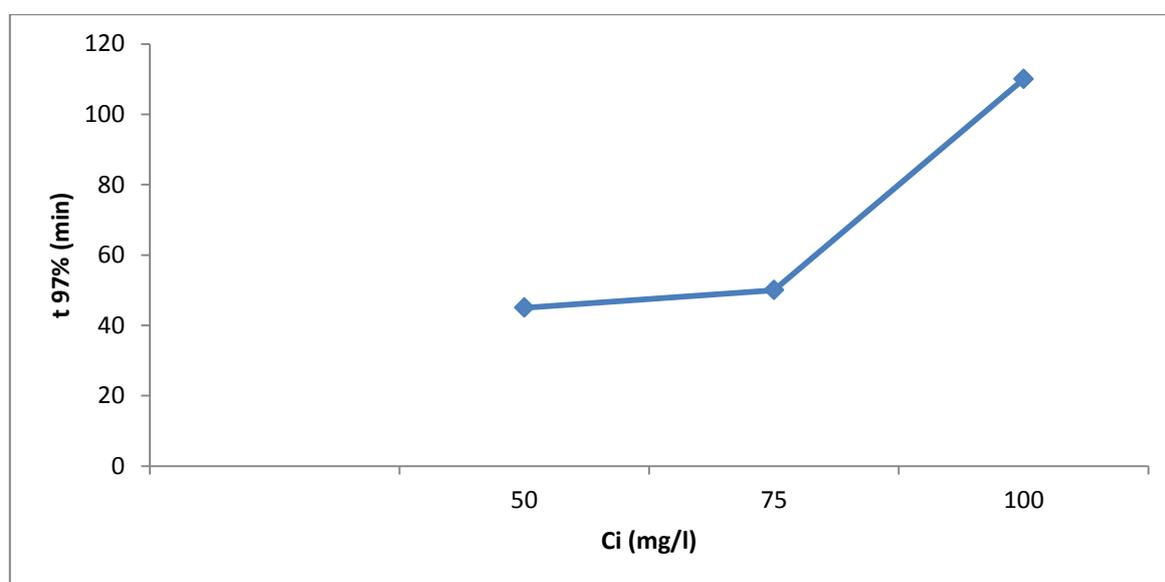


Figure VI.8: Evolution du temps nécessaire pour éliminer 97 % de la rhodamine en fonction de sa concentration initiale

Le temps minimal pour éliminer 97 % de la pollution est obtenu pour une concentration initiale en colorant de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  d'où son choix comme quantité optimale à traiter.

### ***VI.1.8. Influence de la distance inter-électrode***

La distance inter-électrode est parmi les paramètres les plus déterminants influençant la technique d'EC.[85]

Deux distances inter- électrodes sont étudiées, à savoir 1 et 2 cm, tout en fixant les autres paramètres.

La figure VI.9 représente les résultats expérimentaux de la variation du taux d'élimination de la rhodamine en fonction du temps.

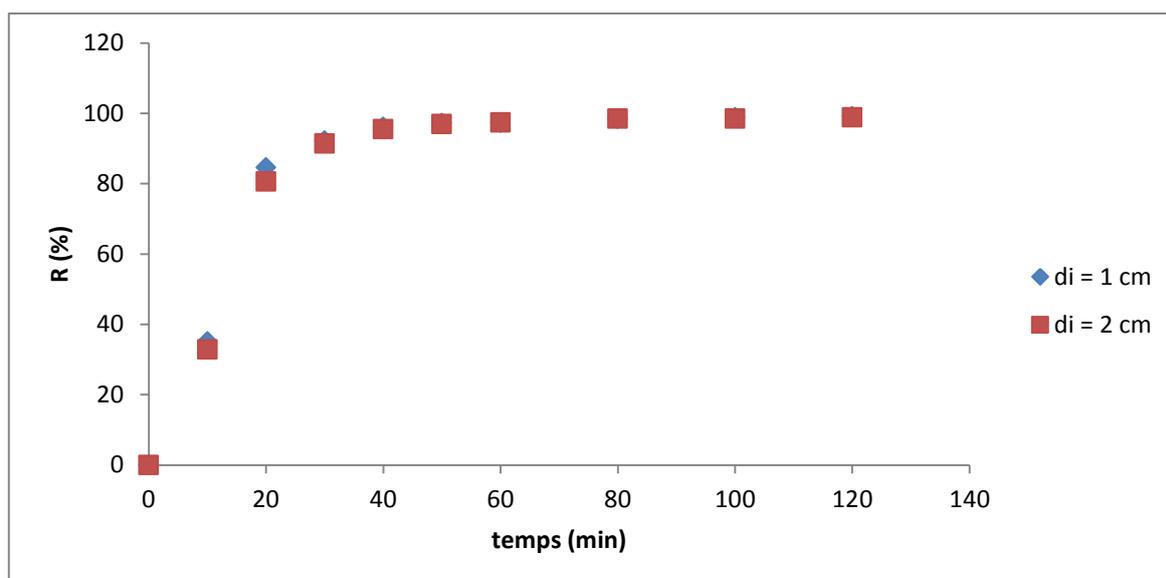
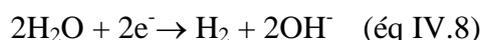


Figure VI.9: Effet de variation de la distance inter-électrode sur l'élimination de la rhodamine B

$$N= 3, I = 1 \text{ A}, C_i= 50 \text{ mg.l}^{-1}, [\text{NaCl}] = 35\text{g.l}^{-1}$$

Une légère amélioration du pourcentage d'élimination de la rhodamine B pour une distance inter-électrode de 1 cm pendant les 20 premières minutes de traitement. Cela peut être expliqué par l'effet du gaz dégagé au niveau de la cathode qui induit un phénomène de flottation des complexes formés sur l'anode (l'éq VI.3). En plus, cette flottation permet la dissolution de l'anode et augmente la formation des complexes dans l'interface métal-solution.[58]



Au-delà de ce temps, les taux d'élimination du colorant pour les distances 1 et 2 cm sont pratiquement identiques, ceci est dû au fait que la conductivité de la solution est très élevée, minimisant ainsi l'effet de la distance inter-électrode.

Notre choix a été effectué sur la distance la plus faible.

### VI.1.9. Influence de la concentration en sel

L'ajout de chlorure de sodium entraîne une augmentation de la conductivité qui, à son tour, influe sur la tension entre les électrodes. Les ions chlorures réduisent de façon significative les effets indésirables des autres anions tels que  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , par exemple, en évitant la

## Chapitre VI : Résultats et discussion

précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes. Cette couche formée augmente le potentiel entre les électrodes résultant ainsi une diminution de l'efficacité du courant dans la cellule électrochimique.[57, 82,]

Les ions chlorures peuvent également être oxydés pour donner des formes activées de chlore, tels que les anions hypochlorites qui ont un pouvoir oxydant élevé sur les colorants [2] ainsi qu'un rôle désinfectant.

Le choix effectué pour une concentration en sel de  $35 \text{ g.l}^{-1}$  est dans le but d'assimiler l'effluent traité à une eau de mer destinée au dessalement. Pour vérifier l'influence de la concentration en sel sur l'efficacité de traitement, un essai est effectué avec une concentration en sel de  $2 \text{ g.l}^{-1}$ .

Les résultats obtenus sont représentés par la figure VI.10:

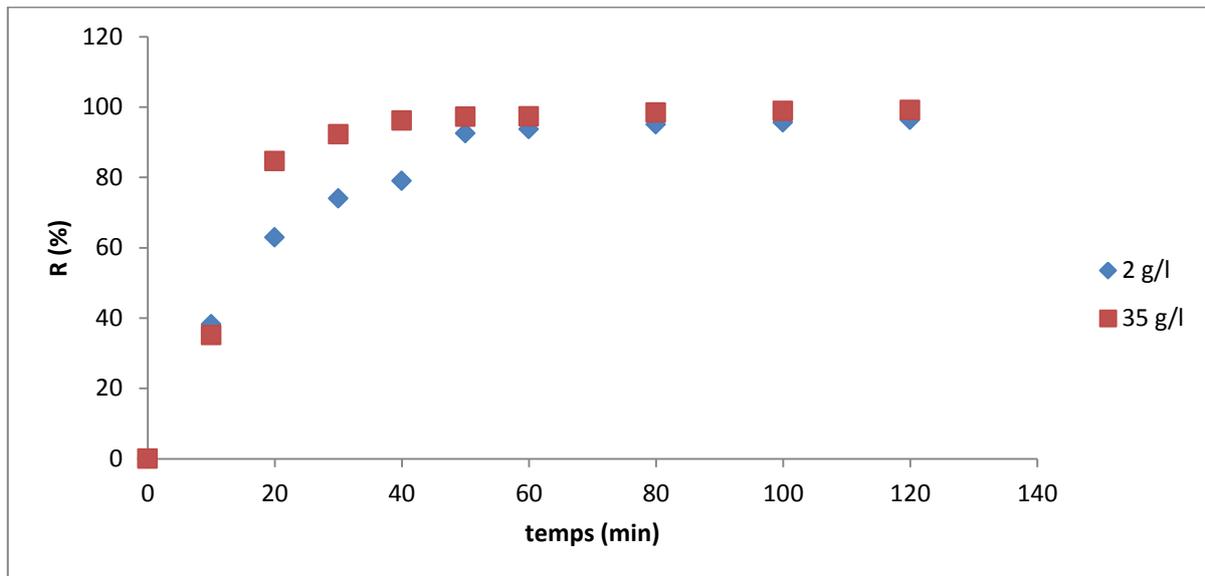


Figure VI.10: Influence de la variation en sel sur l'élimination de la rhodamine B

$$N= 3, I = 1 \text{ A}, C_i= 50 \text{ mg.l}^{-1}, d_i = 1 \text{ cm}$$

Avant d'atteindre les 20 min de traitement, la concentration de  $2 \text{ g.l}^{-1}$  apparaît plus rentable en termes de pourcentage d'élimination de la rhodamine. Cependant, pour un temps de traitement égal à 20 min, les taux de décoloration observés sont de 62 et 84 pour des concentrations de sel de  $2 \text{ g.l}^{-1}$  et  $35 \text{ g.l}^{-1}$  respectivement.

De ce fait, nous pouvons conclure que l'EC représente une bonne alternative pour le prétraitement de l'eau de mer destinée au dessalement.

## Chapitre VI : Résultats et discussion

---

### *VI.2. Application de l'EC à un rejet réel*

Les manipulations effectuées précédemment nous ont permis d'optimiser les paramètres essentiels influençant le procédé d'EC en utilisant un effluent synthétique. Pour valoriser notre étude, un essai sur une eau de mer réelle contaminée avec de la rhodamine B est réalisé, en manipulant dans les conditions préalablement optimisées.

Tableau VI.1 : conditions opératoires optimales

Paramètre	Valeur
Nombre d'électrode	3
Intensité de courant	1 A
Concentration initiale en colorant	50 mg.l <sup>-1</sup>
Distance inter-électrode	1 cm
[NaCl]	35 g.l <sup>-1</sup>

#### *VI.2.1. Les caractéristiques de l'eau de mer*

Lors du prélèvement de l'eau de mer au niveau d'ARDIS, son pH et sa température ont été mesuré in-situ. Les caractéristiques de cette eau sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau VI.2 : caractéristiques de l'eau de mer traitée

Paramètre	Valeur
pH	8.52
T (°C)	24.1
$\delta$ (mS)	51.3
Turbidité (NTU)	15.7
Nitrates (mg.l <sup>-1</sup> )	0.145
Nitrites (mg.l <sup>-1</sup> )	0.222
Na <sup>+</sup>	27.56

#### *VI.2.2. Traitement de l'effluent réel*

Les résultats expérimentaux sont représentés sur la figure VI.11:

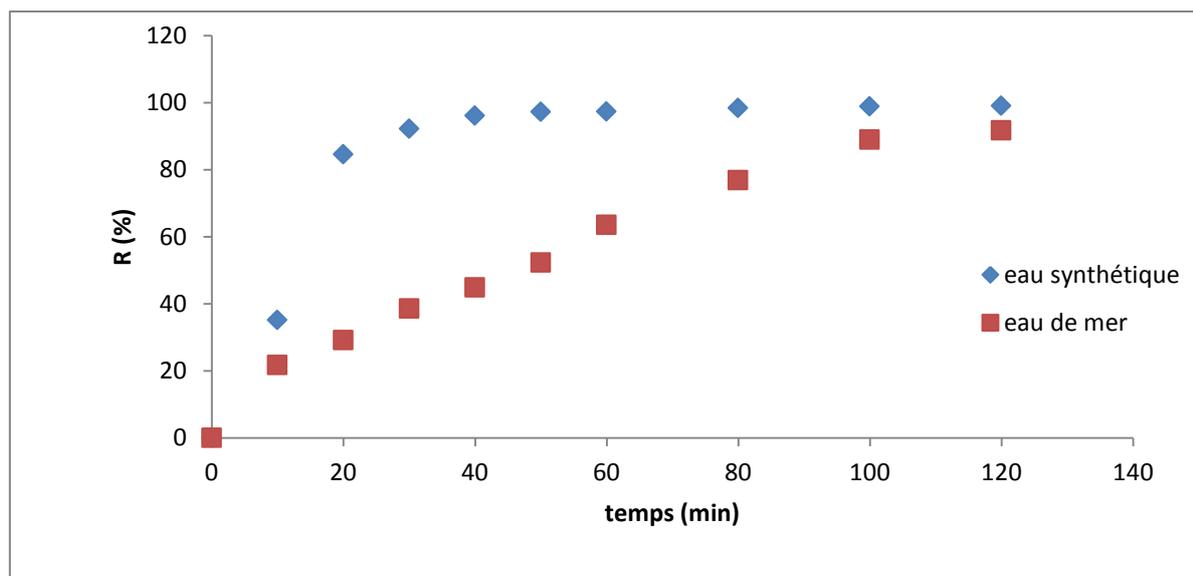


Figure VI.11: Evolution du taux de traitement de l'eau de mer et de l'eau synthétique dans les conditions optimales

$$N = 3, I = 1A, C = 50 \text{ mg.l}^{-1}, d_i = 1 \text{ cm}$$

La courbe représentant le taux d'élimination de la rhodamine B pour une eau de mer confirme l'efficacité du procédé d'EC pour ce genre de polluant organique. Une augmentation linéaire du pourcentage de décoloration est observée pour l'eau de mer. Or, une cinétique de traitement est plus rapide pour l'eau synthétique ce qui est logique, puisque une eau de mer réelle contient d'éventuelles composés qui peuvent contribuer à l'inhibition d'élimination de la pollution tel que les microorganismes. Au bout de 90 min de traitement de l'eau de mer, un taux de 92 % est atteint. Ce même pourcentage est obtenu après seulement 20 min pour l'eau synthétique.

La figure suivante représente l'évolution du temps nécessaire pour éliminer 80 % de la rhodamine en fonction de l'effluent traité :

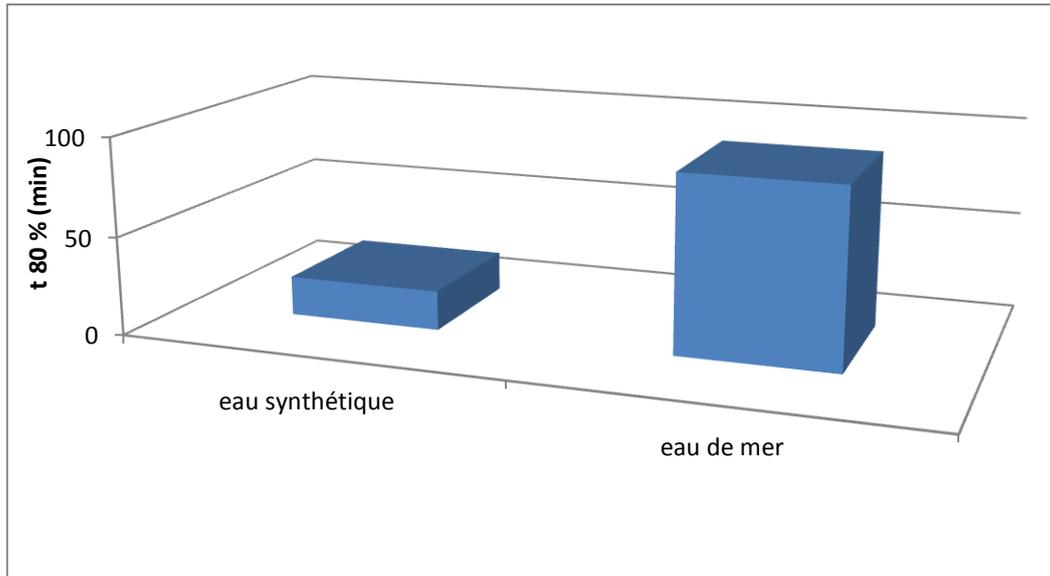


Figure VI.12: Evolution du temps nécessaire pour éliminer 80 % de la rhodamine en fonction de l'effluent traité

Durant les manipulations, l'évolution la température, le pH et la conductivité sont suivis. Pour l'eau de mer, les figures VI.13, VI.14 et VI.15 sont tracées.

### VI.2.3. Evolution de la température

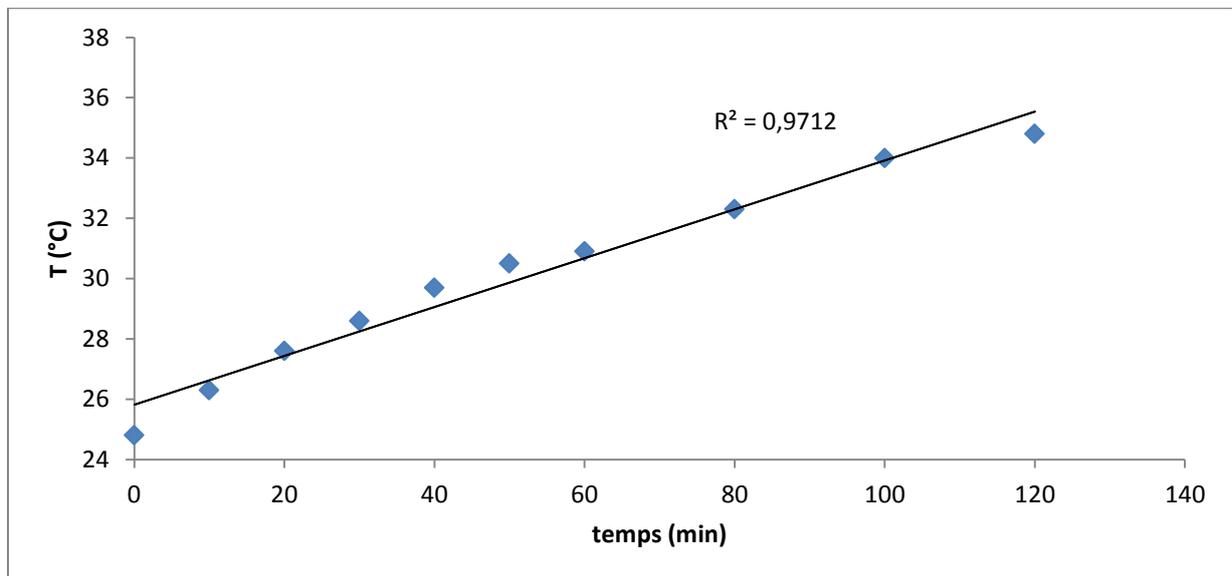


Figure VI.13 : Evolution de la température en fonction du temps

Au cours du traitement, la température suit une fonction linéaire croissante.

### VI.2.4. Evolution du pH

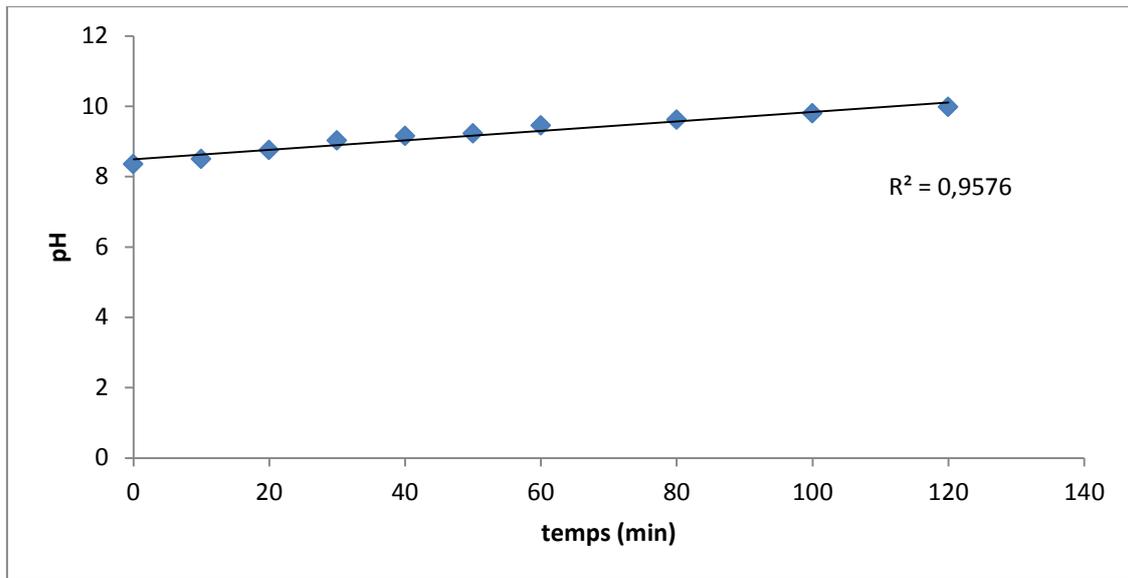
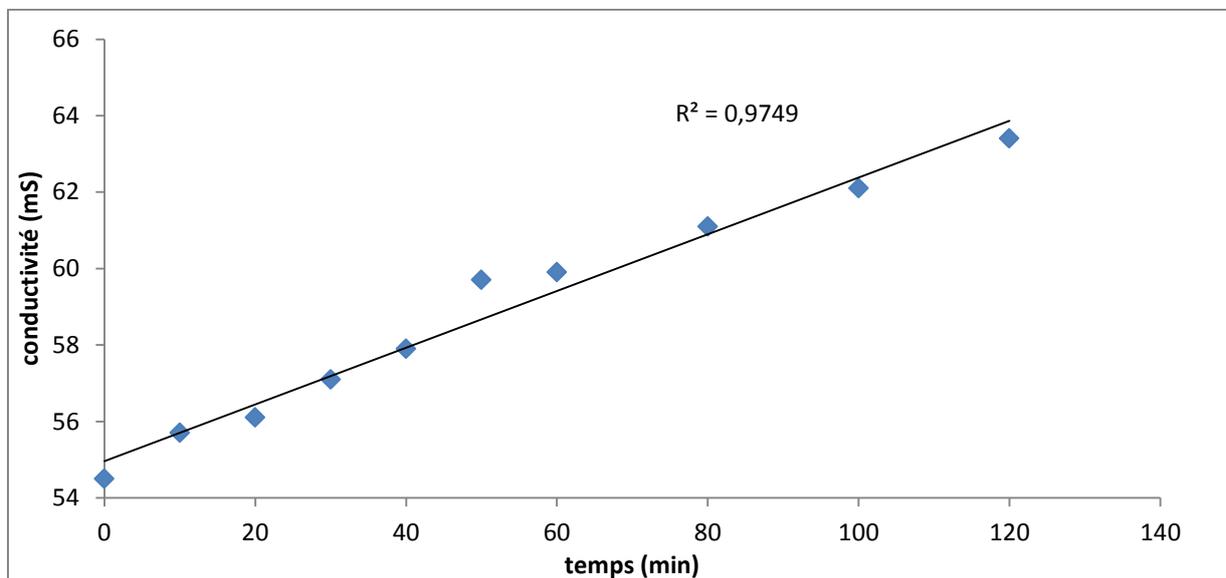


Figure VI.14 : Evolution du pH en fonction du temps

Durant toutes les manipulations effectuées, le pH ne cesse d'augmenter lors du traitement.

Le pH passe d'une valeur initiale de 8.35 pour atteindre en fin de traitement 9.98.

### VI.2.5. Evolution de la conductivité



FigureVI.15: Evolution de la conductivité en fonction du temps

La conductivité est un paramètre très important dans l'efficacité d'élimination de la pollution et le coût de fonctionnement du processus d'EC. [81]

---

## Chapitre VI : Résultats et discussion

---

La conductivité croît linéairement avec le temps.

Une conductivité élevée de l'eau à traiter permet de réduire les besoins en énergie donc un procédé plus économique.[77, 81]

### VI.2.6. Calcul de la masse de fer électro-dissoute et le rendement faradique

Comme indiqué dans le chapitre III, la masse du métal oxydée peut être calculée par la formule suivante :

$$m = \frac{I * t * M}{n * F} \quad (\text{éq IV.1})$$

I : intensité du courant électrique imposé aux bornes des électrodes [C / s = A]

t : durée d'électrolyse [s]

n : nombre d'électrons cédés ou gagnés dans la réaction considérée.

Généralement, il est admis que l'oxydation de l'anode ferrique se limite en  $\text{Fe}^{2+}$ . [77]

Alors  $n = 2$

M : masse moléculaire de l'ion considéré [ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ] : dans notre cas c'est le fer

$m_{\text{théo}}$  : masse théorique du métal dissous. [g]

F : constante de Faraday =  $96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$

Donc, la masse oxydée varie en fonction du temps :

$$m_{\text{théo}} = \frac{I * t * M}{n * F} = \frac{1 * 56}{2 * 96500} * t \quad (\text{éq IV.1})$$

Après 120 min de traitement, la masse théorique est : 2.09 g

La masse expérimentale de métal dissoute vaut :  $m_{\text{réelle}} = 2.85 \text{ g}$

Alors, le rendement faradique :

$$R = \frac{m_{\text{réelle}}}{m_{\text{théorique}}} * 100\% \quad \text{éq IV.2}$$
$$= \frac{2.85}{2.09} = 136\%$$

---

## Chapitre VI : Résultats et discussion

---

Le rendement faradique est supérieur à 100 %, ceci peut être expliqué par le phénomène de corrosion par piqure qui provoqué des trous (voir Figure VI.1) et a conduit pratiquement à une perte de fer métallique sur la surface des électrodes. [58]

### *VI.2.7. L'énergie consommée*

Il existe une multitude de méthodes pour la détermination de l'Energie Electrique Spécifique Consommée EESC lors du procédé d'EC. A titre d'exemple, on a utilisé l'expression tenant compte du volume réactionnel : [86]

$$EESC = \frac{U \cdot I \cdot t}{V_r} \quad (\text{éq VI.5})$$

Avec :

I : intensité du courant imposé (A).

U : : Tension électrique (V)

t : Temps de traitement (s)

$V_r$  : Volume réactionnel ( $m^3$ )

En calculant l'EESC en cas de traitement de l'eau de mer réelle :

$$I = 1 \text{ A}, \quad U = 2.4 \text{ V}, \quad t = 120 \text{ min} \cdot 60 = 7200 \text{ s}, \quad V_r = 1.5 \text{ l} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$EESC = 1.152 \cdot 10^7 \text{ J} = 3.2 \text{ kWh/m}^3$$

Or, le prix du kWh d'électricité en Algérie vaut 4.179 DA [87]

Donc, le mètre cube d'eau traitée coûte 13.373 DA

### ***Conclusion***

Nous avons atteint un rendement d'élimination de la rhodamine B dans l'eau de mer de 92 % au bout de 120 min. ceci nous permet de conclure que le traitement de la rhodamine B en solution aqueuse par EC s'avère efficace ; et que ce procédé peut constituer une bonne alternative pour le prétraitement des eaux de mer destinées au dessalement.

## *Conclusion & perspectives*

## Conclusion et perspectives

---

Dans notre travail, nous avons appliqué la technique d'électrocoagulation pour traiter une eau polluée par un colorant synthétique, de grande masse moléculaire, en présence de quantité de sel élevée. On a opté pour cette technique, vu que la recherche bibliographique nous a permis de constater qu'aucune étude n'a été faite pour l'élimination de cette molécule complexe par EC. De plus, ce procédé est peu coûteux, n'utilise pas de produits chimiques et induit de très faibles quantités de boues. [88]

Dans la première étape de nos expériences, nous avons appliqué le procédé d'EC pour le traitement de solutions synthétiques préparées à partir d'un colorant de la classe des xanthènes qui est la rhodamine B. ce colorant connaît de différentes applications industrielles, notamment en industrie textile.

Les paramètres étudiés lors de notre étude sont : le nombre d'électrode, la densité de courant, la concentration initiale en colorant, la distance inter-électrode et la concentration en sel. L'influence des autres paramètres tels que, la nature et le mode de connexion des électrodes, le pH initial, le débit de recirculation n'a pas été optimisé.

Une amélioration remarquable et intéressante du taux d'enlèvement de la rhodamine B lors de l'optimisation de ces paramètres. Un taux d'enlèvement de la rhodamine B est de 99 % dans ce cas d'une eau de mer synthétique artificiellement polluée, cela est atteint dans les conditions optimales.

Le métal des électrodes utilisées est le fer. Le nombre optimal de plaque est de trois. Des résultats en mode de connexion bipolaire est plus efficace qu'en monopolaire.

Le rendement de décoloration est maximal pour les valeurs suivantes :

- La densité de courant : 1 A
- Concentration initiale en rhodamine B : 50 mg.l<sup>-1</sup>
- Distance inter-électrode : 1 cm
- La concentration en sel : 35 g.l<sup>-1</sup>

En deuxième étape, dans ces conditions préalablement optimisées, le traitement d'une eau de mer polluée par ce colorant a permis l'obtention d'un pourcentage d'élimination de 92 %.

La différence entre les taux d'élimination entre une eau synthétique et réelle est due à la composition initiale de l'effluent. Une eau de mer peut contenir davantage d'ions et de micro-

## Conclusion et perspectives

---

organismes pouvant, ainsi, contribuer à cette diminution, un dosage du COT au début et à la fin du traitement aurait été souhaité.

En perspectives de sujet, nous recommandons pour les prochains travaux sur ce thème de :

- une étude à l'échelle pilote est nécessaire dans le but d'étudier l'influence d'autres paramètres, notamment les paramètres hydrodynamiques.
- Appliquer ce procédé dans les conditions optimales à un effluent réel issu de l'industrie utilisant la rhodamine B répété dans l'eau de mer.
- Prévoir une étude technico-économique.
- Proposer une alternative pour la récupération des boues générées et procéder à leur régénération.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

---

- [1] : LENNTECH. La pollution de l'eau, 2004, valable sur le site Internet: [www.lenntech.com/fran](http://www.lenntech.com/fran).
- [2] : S. Benchaita, Contribution au traitement des effluents textiles par électrocoagulation monopolaire et bipolaire, thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2007
- [3] : H. Roques Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Volume I. Technique et Documentation, Paris, 1979.
- [4] : V. Ruban, P. Conil, pollution en milieu urbain pollution liée aux eaux de ruissellement, LCPC-BRGM.
- [5] : Bliefert C., Perraud R., [2001]. Chimie de l'environnement. Air, Eau, Sol, Déchets. De Boeck. Bruxelles. 477 p.
- [6] : S. Zgheib, flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l'usage du territoire, thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France 2009
- [7] : Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement
- [8] : D. Gaujous La pollution des milieux aquatiques: aide- mémoire. Edition Lavoisier, 1993.
- [9] : M.M Tauber, G.M. Guebitz., A. Rehorek Degradation of azo dyes by Laccase and ultrasound treatment. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 2600-2607.
- [10] : Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail - Santé et environnement, enjeux et clés de lecture - Paris : AFSSET, 2005.
- [11] : Y. Dandonneau, effets biologiques de la pollution des mers par les hydrocarbures, Océanographe biologiste, Centre ORSTOM, B.P. A5, Nouméa cedex, Nouvelle-Calédonie.
- [12] : F. Benamraoui Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, thèse de magister, université de Ferhat Abbas Sétif-1 (2014).
- [13] : Encyclopédia Universalis, 2009
- [14] : Colour Index, the Society of Dyers and Colourists. Revised third edition, UK, (1975).

## Références bibliographiques

---

- [15] : Colorants organiques ou composés étroitement apparentés pour produire des colorants, mordants, laques, D256 Annexe 20, Institut Nationale de la propriété Industrielle (INPI), république française (2013)
- [16] : Glover G. 1993. Dyes and dye intermediates. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th ed, vol 8. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. pp. 672-753.
- [17] : H. Ben Mansour, O. Boughzala, D. Dridi, D. Barillier, L. Chekir-Ghedira et R. Mosrati, Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 24, n° 3, 2011, p. 209-238.
- [18] : S. Hemsas, contribution à l'étude de la décoloration des eaux sur grignons d'olives valorisés. Etudes dynamiques, thèse de magister, université de M'Hamed Bougara, Boumerdès (2008)
- [19] : F. Li, S. Sun, Y. Jiang, M. Xia, Sun, B. M. Xu, Photodegradation of an azo dye using Immobilized nanoparticles of TiO<sub>2</sub> supported by natural porous mineral, Journal of Hazardous Materials 152 (2008) 1037–1044.
- [20] : O. Kebiche, Biodégradabilité, adsorbabilité et échange ionique de quelques colorants cationiques présents dans les effluents liquides de la teinturerie de l'unité couvertex d'Ain.DJASSER. Thèse de Magistère Université Mentouri Constantine (1996).
- [21] : Jean Lederer. Encyclopédie de l'hygiène alimentaire Tome IV Edition Nauwewelears. Malone S.A. Edition (1986).
- [22] : A. Pons-Guiraud, Aspects cliniques de l'allergie aux colorants des textiles, Progrès en dermato-allergologie, Lyon, 1999.
- [23] : H. Ben Mansour, O. Boughzala, D. Dridi, D. Barillier, L. Chekir Ghedira, R. Mosrati, Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement, Revue des sciences de l'eau, 24 (2011) 209-238
- [24] : T.A. Kurniawant, G.Y.S. Chan, W.-H. LO, S. Babel. Comparisons of low-cost adsorbents for treating wastewaters laden with heavy metals. Science of the Total Environment, 366 (2006) 409-426.
- [25] : McKay G., Ramprasad G., Mowli P., Desorption and regeneration of dye colours from low-cost materials. Water Res. 21 375-377. (1987).
- [26] : N.P. Cheremisinoff. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Butterworth-Heinemann, Boston, 2002.
- [27] : S.A. Avlonitis, I. Poulis, D. Sotiriou, M. Pappas, K. Moutesidis. Simulated cotton dye effluents treatment and reuse by nanofiltration. Desalination 221 (2008) 259–267.

## Références bibliographiques

---

- [28] : Van Der Bruggen B., Lejon L., Vandecasteele C., Reuse, treatment and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes. *Environ. Sci. Techn.* 37 3733-3738. (2003).
- [29] : Anselme C., Jacobs E.P., *Water treatment membrane processes*, New York, McGraw Hill Mallevalle , pp. 401-1087. (1996).
- [30] : I. Kabdsali, M. Gurel, O. Tunay. Characterization and treatment of textile printing wastewaters. *Environmental Technology*, 21 (2000) 1147-1155
- [31] : Papic S., Koprivanac N., Bozic A. L. C., Removal of reactive dyes from wastewater using Fe(III) coagulant, *Color. Technol.* 116 352-358. (2000).
- [32] : G. Crini, P.-M. Badot, N. Morin-Crini, G. Torri. Les principales techniques d'épuration des eaux industrielles polluées : une revue récente des méthodes proposées dans la littérature. In: G. Crini, P.-M. Badot. *Traitement et épuration des eaux industrielles polluées*. Paris (2007).
- [33] : O. Joseph. Etude du potentiel d'utilisation de résidus agricoles haïtiens pour le traitement par biosorption d'effluents pollués, Thèse doctorat, chimie de Lyon (2009).
- [34] : Y.M. Slokar, A.M. LE Marechal. *Methods of Decoloration of Textile wastewaters. Dyes and Pigments*, 37 (1998) 335-356
- [35] : T. Robinson, G. Mcmulian, R. Marchant, P. Nigam. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77 (2001) 247-255.
- [36] : M. Zamouche, O. Hamdaoui, Sorption of Rhodamine B by cedar cone: effect of pH and ionic strength, *Energy Procedia* 18 ( 2012 ) 1228 – 1239
- [37] : [www.chemspider.com](http://www.chemspider.com)
- [38] : Fiche signalétique, Anachemia, Montreal, 2012
- [39] : [www.testoon.com](http://www.testoon.com)
- [40] : M Harouna, G Baiboussa, D Abia, C Tcheka, B B Loura, J M Ketcha and Ileana Denisa Nistor, adsorption of rhodamine B in aqueous solution by activated carbon from the seed husks of Moringa Oleifera, *Int. J. Engg. Res. & Sci. & Tech.* Vol. 4, No. 1, February 2015
- [41] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rhodamine\\_B](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_B)
- [42] : D. Kornbrust and T. Barfknecht, "Testing Dyes in HPC/DR systems," *Environmental Mutagenesis*, vol. 7, pp. 101–120, 1985.
- [43] : J. Michael, MD. Kelner, Rhodamine B Ingestion as a Cause of Fluorescent Red Urine, *West J Med* 1985 Oct; 143:523-524

## Références bibliographiques

---

- [44] : International Agency for Research on Cancer: IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man 1978; 16:221-231
- [45] : YanWang, Zhaoli Yan and XiaodongWang, Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Dye over Novel Porous TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> Nanocomposites Prepared by Hydrothermal Method, Volume 2014, Article ID 928519, 7 pages
- [46] : Carlo Ferrari, H. Chen, R. Lavezza, C. Santinelli, I. Longo, and E. Bramanti, Photodegradation of Rhodamine B Using the Microwave/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Effect of Temperature, Volume 2013, Article ID 854857, 12 pages
- [47]: M. Hema, S. Arivoli, Rhadamine B adsorption by activated carbon : Kinetic and equilibrium studies, Vol. 16, January 2009, pp. 38-45
- [48]: S. Arris, I. Brahmia, and L. Bousbaa, Experimental study of removal of Rhodamine B by activated cereal by product, Energy Procedia 18 ( 2012 ) 1208 – 1219
- [49]: A. Taoufyq, D.V. Chokouadeu, B. Bakiz, H. Ait Ahsaine, L. Patout, A. Benlhachemi, M. Ezahri, F. Guinneton, A. Lyoussi, G. Nolibé, J-R Gavarrí, Effet de taille et activité photocatalytique des tungstates de bismuth polycristallins Bi<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>WO<sub>6</sub> (avec x=0, 0,5 et 1) en milieu aqueux. (Size effect and photocatalytic activity of the bismuth tungstates Bi<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>WO<sub>6</sub> (with x = 0, 0.5 and 1) in aqueous medium), J. Mater. Environ. Sci. 5 (S2) (2014) 2550-2554
- [50]: G. Djanbye-Boundjou, L.M. Bawa, Y. Boukari, K. Dovi, photo-dégradation de la rhodamine B et du bleu de méthylène en solution aqueuse. J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2001) ; 011
- [51]: C. Guillard, B. Kartheuser, S. Lacombe, La photocatalyse : dépollution de l'eau ou de l'air et matériaux autonettoyants, j1270 technique de l'ingénieur, 2011.
- [52]: Y-L. Chan, S-Y. Pung, and S. Sreekantan, Synthesis of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Nanoflakes on PET Fiber as Visible-Light-Driven Photocatalysts for Degradation of RhB Dye, "Indian Journal of Materials Science"Volume 2014, Article ID 370696, 7 pages
- [53]: S. Prabhu, T. Viswanathan, K. Jothivenkatachalam and K. Jeganathan, Visible Light Photocatalytic Activity of CeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub> Composites for the Degradation of Rhodamine B, "Indian Journal of Materials Science " Volume 2014, Article ID 536123, 10 pages
- [54]: M. G. Gonzalez, E. Oliveros, M. Wörner, and A. M. Braun, "Vacuum-ultraviolet photolysis of aqueous reaction systems," Journal of Photochemistry and Photobiology C, vol. 5, no. 3, pp. 225–246, 2004.
- [55]: Kotz, JR Treichel, Chimie générale, 1ère édition, Ed. De Boeck, 2006

## Références bibliographiques

---

- [56]: ZONGO, A.H. Maiga, J. Wéthé, G. Valentin, J-P Leclerc, G. Paternotte, F. Lapicque, Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance, *Journal of Hazardous Materials* 169 (2009) 70–76.
- [57]: M. Bennajah, Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift, thèse de Doctorat, N° d'ordre : 2558, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007
- [58]: N. MAMERI, Defluoridation of septentrional Sahara water oh North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes, *Water Research* Vol. 32, No. 5, pp. 1604-1612, 1998
- [59]: T. Picard, Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation, thèse de doctorat, universités de Limoges (2000).
- [60]: M. Khemis, J.-P. Leclerc, G. Tanguy, G. Valentin, F. Lapicque, Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: experimental investigations and an overall interpretation model, *Chem. Eng. Sci.*, 61, 3602–3609 (2006).
- [61]: E. ROY, Elaboration Electrochimique et Caractérisations de Nanofils d'Antimoine et d'Or, thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, France, 2002.
- [62]: G. Barral, B. LE Gorrec, C. Montella, notions élémentaires sur les cellules électrochimiques, Polytechnique Grenoble, France, 2003
- [63]: Hector A. Moreno-Casillas, David L. Cocke, Jewel A.G. Gomes, P. Morkovsky, J.R. Parga and E. Peterson, Electrocoagulation mechanism for COD removal, doi:10.1016/j.seppur.2007.01.031
- [64]: J. Bensaid, contribution à la dépollution des eaux usées par électrocoagulations et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium, thèse de doctorat, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 2009.
- [65]: P.K. Holt, G.W. Barton, M. Wark and C.A. Mitchell. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, *Colloids Surface. A* 221. 248-223 (2002).
- [66]: F. Ghribi, Traitement des rejets de papeterie par procédé électrochimique, thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011
- [67]: A. Aguilar Ibarra, Les peuplements de poissons comme outil pour la gestion de la qualité environnementale du réseau hydrographique de la Garonne, Thèse de Doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

## Références bibliographiques

---

- [68]: Pablo Canizares, Fabiola Martinez, Justo Lobato, Manuel Andrés Rodrigo, Break-up of oil-in-water emulsions by electrochemical techniques. *Journal of Hazardous Materials* 145 (2007) 233–240
- [69]: S.R. Wickramasinghe, B. Han, J. Zimbron, Arsenic removal by coagulation and filtration: comparison of ground waters from the United States and Bangladesh. *Desalination*, 169 (2004) 231-244.
- [70]: M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga, D.L. Cocke, Electrocoagulation (EC) - science and applications, *J. Hazard. Mater.* 84 (1) (2001) 29–41.
- [71]: I.F. Saur, S. Rubach, J.S. Forde, G. Kjaerheim, U. Syversen, Electroflocculation: removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions, *Filtr. Sep.* 33 (1996) 295–303.
- [72]: A.B. Paul, Proceedings of the 22nd WEDC Conference on Water Quality and Supply, New Delhi, India, 1996, p. 286.
- [73]: Laboratory Techniques in Electroanalytical Chemistry, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 1996
- [74]: S. Ladjelat, Utilisation de l'électrocoagulation pour le prétraitement d'une eau de surface, thèse de magister, Université Dr Yahia FARES de MEDEA, 2009-2010
- [75]: N. Adhoum, L. Monser, N. Bellakhal, J.E. Belgaied, Treatment of electroplating wastewater containing  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and Cr(VI) by electrocoagulation, *J. Hazard. Mater.* B112 (2004) 207–213.
- [76]: D. Ghernaout, B. Ghernaout, A. Saiba, A. Boucherit, A. Kellil, Removal of humic acids by continuous electromagnetic treatment followed by electrocoagulation in batch using aluminium electrodes, *Desalination* 239 (2009) 295–308.
- [77]: M. Bayramoglu, M. Eyvaz and M. Kobya, Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation Economical evaluation, *Chemical Engineering Journal* Volume 128, Issues 2-3, 1 April 2007, Pages 155-161
- [78]: S. ZODI, Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation : application à l'industrie textile et papetière, thèse de doctorat, université de Lorraine, 2012.
- [79]: M.M. Mahlambi, A.K. Mishra, S.B. Mishra, R.W. Krause, B.B. Mamba, and A.M. Raichur,  $\text{TiO}_2$  Nanocatalysts Supported on a Hybrid Carbon-Covered Alumina Support:

## Références bibliographiques

---

Comparison between Visible Light and UV Light Degradation of Rhodamine B, Journal of Nanotechnology Article ID 198723, March 2015

[80] : M. Chafi, B. Gourich, A.H. Essadki, C. Vial, A. Fabregat, Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye, Desalination 281 (2011) 285–292

[81]: Y. Benatmane, traitement des rejets aquacoles par électrocoagulation, thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2010.

[82] : V. Khandegar, Anil K. Saroha, Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e A Review, Journal of Environmental Management 128 (2013) 949-963

[83] : Mireille A. Traitement du lisier de porc par électroépuration, mémoire de maitrise recherche en sciences appliquées, Ecole Plytechnique Montréal, 2006

[84] : Guohua Chen, Electrochemical technologies in wastewater treatment, Separation and Purification Technology 38 (2004) 11–41

[85] : F. Bouhezila, M. Hariti, H. Lounici, N. Mameri, Treatment of the OUED SMAR town landfill leachate by an electrochemical reactor, Desalination 280 (2011) 347–353

[86] : I. Arslan-Alaton, G. Tureli, T. Olmez-Hanci, Treatment of azo dye production wastewaters using photo-Fenton-like advanced oxidation processes: Optimization by response surface methodology, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 202, 142-153 (2009).

[87] :<http://www.forumdz.com/showread.php?44419-Prix-Unitaire-du-KWH-de-la-Sonelgaz/page2>

[88] : A. Trujillo-Ortega, S.A. Martínez Delgadill, V. X. Mendoza-Escamilla, M. May-Lozano, C. Barrera-Díaz, Modeling the Removal of Indigo Dye from Aqueous Media in a Sonoelectrochemical Flow Reactor, Int. J. Electrochem. Sci., 8 (2013) 3876 - 3887

# *Annexes*

### Courbe d'étalonnage de la Rhodamine B

Pour établir la courbe d'étalonnage, l'intervalle de variation de la concentration en colorant est de 0 à 8 mg.l<sup>-1</sup>.

Ainsi les valeurs de l'absorbance en fonction de la concentration en colorant relatives à la courbe d'étalonnage sont représentées respectivement sur la figure A.1 :

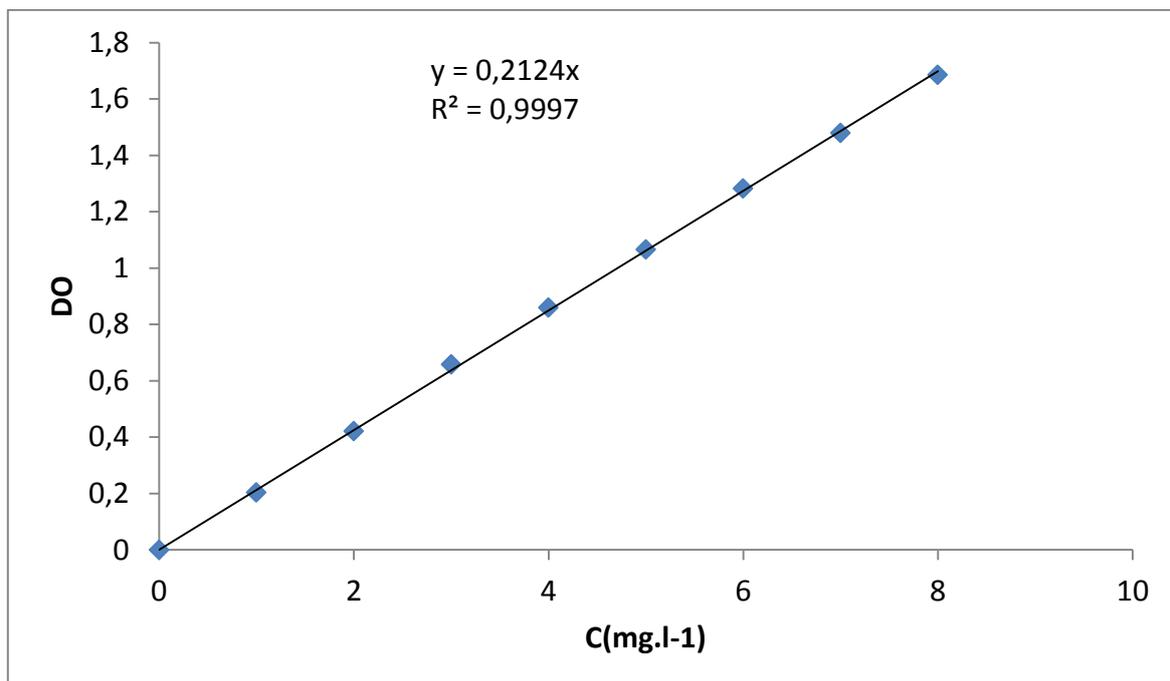


Figure A.1 : Courbe d'étalonnage de la rhodamine B

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى تحسين عملية التخثير الكهربائي للتخلص من الصبغة العضوية ( رودامين B ) على مستوى المختبر بنظام مغلق. يتم تحسين الاستفادة من هذه التقنية باستخدام أقطاب الحديد. العوامل التي تمت دراستها هي : عدد الأقطاب، كثافة التيار، التركيز الابتدائي للصبغة، المسافة بين الأقطاب و تركيز الملح.

الحد الأقصى لمردود إزالة التلوين وصل إلى 99% و إلى 92% من أجل مياه بحر اصطناعية و حقيقية، على التوالي.

**مصطلحات هامة :** العلاج، التخثير الكهربائي، أقطاب من الحديد، رودامين B، مياه البحر.

## Résumé

Ce présent travail a comme objectif l'optimisation du procédé d'électrocoagulation lors de l'élimination d'un colorant organique à l'échelle laboratoire en batch. Une optimisation de cette technique est faite en utilisant des électrodes en fer. Les paramètres ainsi étudiés sont : le nombre d'électrode, la densité de courant, la concentration initiale en colorant, la distance inter-électrode et la concentration de sel.

Le rendement maximal de décoloration atteint 99 % et 92 % pour un effluent synthétique et réel, respectivement.

**Mots clés :** traitement, électrocoagulation, électrodes en fer, la rhodamine B, eau de mer.

## Abstract:

This present study aims to optimize the electrocoagulation process during the removal of an organic (Rhodamine B) dye in batch mode at laboratory scale. Optimization of this technique was made using iron electrodes. The parameters studied are: the number of electrode, the current density, the initial concentration of dye, the inter-electrode distance and the salt concentration.

The maximum yield of discoloration reached 99% and 92% for synthetic and real effluent, respectively.

**Keywords:** treatment, electrocoagulation, iron electrodes, rhodamine B, seawater