

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université Abderrahmane MIRA- Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département d'Hydraulique



جامعة عبد الرحمان ميرة – بجاية  
كلية التكنولوجيا  
قسم الري

*Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE)*

## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

**Mlle IDIR Farida**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Hydraulique Urbaine**

### INTITULE :

## **ESSAI DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS INDUSTRIELS PAR ELECTROCOAGULATION**

Soutenu le **30/06/2025** devant le jury composé de :

- Président : **M. LAHOUARI, F.**
- Promoteur : **M. KADJI, B.**
- Examineur : **M. AMIROUCHE, M.**

Populaire et Démocratique Algérienne République  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : IGIR  
Prénom : Farida  
Matricule : 202031016202  
Spécialité et/ou Option : Hydraulique - Hydraulique Urbaine  
Département : d'Hydraulique  
Faculté : de Technologie  
Année universitaire : 2024./2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Essai de Traitement des effluents industriels  
par électrocoagulation

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.



Fait à Béjaïa le  
08./07./2025

Signature de l'intéressé

(\*) Lu et approuvé

(\*) Arrêté ministériel disponible sur le site [www.univ-bejaia.dz/formation](http://www.univ-bejaia.dz/formation) (rubrique textes réglementaires)

## *Remerciements*

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Je Lui suis profondément reconnaissante pour les épreuves, les réussites et les enseignements qu'Il a placés sur mon chemin. Je Le remercie pour chaque opportunité, chaque aide, chaque source de motivation et chaque orientation qu'Il m'a accordée tout au long de mon parcours.

Je tiens à remercier mon encadrant M. KADJI Belaid ainsi que les membres de jury, M. LAHOUARI Farid et M. AMIROUCHE Mokrane pour l'attention qu'ils ont portée à ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques constructives.

J'adresse également mes sincères remerciements à Mme. BOUCHRAKI Faiza, pour son soutien bienveillant, sa générosité et sa présence réconfortante durant les moments difficiles que j'ai traversés.

Mes remerciements vont également à M. BERREKSI Ali, un enseignant exemplaire qui nous a transmis un savoir riche grâce à la qualité exceptionnelle de son enseignement.

Mes pensées vont également à M. BEDJOU Abdelhamid qui nous a quittés trop tôt. Son enseignement, son humanité et sa bienveillance ont laissé une empreinte profonde en moi. Je lui suis infiniment reconnaissante pour tout ce qu'il m'a appris. Qu'il repose en paix.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenue moralement et intellectuellement tout au long de mon parcours à l'Université de Bejaia.

Que de réussite pour nous tous.

## *Dédicaces*

### **Je dédie ce travail :**

À mes chers parents, pour leur encouragement infini.

À ma sœur Ouiza, pour son soutien indéfectible, ses conseils précieux, son aide morale et son amour sans limites.

À mon cher Imad, pour sa présence précieuse.

À mes chers Nadjib et Tintin, pour leur véritable amitié et leurs sacrifices.

À ma précieuse Louiza, pour tout l'amour qu'elle m'a offert.

À mes petits anges Anis, Jassmine, Zelzouli et Adamou.

À mes amis Mouloud, Farida, Assoum, Yanis, Lysa, Marouche, Yakoub, Loufy et Mouhmed, pour tous les beaux moments partagés durant ces cinq années à Bejaia — des souvenirs inoubliables.

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

## **Partie I : Etude Bibliographique**

### **Chapitre I : Généralités sur les eaux usées**

I – 1 – Introduction ..... 6

I – 2 – Les types des eaux usées..... 6

I – 2 – 1 – Les eaux usées domestiques ..... 6

I – 2 – 2 – Les eaux usées industrielles..... 6

I – 2 – 3 – Les eaux usées agricoles ..... 7

I – 2 – 4 – Les eaux pluviales..... 7

I – 3 – L'évaluation de la qualité des eaux usées ..... 8

I – 3 – 1 – Paramètres organoleptiques ..... 8

I – 3 – 2 – Paramètres physico-chimiques ..... 9

I – 3 – 3 – Paramètres biologiques ..... 13

I – 3 – 4 – Paramètres complémentaires ..... 15

I – 4 – Conclusion ..... 16

### **Chapitre II : Les effluents industriels**

II – 1 - Introduction ..... 17

II – 2 – Définition..... 17

II – 3 – Les différents rejets industriels ..... 17

II – 3 – 1 – L’industrie agro-alimentaire.....	18
II – 3 – 2 – L’industrie pétrochimique.....	18
II – 3 – 3 – L’industrie pharmaceutique .....	19
II – 3 – 4 – L’industrie textile .....	19
II – 3 – 5 – L’industrie papetière .....	20
II – 4 – L’impact des eaux usées industrielles sur l’environnement et la santé publique .....	21
II – 5 – Les normes de rejet des eaux usées industrielles .....	22
II – 6 – Conclusion .....	23

### **Chapitre III : Les techniques de traitement des eaux usées industrielles**

III – 1 - Introduction .....	24
III – 2 – Les procédés conventionnels .....	24
III – 2 – 1 – Le prétraitement .....	24
III – 2 – 2 – La filtration .....	25
III – 2 – 3 – La flottation.....	25
III – 2 – 4 – L’adsorption.....	27
III – 2 – 5 – La coagulation-floculation.....	28
III – 2 – 6 – Le traitement biologique.....	29
III – 2 – 7 – L’oxydation conventionnelle .....	30
III – 3 – Les procédés avancés .....	31
III – 3 – 1 – La filtration membranaire .....	31
III – 3 – 2 – L’oxydation avancée .....	32
III – 3 – 3 – Le traitement électrochimique .....	36
III – 4 – L’Electrocoagulation (EC) .....	37
III – 4 – 1 – Historique et évolution de procédé d’EC.....	37
III – 4 – 2 – Principe et mécanismes de l’EC.....	38
III – 4 – 3 – L’influence des paramètres opératoires sur le procédé d’EC .....	40
III – 4 – 4 – Les avantages et les inconvénients de procédé d’EC .....	44

III – 5 – Conclusion .....	45
----------------------------	----

## **Partie II : Etude Expérimentale**

### **Chapitre IV : Matériels et Méthodes**

IV – 1 – Introduction .....	47
IV – 2 – Matériels.....	47
IV – 2 – 1 – Unité de traitement .....	47
IV – 2 – 2 – Produits et matériaux utilisés .....	48
IV – 3 - Méthodologie expérimentale.....	50
IV – 3 – 1 – Objectif.....	50
IV – 3 – 2 – Mode opératoire .....	50
IV – 4 – Les techniques analytiques.....	51
IV – 4 – 1 – La spectrophotométrie UV-Visible .....	51
IV – 4 – 2 – La loi de Beer-Lambert .....	52
IV – 5 – Conclusion.....	52

### **Chapitre V : Résultats et Discussions**

V – 1 – Introduction .....	53
V – 2 – La cinétique de dégradation.....	54
V – 3 – Effet de la densité du courant sur l’efficacité de traitement.....	56
V – 4 – Effet de la distance inter-électrodes sur l’efficacité de traitement.....	60
V – 5 – Effet de la concentration en électrolyte (NaCl) sur l’efficacité de traitement.....	64
V – 6 – Conclusion .....	67
Conclusion générale .....	68

### **Références Bibliographiques**

## Liste des figures

Figure (I.1) : L'évolution de la DBO dans le temps dans un échantillon analysé sur plusieurs jours [12].	12
Figure (III.1) : Illustration du la technique de filtration par lit de sable.	25
Figure (III.2) : Processus de flottation [33].	26
Figure (III.3) : Mécanisme de processus d'adsorption [34].	28
Figure (III.4) : Cellule électrochimique [42].	37
Figure (III.5) : Principe de procédé d'EC [46].	40
Figure (IV.1) : Unité de traitement par électrocoagulation.	48
Figure (IV.2) : Principe de fonctionnement du spectrophotomètre.	52
Figure (V.1) : Variation des Absorbances en fonction du temps pour les différentes concentrations en NaCl pour $d = 3 \text{ cm}$ , $I = 3 \text{ A}$	54
Figure (V.2) : Variation des Absorbances en fonction du temps pour les différentes intensités du courant pour $[\text{NaCl}] = 1.5 \text{ g/l}$ , $d = 1 \text{ cm}$ .	55
Figure (V.3) : Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement pour $[\text{NaCl}] = 1 \text{ g/l}$ et $d = (1, 2, 3 \text{ cm})$	56
Figure (V.4) : Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement pour $[\text{NaCl}] = 1.5 \text{ g/l}$ et $d = (1, 2, 3 \text{ cm})$	57
Figure (V.5) : Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement pour $[\text{NaCl}] = 2 \text{ g/l}$ et $d = (1, 2, 3 \text{ cm})$	58
Figure (V.6) : Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement pour $[\text{NaCl}] = 1 \text{ g/l}$ et $I = (1, 2, 3 \text{ A})$	60
Figure (V.7) : Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement pour $[\text{NaCl}] = 1.5 \text{ g/l}$ et $I = (1, 2, 3 \text{ A})$	61
Figure (V.8) : Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement pour $[\text{NaCl}] = 2 \text{ g/l}$ et $I = (1, 2, 3 \text{ A})$	62



Figure (V.9) : Effet de la concentration en NaCl sur l'efficacité de traitement pour d=1cm et I=(1,2,3A) .....	64
Figure (V.10) : Effet de la concentration en NaCl sur l'efficacité de traitement pour d=2cm et I=(1,2,3A).....	65
Figure (V.11) : Effet de la concentration en NaCl sur l'efficacité de traitement pour d=3cm et I=(1,2,3A).....	66

## **Liste des tableaux**

Tableau (I.1) : La biodégradabilité d'un effluent selon des valeurs du rapport DCO/DBO <sub>5</sub> [6]. .	13
Tableau (II.1) : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels. ....	23
Tableau (III.1) : Les techniques séparatives à membrane utilisées dans le traitement des eaux usées. ....	31
Tableau (IV.1) : Caractéristiques de Bleu d'Indanthrène RS [51]. ....	49
Tableau (V.1) : Variation des niveaux de chaque paramètre. ....	53

## **Liste des abréviations**

**A** : Ampère

**Abs** : Absorbance

**DBO** : Demande Biologique/Biochimique en Oxygène

**DBO5** : Demande Biologique/Biochimique en Oxygène après 5 jours

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène

**EC** : Electrocoagulation

**EF** : Electro-flottation

**ERU** : Eaux Résiduaires Urbaines

**FTU** : Formazin Turbidity Unit

**MES** : Matières En Suspension

**MF** : Microfiltration

**MO** : Matière Organique

**NF** : Nanofiltration

**NTU** : Nephelometric Turbidity Unit

**OI** : Osmose Inverse

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**pH** : Potentiel d'Hydrogène

**STEP** : Station d'Épuration des Eaux Usées

**UF** : Ultrafiltration

**UV** : Ultra-violet

**WRI** : World Ressource Institut

# Introduction générale

## **Introduction générale**

L'industrialisation s'est développée au cours des années, permettant d'améliorer le niveau de vie des populations de plus en plus croissantes. Cependant ce progrès s'est accompagné d'une exploitation intensive et non durable des ressources naturelles, en particulier la ressource hydrique. Les différentes industries, comme l'industrie agroalimentaire, l'industrie textile, l'industrie pharmaceutiques, l'industrie chimique et pétrochimiques, ainsi que d'autres domaines industriels, nécessitent d'énormes quantités d'eau pour leurs productions chaque année et rejettent ainsi des volumes d'eaux usées très importants. La plupart des chaînes de fabrications des différents produits industriels sont fortement dépendantes des processus chimiques, essentiellement responsables des effluents liquides riches en substances toxiques, difficilement biodégradables et persistantes dans l'environnement. Ces rejets liquides industriels contiennent une très grande variété de polluants, notamment des composés organiques volatiles, des hydrocarbures, des métaux lourds, des acides et des solvants, des substances synthétiques ainsi que des éléments pathogènes,...etc. Toutes ces substances peuvent altérer la qualité des eaux, dégrader les écosystèmes, mettre en danger la santé humaine et réduire la disponibilité de l'eau douce.

Afin de protéger l'environnement et la santé humaine contre ces risques, les effluents industriels traités sont soumis à des réglementations et des normes environnementales strictes avant rejet dans le milieu récepteur. Une approche qui consiste à réutiliser ces eaux après traitement pour d'autres usages divers est aussi soutenue et appliquée dans plusieurs régions dans le monde. Cependant, de nombreux problèmes ont été rencontrés, la qualité des effluents industriels traités par les procédés conventionnels ne répondent pas toujours aux normes sanitaires à cause de leurs propriétés de plus en plus complexes. Les techniques de traitement classiques comme les traitements biologiques et les traitement physico-chimiques (coagulation-floculation, flottation,...etc) sont également moins fiables vis-à-vis les polluants non-biodégradables et sont parfois considérés très coûteux car ils nécessitent l'ajout des substances chimiques qui conduisent par la suite à une pollution secondaire et des coûts de traitement supplémentaires. Face à cette situation, de nouvelles technologies de dépollution ont été développées. Les techniques de traitement avancées des eaux usées tels que l'oxydation avancée et les traitements électrochimiques, permettent la dégradation des polluants réfractaires et

toxiques contenus dans les effluents industriels avec moins de boues et garantissent l'obtention d'une eau propre à la réutilisation.

Dans ce contexte, l'électrochimie a permis d'aboutir à des résultats très satisfaisants dans le domaine de traitement des eaux usées. L'électrocoagulation est un procédé électrochimique qui a montré son efficacité dans la dépollution des effluents issus de plusieurs industries, il permet également l'élimination des contaminants organiques et minéraux tels que les colorants, les métaux lourds, les composés phosphorés, les huiles, divers contaminants microbiologiques ainsi que les matières en suspensions et plusieurs d'autres polluants récalcitrants [26]. L'électrocoagulation est une alternative intéressante aux procédés chimiques grâce à sa capacité à traiter des mélanges très complexes, à l'absence de produits chimiques ajoutés et à la faible production de boues.

Ce travail porte sur l'application du procédé d'électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant synthétique « Bleu d'Indanthrène RS » couramment utilisé dans l'industrie textile par des électrodes en Aluminium. L'objectif de l'étude est d'optimiser ce procédé en analysant l'influence de trois paramètres opératoires principaux : la densité du courant appliqué, la distance entre les électrodes et la conductivité de la solution, sur le rendement du processus.

Le présent travail se compose de deux parties ; une partie bibliographique devisée en 3 chapitres :

- Le 1<sup>er</sup> chapitre présente des généralités sur les eaux usées, leurs différentes origines ainsi que leurs caractéristiques.
- Le 2<sup>ème</sup> chapitre présente les types des rejets industriels et leurs impacts environnementaux et donnera un aperçu sur les normes des rejets industriels algériennes.
- Le 3<sup>ème</sup> chapitre détaillera les procédés de traitements conventionnels et avancés les plus utilisés pour la dépollution des eaux usées industrielles, globalement, ainsi que le procédé d'électrocoagulation en particulier.

La deuxième partie, est la partie expérimentale qui se devise en deux autres chapitres, comme suit :

- Le 4<sup>ème</sup> chapitre détaillera le matériel utilisé, la méthodologie adoptée pour les essais de l'élimination d'un colorant synthétique par électrocoagulation, ainsi que les techniques analytiques mises en œuvre.

- Le dernier chapitre présentera les résultats obtenus et les discussions concernant l'effet de chaque paramètre étudié sur l'efficacité du procédé.

Enfin, on termine par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus au cours de cette étude ainsi que les perspectives de recherche.

# Partie I

## Etude Bibliographique

## **Chapitre I : Généralités sur les eaux usées**

### **I – 1 – Introduction**

Les eaux usées, ou eaux résiduaires urbaines (ERU) sont des « eaux polluées » provenant essentiellement de l'usage humain dans les différents secteurs, et qui ont subi des modifications dans leurs caractéristiques et perdu leurs propriétés naturelles. Selon l'activité (domestique, industrielle ou agricole...) ces eaux sont chargées de substances nocives et des matières dispersées ou dissoutes qui peuvent provoquer des perturbations dans le milieu récepteur et des dangers pour l'environnement et la santé humaine, ce qui rend leur traitement indispensable avant de les rejeter dans le milieu naturel ou avant réutilisation [1].

### **I – 2 – Les types des eaux usées**

#### **I – 2 – 1 – Les eaux usées domestiques**

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont généralement porteuses de pollution organique dégradable et de matières minérales, sous forme dissoute ou en suspension. Elles se répartissent en eaux « ménagères », qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, etc... et en eaux « vannes » ; qui s'agit des rejets des toilettes, très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et des germes fécaux [2].

#### **I – 2 – 2 – Les eaux usées industrielles**

Ce sont les eaux rejetées par les activités industrielles. Contrairement aux eaux usées domestiques, leur composition varie en fonction du secteur industriel, influençant ainsi leur qualité et leur niveau de pollution.

Ces eaux proviennent notamment des opérations de refroidissement, de lavage ou de rinçage de machines, de produits ou de matières premières. Elles contiennent des matières organiques,



azotées et phosphorées, et de divers composés chimiques organiques et métalliques. Selon le type d'industrie, elles peuvent aussi contenir des substances spécifiques aux procédés de fabrication, telles que des graisses, hydrocarbures, acides, bases, métaux et matières radioactives.

Avant leur rejet dans les réseaux de collecte ou dans une station d'épuration, un prétraitement est nécessaire. Elles ne peuvent être mélangées aux eaux domestiques que si elles ne présentent aucun danger pour les infrastructures et ne perturbent pas les stations d'épuration [3].

### **I – 2 – 3 – Les eaux usées agricoles**

Les eaux usées agricoles sont celles contaminées par des substances employées dans le secteur agricole. Les agriculteurs utilisent divers produits, d'origine industrielle ou naturelle, pour améliorer la qualité des cultures et protéger les plantes, dont certains peuvent représenter un danger pour l'environnement, en particulier pour la qualité des eaux. Ces produits comprennent les engrais, les déjections animales, les herbicides, les insecticides, etc... [1]

### **I – 2 – 4 – Les eaux pluviales**

Les eaux pluviales peuvent également être classifiées comme eaux usées, en particulier lors d'épisodes orageux. En traversant l'atmosphère, l'eau de pluie se charge en impuretés, notamment en polluants issus des fumées industrielles. Une fois au sol, son ruissellement entraîne toutes sorte de déchets minéraux et organiques accumulés sur les surfaces urbaines, les toits et les chaussées, tels que les huiles de vidange, les carburants, les particules issues de l'usure des pneus et les métaux lourds [3].

### **I – 3 – L'évaluation de la qualité des eaux usées**

La qualité des eaux usées rejetées dans les réseaux de collecte ou dans le milieu naturel doit répondre aux normes sanitaires et réglementaires, et doit être étudié afin d'évaluer l'impact des pollutions constitués dans ses eaux sur l'environnement et la santé humaine, et définir les traitements appropriés avant rejet ou réutilisation.

La qualité de ces eaux est déterminée par la mesure de différents paramètres, qui sont généralement en terme de concentration (mg/l), et qui varient selon l'origine des eaux et le type d'activité associée.

Plusieurs classifications de paramètres des eaux usées ont été élaborées. Globalement, on peut les classer en « 4 » catégories essentielles ; les paramètres organoleptiques, physico-chimiques, biologiques et complémentaires.

#### **I – 3 – 1 – Paramètres organoleptiques**

Les paramètres organoleptiques désignent les caractéristiques de l'eau perceptibles par les sens, principalement l'odorat, le gout et la vue, qui permettent d'indiquer la qualité hygiénique de l'eau. Une eau propre doit être claire, avoir une saveur agréable et exempte de toute odeur indésirable [4].

Les paramètres organoleptiques sont :

##### ***a) La couleur***

La coloration d'une eau est généralement due aux substances colorées naturelles (substances humiques et fulviques provenant des végétaux, substances minérales comme le fer et le manganèse...etc) aux polluants industriels (teintures, colorants...) ou à la présence des matières en suspension [4].

##### ***b) L'odeur***

Les eaux usées sont caractérisées par une odeur désagréable due à la décomposition des matières organiques, à la présence des substances organiques volatiles ou aux produits chimiques transportés par les effluents industriels [5].

### **I – 3 – 2 – Paramètres physico-chimiques**

Les caractéristiques physico-chimiques permettent l'identification des compositions des eaux usées et d'évaluer leur qualité, ils comportent :

#### ***a) Le potentiel d'Hydrogène (pH)***

Le potentiel d'Hydrogène est un paramètre essentiel dans l'évaluation de la qualité d'une eau, il représente la concentration des ions d'hydrogène ( $H^+$ ) présents dans l'eau et il permet de mesurer l'acidité et la basicité de celle-ci. Dans les eaux usées, les valeurs du pH peuvent être très variables selon leurs origines.

Le pH influence directement le comportement des éléments dissous dans l'eau en affectant leur solubilité. Dans un milieu acide ( $pH < 7$ ), ces éléments, tel que les ions des métaux, deviennent plus solubles et alors toxiques et peuvent être facilement absorbé par les espèces aquatiques, les plantes et même l'homme [6]. Le pH influence aussi l'efficacité des procédés de traitement chimiques et le fonctionnement des microorganismes dans le traitement biologique [7].

Pour le développement normal de la faune et la flore aquatique, le pH doit être situé entre 6 et 9 et entre 6.5 et 8.5 pour les eaux potables [6].

#### ***b) La conductivité électrique***

La conductivité électrique exprime la capacité d'une eau à faire passer un courant électrique, qui dépend principalement de la concentration des sels dissous. La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau, qui est un paramètre important pour assurer l'efficacité des procédés d'épuration [8].

Une conductivité très élevée indique une forte concentration de sels dissous, ce qui conduit à la limitation du développement des microorganismes entraînant ainsi une diminution des performances du traitement biologique et à la perturbation de l'équilibre des écosystèmes aquatiques, affectant la croissance des plantes aquatiques et en altérant les conditions de vie des organismes vivants [6].

**c) La température**

Dans les eaux usées, les températures varient selon l'origine d'où elles proviennent (eau de refroidissement, eaux chaudes des douches...) comme elles peuvent être liées au climat et aux variations des températures atmosphériques [9].

Ce facteur peut influencer la vie aquatique, les réactions biochimiques, l'activité et la croissance des microorganismes, la dissociation des sels, le pH, la viscosité de l'eau et la solubilité des gaz [10].

**d) La turbidité**

La turbidité est la diminution de la transparence d'une eau en raison de la présence des matières en suspension. Les eaux usées ont généralement une turbidité importante, car elles contiennent des quantités considérables de matières non dissoutes. Elle est exprimée généralement en NTU ou FTU [9].

La mesure de la turbidité est essentielle pour surveiller l'efficacité d'un traitement, mais elle ne fournit pas d'informations spécifiques sur la nature des particules responsables de cette opacité [11].

**e) Les matières en suspension (MES)**

Les matières en suspension représentent l'ensemble des particules organiques et inorganiques (minérales) non dissoutes dans l'eau. Selon leurs propriétés physiques, elles peuvent être décantables ou non décantables. La quantité des matières en suspension dans un effluent d'eaux usées reflète efficacement le niveau de contamination de celui-ci et permet de mesurer sa charge polluante [5].

Les eaux usées sont généralement très chargées en MES, ce qui conduit à l'augmentation de la turbidité, ainsi la réduction de la pénétration de la lumière dans l'eau, cela entraîne la baisse de la concentration en oxygène dissous dans l'eau, limite les processus photosynthétiques et diminue la productivité aquatique [6].

### *f) L'oxygène dissous*

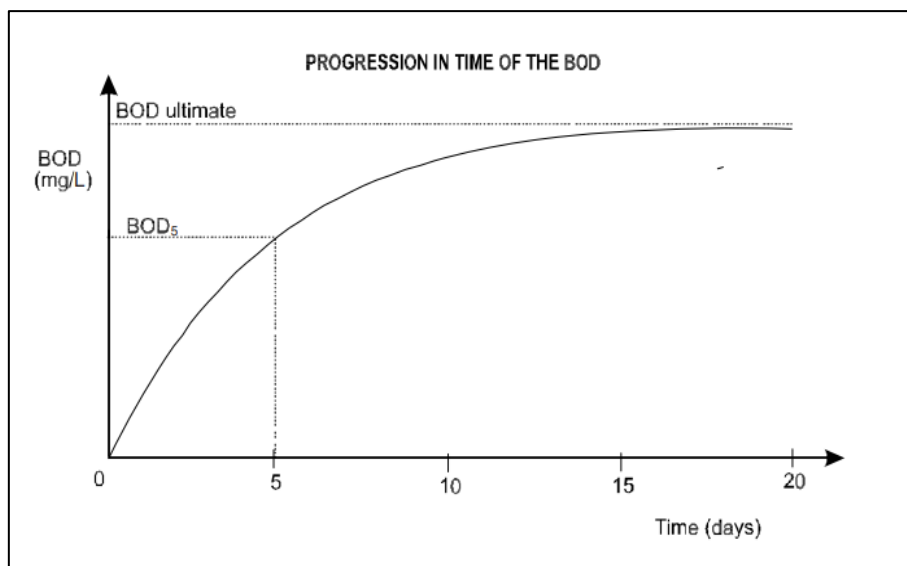
L'oxygène dissous est la concentration d'oxygène ( $O_2$ ) qui se trouve dans l'eau à l'état dissous et qui provient principalement de l'atmosphère, et de l'activité photosynthétique des plantes aquatiques dans les cours d'eau [9].

La mesure de la concentration en oxygène dissous dans les eaux usées est très importante ; elle indique la qualité de l'eau et l'efficacité de traitement, car sa valeur est directement liée à la concentration des matières organiques. Les matières organiques sont dégradées par les microorganismes aérobies qui consomment l'oxygène dissous tout le long de ce processus, alors une faible concentration d'oxygène dissous dans les eaux, indique la présence d'une forte charge polluante.

### *g) La Demande Biologique en Oxygène (DBO)*

La DBO est l'un des paramètres les plus essentiels dans l'analyse de la qualité des eaux usées, c'est la mesure de la quantité d'oxygène dissous nécessaire pour les microorganismes aérobies pour décomposer les matières organiques biodégradables. Elle représente la quantité des matières organiques biodégradables (la charge polluante organique biodégradable) présente dans l'eau et elle est exprimée en « mg d' $O_2$ /Litre d'eau ».

L'élimination de la totalité des MO par voie biologique nécessite une période de temps importante (environ 20 jours ou plus), cela correspond à la  $DBO_{ultime}$ . Généralement, pour réduire ce temps ; le processus s'effectue sur une période de 5 jours à une température de  $20^{\circ}C$  à l'obscurité, ici on définit le contexte de la  $DBO_5$  qui est la quantité d'oxygène nécessaire pour la biodégradation de la quasi-totalité de la matière organique carbonée par les bactéries aérobies pendant 5 jours [12]. La **figure (I.1)** montre l'évolution de la DBO dans le temps, dans un échantillon analysé sur plusieurs jours.



**Figure (I.1) :** L'évolution de la DBO dans le temps dans un échantillon analysé sur plusieurs jours [12].

#### ***h) La Demande Chimique en Oxygène (DCO)***

La DCO est un indicateur important dans l'évaluation de la qualité des eaux usées, elle représente la consommation d'oxygène résultant de l'oxydation chimique de la matière organique biodégradable et non biodégradable contenue dans l'eau par un oxydant puissant, généralement le Dichromate de Potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) dans un milieu acide, et elle est exprimé en « mg d' $O_2$ /Litre d'eau » [12].

La détermination de la DCO nécessite une durée de temps courte (de 2 à 3 heures seulement) et elle permet de mesurer la concentration de la matière organique biodégradable et non biodégradable dans l'eau, pour cela; la DCO est toujours supérieure à la DBO qui mesure seulement les matières organiques biodégradables [12].

#### ***i) La biodégradabilité***

La biodégradabilité indique la capacité d'un effluent à être traité par voie biologique (décomposition par les microorganismes), elle est estimée par le rapport  $DCO/DBO_5$ . Une faible valeur du rapport  $DCO/DBO_5$  indique que l'effluent est facilement biodégradable, or qu'une valeur élevée se traduit par la présence d'une forte charge de pollution non biodégradable (inerte) et un traitement physico-chimique est nécessaire [6]. Le **tableau (I.1)** montre les niveaux de biodégradabilité d'un effluent en fonction des valeurs du rapport  $DCO/DBO_5$ .

**Tableau (I.1) : La biodégradabilité d'un effluent selon des valeurs du rapport DCO/DBO<sub>5</sub> [6].**

<b>Valeur du rapport DCO/DBO<sub>5</sub></b>	<b>Biodégradabilité</b>
< 1.5	La quasi-totalité des matières oxydables sont des matières fortement biodégradables
1.5 – 2.5	Les matières oxydables sont moyennement biodégradables
2.5 – 3	Les matières oxydables sont peu biodégradables
> 3	Les matières oxydables sont non biodégradables

### **I – 3 – 3 – Paramètres biologiques**

Les eaux usées contiennent de très grandes quantités des microorganismes vivants, dont certains peuvent être pathogènes, et qui se différencient selon leur physiologie. L'identification du type et de la concentration de ces microorganismes dans les eaux usées est très essentielle pour assurer un traitement efficace et protéger l'environnement et la santé publique contre les maladies infectieuses. Ces être-vivants de petite taille sont majoritairement à l'origine des matières fécales. Ceux qui sont les plus utilisés comme indicateurs de contamination biologique des eaux usées sont globalement les virus, les bactéries, les champignons, les protozoaires et les helminthes [13].

#### **a) Les virus**

Les virus sont des parasites intracellulaires, de très faible taille, qui nécessitent une cellule hôte pour vivre et pour se reproduire. Ils sont caractérisés par une grande résistance ce qui rend leur élimination dans les eaux usées beaucoup plus difficile par rapport aux autres bactéries. Les types de virus qui sont souvent présents dans les eaux usées sont le virus de l'Hépatite, Réovirus, Echovirus, Adénovirus...etc [13].

***b) Les bactéries***

Les bactéries sont des organismes unicellulaires, présentes sous plusieurs formes et tailles. Ce sont les microorganismes les plus fréquemment rencontrés dans les eaux usées, elles se trouvent en très grands nombres (environ  $10^6$  à  $10^7$  bactéries / 100ml d'eau) [13]. La majorité des bactéries dans les eaux usées sont inoffensives et elles contribuent à la dégradation des MO, or que d'autres sont pathogènes et causent plusieurs maladies principalement intestinales [12]. Parmi les bactéries pathogènes qui sont généralement détectées dans les eaux usées on trouve *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Vibrio cholerae*... etc [13].

***c) Les champignons***

Les champignons présents dans les eaux usées sont des microorganismes d'origines variées, issus de milieux aquatiques ou terrestres. Leur impact sur l'environnement et la santé publique dépend de leur nature. Certains sont parasites, pouvant représenter des dangers pour la faune, la flore et l'homme. D'autres, en revanche, sont saprophytes et jouent un rôle essentiel dans le cycle de la matière organique en participant à sa décomposition et à la biodégradation des polluants [13].

***d) Les protozoaires***

Les protozoaires sont des microorganismes unicellulaires, plus complexes et de taille supérieure aux bactéries [7]. Certains protozoaires pathogènes sont des parasites et ils peuvent survivre dans des conditions défavorables et résister aux traitements des eaux usées, ils peuvent même subsister plusieurs semaines ou plusieurs années selon l'environnement. Une faible dose de ces microorganismes peut suffire à provoquer des infections chez l'homme. Parmi des protozoaires qu'on trouve dans les eaux usées on peut citer *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium* qui sont responsables des maladies digestives [13].



### *e) Les helminthes*

Les helminthes sont des vers multicellulaires parasites. Leur cycle de vie inclut souvent une phase de développement sous forme d'œufs ou de larves, qui sont particulièrement résistants aux conditions environnementales. Ces œufs peuvent survivre plusieurs mois dans le sol, sur les cultures agricoles ou dans les eaux contaminées. Ces organismes peuvent causer des maladies persistantes chez l'homme comme l'anémie, les troubles nerveux et la diarrhée persistante. Leur présence dans des eaux usées est un indice de pollution biologique et leur élimination est nécessaire pour la protection de la santé publique [6].

## **I – 3 – 4 – Paramètres complémentaires**

### *a) L'azote*

La présence de l'azote dans l'environnement est essentielle pour maintenir les écosystèmes, mais dans les eaux résiduaires ; c'est un indice de pollution urbaine. Dans les eaux usées, l'azote est présent sous deux formes principales : organique (protéines, urée, acides aminés, etc.) et minérale (azote ammoniacal, nitrites, nitrates). Il provient essentiellement des déjections humaines, des eaux de cuisine, des engrais agricoles et de certaines industries. La somme de l'azote organique et l'azote ammoniacal est appelée l'azote Kjeldahl [14].

Au cours de son cycle, l'azote organique se transforme en azote minéral par un processus de « minéralisation ». Ce phénomène entraîne la formation d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), un gaz toxique très soluble dans l'eau, et d'ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Ces derniers sont ensuite oxydés par des bactéries nitrifiantes aérobies lors du processus de « nitrification », qui se déroule en deux étapes : l'oxydation de l'ammonium en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et la conversion des nitrites en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) [9].

Ces réactions nécessitent une consommation importante d'oxygène dissous, ce qui peut entraîner un déficit d'oxygène dans le milieu aquatique. De plus, les formes ammoniacales et les nitrites en particulier, peuvent être toxiques pour de nombreuses espèces aquatiques et pour l'être humain même à faibles concentrations [15].

***b) Le phosphore***

Le phosphore dans les eaux usées se présente sous forme organique ou minérale. Les phosphores minéraux sont dits des orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et ils constituent la majorité des phosphates totaux dans les eaux usées. Cet élément provient principalement des lessives, des détergents, des fertilisants agricoles et des productions agroalimentaires...etc [16].

L'excès des phosphates et de nitrates dans les eaux usées rejetées dans les cours d'eau favorise le phénomène d'eutrophisation, qui se traduit par une prolifération excessive d'algues et de microorganismes sur les plans d'eau, ce qui perturbe considérablement l'équilibre écologique du milieu aquatique [16].

***c) Les métaux lourds***

Les eaux usées contiennent souvent des métaux lourds, comme le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le fer (Fe), le plomb (Pb), l'aluminium (Al), le chrome (Cr), le sélénium (Se), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le nickel (Ni) ...etc. Ces métaux peuvent être présents dans les eaux usées en grandes concentrations ou bien à l'état de trace selon leurs origines, qui peuvent être des produits de consommation humaine, des dépôts de corrosion des canalisations de transport, et majoritairement des rejets industriels [13].

A faibles concentrations, certains métaux lourds sont essentiels à la vie des êtres vivants, car ils interviennent dans de nombreux processus biologiques. Cependant, à des concentrations très importantes, ils deviennent très toxiques pour l'écosystème et la santé humaine, et ils peuvent provoquer des maladies dangereuses et mortelles [13].

## **I – 4 – Conclusion**

Les eaux usées proviennent de diverses origines domestiques, industrielles, agricoles ou pluviales, et présentent des caractéristiques différentes selon leur source. La compréhension de la composition de ces eaux constitue une étape essentielle pour aborder les méthodes de traitement adaptées et assurer la protection de l'environnement et de la santé publique.

## **Chapitre II : Les effluents industriels**

### **II – 1 - Introduction**

Le secteur industriel est l'un des plus grands consommateurs d'eau à l'échelle mondiale, utilisant des quantités très importantes pour la production de biens. La consommation varie en fonction du type d'industrie, des technologies employées et de l'échelle de l'activité industrielle. Globalement, l'eau dans les usines peut être utilisée comme matière première dans le processus de fabrication des produits (notamment les produits laitiers, les produits pharmaceutiques, les boissons...etc), pour le lavage et le nettoyage des équipements, pour le refroidissement, le chauffage et la production de vapeur, ainsi pour les besoins des personnels [17].

### **II – 2 – Définition**

Les effluents industriels, sont toutes les eaux polluées par les activités industrielles après utilisation et qui doivent faire l'objet d'un traitement approprié avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Ces effluents sont généralement très chargés en pollution, et leurs caractéristiques dépendent du type de l'industrie.

### **II – 3 – Les différents rejets industriels**

L'industrie se compose de nombreux secteurs d'activité, formant un système en mouvement qui consomme régulièrement des quantités importantes d'eau, et génère effectivement un grand volume d'eaux usées.

Quelques exemples des industries qui utilisent de grandes quantités d'eau et les caractéristiques de leurs effluents sont présentés ci-dessous :

### **II – 3 – 1 – L’industrie agro-alimentaire**

Par définition, c’est l’ensemble des activités industrielles qui transforment les matières premières issues de l’agriculture et de la pêche en produits finis destinés à la consommation humaine ou animale. Ce secteur comprend toutes les entreprises qui produisent et commercialisent les produits alimentaires, et celles qui fabriquent les équipements et matériaux nécessaires à leur transformation [5].

L’industrie agro-alimentaire englobe plusieurs filières de production, notamment la fabrication des produits laitiers, la transformation des produits carnés, la production des boissons, la transformation des produits céréaliers, la transformation sucrière (extraction de sucre), la transformation des corps gras, la production des conserves, surgelés et plats cuisinés et la fabrication d’autres produits alimentaires (Chocolat, confiseries...) [5].

Comparée aux autres secteurs industriels, l’industrie agro-alimentaire consomme une quantité beaucoup plus importante d’eau par tonne de produit. Dans ce secteur, les usages de l’eau sont multiples, elle peut être utilisée dans le processus de fabrication comme ingrédient lors de la préparation des aliments, sous forme liquide, de glace ou de vapeur, et pour le lavage des matières premières agricoles. Elle est aussi utilisée pour le nettoyage des matériels et des locaux et pour l’hygiène du personnel de l’entreprise [18].

Les eaux usées générées par les industries agro-alimentaires sont généralement de caractère organique, biodégradable et non toxique, elles contiennent des concentrations élevées en demande biologique en oxygène (DBO), en demande chimique en oxygène (DCO) et en matières en suspension (MES). Ces caractéristiques varient selon le type de produit. D’autres polluants peuvent également présenter, comme les produits chimiques utilisés pour la fabrication des produits alimentaires (additifs, colorants...), détergents et désinfectant, huiles, graisses, nutriments (phosphore, azote), agents pathogènes etc... [19].

### **II – 3 – 2 – L’industrie pétrochimique**

Ce secteur permet l’approvisionnement en énergie et en matières premières pour de nombreuses industries, il s’occupe de la production des composés chimiques synthétiques à partir des ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, schiste bitumineux...). Cette industrie permet la fabrication d’une très grande variété de produits comme le plastique, les fibres textiles, les détergents, les produits cosmétiques, certains composants pharmaceutiques, les peintures, les engrais, les colorants, les caoutchoucs, les emballages alimentaires, les tuyaux etc... [20].

L'industrie pétrochimique et pétrolière sont parmi les industries qui consomment de très grandes quantités d'eau pour mettre au point leurs procédés, en d'autre terme ; l'eau est la principale ressource utilisée dans leurs activités, également dans le processus d'extraction du pétrole, la production de vapeur pour le raffinage et les transformations chimiques, le refroidissement des machines et le lavage des réservoirs et des équipements etc... [21].

Ces différentes utilisations produisent d'importantes quantités d'eau usées, très chargée en pollution et qui peuvent présenter des dangers sur les écosystèmes et la santé humaine. Les polluants qui apparaissent le plus souvent dans les effluents de l'industrie pétrolière et pétrochimique sont les hydrocarbures, les composés organiques volatiles (benzène, xylène, toluène...), les composés azotés, les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium et chrome), les sulfures, les composés chlorés, les huiles et les graisses [21].

### **II – 3 – 3 – L'industrie pharmaceutique**

Comme son nom l'indique, c'est la fabrication des produits pharmaceutiques à partir des composés naturels ou synthétiques, qui sont utilisés pour prévenir et traiter les effets indésirables sur la santé humaine et animale. Dans ce secteur, l'eau est utilisée pour la fabrication des produits et pour le processus de nettoyage des équipements et de matériel. Les quantités d'eau rejetées par les industries pharmaceutiques sont non négligeables, sur tout avec l'augmentation de la consommation de leurs produits dans le monde entier [22].

Les rejets des usines de fabrication des médicaments est une source majeure de pollution. Les caractéristiques de leurs effluents varient selon le produit, le procédé de fabrication et la taille de l'industrie. Globalement, les polluants contenus dans ces effluents sont toxiques et difficiles à éliminer, ils sont généralement des résidus pharmaceutiques actifs, des antibiotiques, des huiles, des solvants organiques, des additifs, des catalyseurs et plusieurs d'autres produits chimiques. La plupart de ces composés sont partiellement solubles dans l'eau et sont persistant dans l'environnement grâce à leur nature polaire, ce qui fait que leur élimination est complexe et leurs effets sont de plus en plus nocifs [22].

### **II – 3 – 4 – L'industrie textile**

L'industrie textile c'est l'ensemble des activités de fabrication et de commercialisation des textiles (fibres, fils, tissus, vêtements). Elle englobe plusieurs processus, allant de la production des matières premières (laine, coton, nylon...), au traitement, au blanchiment, à la teinture, à l'impression etc... Chaque processus nécessite une très grande quantité d'eau, selon la World

Ressource Institut (WRI) environ 5000 milliards de litre d'eau sont utilisé chaque année dans le processus de teinture textile. A ce fait, l'industrie textile c'est l'une des industries les plus consommatrices d'eau, mais encore l'une des plus polluantes [23].

Les différentes étapes de production de textiles sont basées sur l'utilisation de divers produits chimiques et synthétiques. Ces composés artificiels sont la source principale de la contamination des eaux consommées dans l'usine de fabrication textile, en particulier ; les colorants, qui constituent d'énormes nuisances pour la santé humaine et les écosystèmes aquatiques. Les différents colorants utilisés ont des propriétés cancérogènes et causent de sérieux problèmes en raison de leur toxicité, leur stabilité et leur faible biodégradabilité [24]. Les effluents de l'industrie textile ont des caractéristiques physico-chimiques qui varient en fonction des produits utilisés, mais généralement ils sont très colorés, turbides, très chargés en (MO), en (MES) et en (DCO), détergents, sels, sulfates, nutriments et en métaux lourds... [25].

### **II – 3 – 5 – L'industrie papetière**

L'industrie papetière est le secteur de fabrication de tous types de papier et du carton à partir du bois ou des papiers recyclés. L'arrivé au produit final nécessite le passage par plusieurs opérations, globalement ; la préparation du bois, la cuisson et le lavage de la pâte à papier, le blanchiment...etc. Chaque étape nécessite d'énormes quantités d'eaux qui peuvent varier entre 5 à 300m<sup>3</sup>par Ton de produit, tandis qu'une usine de taille moyenne génère environ 2000 m<sup>3</sup> d'effluents par jour [26].

Les effluents issus des papeteries sont caractérisés par des concentrations élevées en demande chimique en oxygène (DCO) et en matières en suspension (MES). Ils contiennent également divers micropolluants, notamment des substances organiques (phénols, composés chloro-organiques, colorants et teintures), des métaux lourds (zinc, cadmium), des agents de blanchiment et certains métalloïdes comme l'arsenic (As) qui est un élément très toxique pour l'environnement et la santé humaine. Ces composants résistent à la dégradation naturelle en raison de fortes liaisons covalentes dans leurs structures moléculaires et leur élimination nécessite un traitement avancé [26].

## **II – 4 – L’impact des eaux usées industrielles sur l’environnement et la santé publique**

Le développement industriel permet de répondre aux demandes des populations croissantes et d’améliorer la qualité de vie. Cependant, il constitue une menace sérieuse pour l’équilibre environnemental et la santé humaine.

La majorité de la pollution de l’eau dans le monde est due aux rejets industriels. Ces derniers sont déversés directement dans le milieu naturel et parfois subissent des traitements insuffisants affectant ainsi le sol, les cours d’eau et les nappes.

Une grande partie de polluants organiques et minéraux transportés par les effluents industriels peuvent être dégradés par le processus d’autoépuration, mais lorsque leurs concentrations sont très élevées ; cette capacité naturelle sera alors dépassée. L’augmentation de la concentration de ces matières dans les eaux de surface entraîne une (DBO) et une (DCO) élevées et une diminution de l’oxygène dissous dans l’eau, qui provoquera la mort des espèces aquatiques par asphyxie, la prolifération d’algues, le développement de certaines bactéries pathogènes et l’augmentation de la turbidité des eaux ce qui empêche partiellement ou complètement le passage de la lumière par l’eau, limitant ainsi le développement des plantes aquatiques.

Certains polluants, tels que les colorants organiques ne peuvent pas être décomposés par les microorganismes et leurs molécules contiennent des groupements cancérigènes [27]. D’autres contaminants comme les produits pharmaceutiques, les produits chimiques synthétiques, les métaux lourds et certains nutriments provenant des différentes industries ne sont pas assimilables par les écosystèmes et sont très toxiques et détériorent la qualité de l’eau. La consommation de ces eaux contaminées par l’homme, que ce soit par utilisation directe, par irrigation ou par élevage peut également avoir des effets néfastes, et provoquer des maladies mortelles, selon les récentes estimations de l’organisation mondiale de la santé (OMS), environ 1 million de personnes meurent chaque année à cause des maladies d’origine hydrique.

Par ailleurs, les polluants industriels peuvent également dégrader la qualité des sols agricoles et altérer les eaux souterraines par infiltration, qui sont la principale source d’eaux potables dans plusieurs pays [28].

En effet, cette contamination industrielle réduit la disponibilité de l’eau douce et constitue un défi majeur pour la gestion durable des ressources en eau.

## II – 5 – Les normes de rejet des eaux usées industrielles

Afin de faire face aux effets nuisibles des rejets industriels, limiter la pollution de l'eau et préserver les ressources hydriques et l'ensemble de l'environnement, des réglementations strictes ont été fixées au niveau national et international par les agences environnementales et les gouvernements.

Quelle que soit la nature de l'activité industrielle, la qualité des eaux rejetées doit répondre aux normes sanitaires et réglementaires qui lui permettent d'être évacuées dans le réseau public de collecte, dans la station d'épuration de la collectivité ou dans le milieu naturel. L'industriel est considéré comme responsable de la qualité de ses rejets et il doit effectuer les analyses nécessaires pour assurer le respect des valeurs limites imposées [29].

L'exploitant a plusieurs options pour gérer ses effluents liquides, il peut également choisir entre :

- Le traitement de ses effluents liquides par une STEP interne avant déversement dans le milieu naturel.
- Effectuer un prétraitement sur le site industriel avant évacuation dans le réseau d'assainissement public ou dans une STEP de collectivité.
- L'épandage des effluents liquides sur les sols agricoles après épuration (généralement pour les industries agro-alimentaires) ou réutilisation [29].

En Algérie, les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels ont été définies par le décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 dans le Journal Officiel De La République Algérienne Démocratique Et Populaire. Quelques valeurs des paramètres de rejets liquides industriels fixées par ce décret sont représentées dans le **tableau (II.1)**.



**Tableau (II.1) : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels**

Paramètres	Unités	Valeurs limites	Tolérances pour les anciennes installations
Température	°C	30	30
PH	–	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
MES	mg/L	35	40
Azote Kjeldahl	mg/L	30	40
Phosphore total	mg/L	10	15
DCO	mg/L	120	130
DBO <sub>5</sub>	mg/L	35	40
Aluminium	mg/L	3	5
Hydrocarbures totaux	mg/L	10	15
Huiles et graisses	mg/L	20	30
Cadmium	mg/L	0.2	0.25
Cuivre	mg/L	0.5	1
Mercure	mg/L	0.01	0.05
Plomb	mg/L	0.5	0.75
Chrome	mg/L	0.5	0.75
Nickel	mg/L	0.5	0.75
Zinc	mg/L	3	5
Fer	mg/L	3	5
Composés organiques chlorés	mg/L	5	7
Substances toxiques bioaccumulables	mg/L	0.005	0.01

## II – 6 – Conclusion

Les effluents industriels constituent un vrai défi à cause de leurs caractéristiques complexes. La majorité des industries tels que l'industrie agro-alimentaire, pétrochimique, pharmaceutique, textile, papetière, ...etc rejettent des effluents liquides riches en polluants complexes, souvent toxiques, non biodégradables et persistants dans l'environnement. Afin d'éviter leurs effets nuisibles, le respect des normes réglementaires des rejets est indispensable.

## **Chapitre III : Les techniques de traitement des eaux usées industrielles**

### **III – 1 - Introduction**

L'épuration des eaux usées a toujours été une nécessité pour des raisons sanitaires et environnementales. Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, plusieurs méthodes de dépollution des eaux usées ont été développées afin de limiter leurs impacts nuisibles. Cependant, avec l'industrialisation croissante, les niveaux de contamination des eaux ont fortement augmenté, entraînant l'apparition de nombreux polluants réfractaires, dont certains étaient encore inconnus. De ce fait, le domaine de traitement des eaux usées a connu une évolution importante qui a permis d'améliorer les méthodes conventionnelles et de développer des technologies avancées pour pouvoir contrôler les déchets liquides industriels et minimiser les conséquences de cette pollution [30].

Le choix de procédé de traitement dépend de la nature et des caractéristiques des effluents ainsi que l'objectif. Généralement pour obtenir un meilleur résultat, plusieurs procédés sont combinés dans un ordre précis [31].

### **III – 2 – Les procédés conventionnels**

#### **III – 2 – 1 – Le prétraitement**

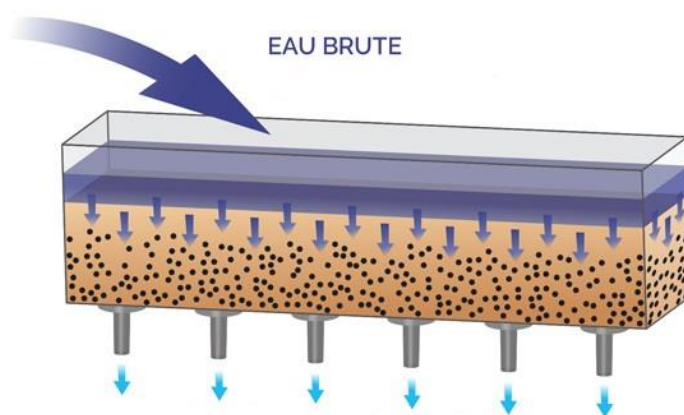
Le prétraitement est un procédé qui constitue la première étape de la chaîne de traitement. Une fois les eaux usées industrielles collectées dans une STEP, elles doivent d'abord subir un prétraitement, qui est une phase indispensable pour éliminer la pollution grossière, comme les éléments solides volumineux, les sables, les corps gras etc... Cette étape s'effectue en passant par des traitements physiques, principalement : le dégrillage, le dessablage et le déshuilage. Elle permet de retirer une grande partie de pollution (environ 35%) et de protéger les installations et les équipements de traitement [30].

### III – 2 – 2 – La filtration

La filtration est un procédé physique qui permet d'éliminer les matières en suspension (MES) de faible diamètre présentes dans l'eau. Cette technique consiste à faire passer l'eau polluée, à vitesse relativement faible par un milieu poreux, souvent le sable fin, ou par des matériaux en tissus, qui retient les particules en suspension. Lors du passage de l'eau à travers le milieu filtrant, une couche de biomasse s'accumule sur la surface de celui-ci permettant la dégradation de la matière organique ainsi la réduction de la pollution microbiologique [31].

Cependant, ce processus ne permet pas une élimination complète des particules solides et il est généralement suivi par des procédés physico-chimiques afin de compléter la purification de l'eau [5].

La filtration est un procédé simple et moins coûteux, mais il nécessite de grandes surfaces d'installation et un nettoyage continu des milieux filtrants [5]. La **figure (III.1)** représente une illustration simplifiée de la technique de filtration par lit de sable.



**Figure (III.1) :** Illustration de la technique de filtration par lit de sable.

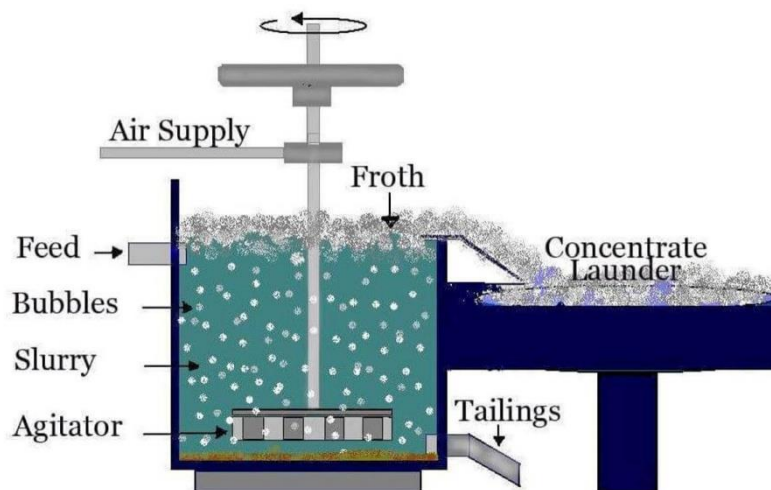
### III – 2 – 3 – La flottation

La flottation est un procédé physique utilisé pour séparer l'eau et les particules en suspension grâce à la différence de densité entre ces deux phases. Les particules de masse volumique inférieure à celle de l'eau remontent à la surface formant ainsi une couche de boues flottées appelée « écume » qui sera évacuée par raclage [31]. Le processus de flottation est représenté dans la **figure (III.2)**.

On distingue trois types de flottation [31] :

- Flottation naturelle, qui se produit naturellement lorsque la densité des matières polluantes en suspension est inférieure à celle de l'eau.
- Flottation assistée, elle consiste à augmenter la vitesse de séparation des particules naturellement flottables pour améliorer l'efficacité de processus, en utilisant un dispositif de diffusion d'air ou un agitateur qui crée des petites bulles d'air qui se fixent sur les particules, facilitant ainsi leur déplacement vers la surface.
- Flottation provoquée, c'est lorsque les particules en suspension possèdent une densité supérieure à celle de l'eau, celle-là sera alors réduite artificiellement à l'aide des microbulles d'air qui s'accrochent sur les polluants formant ainsi des particules moins denses.

Cette technique permet de diminuer significativement la concentration de certains paramètres physico-chimiques tel que les matières en suspension (MES), la (DCO), la (DBO) et la turbidité des eaux polluées. L'efficacité de ce processus a été démontrée dans l'élimination des huiles et des hydrocarbures dans les industries agroalimentaires et pétrochimiques [32].



**Figure (III.2) : Processus de flottation [33].**

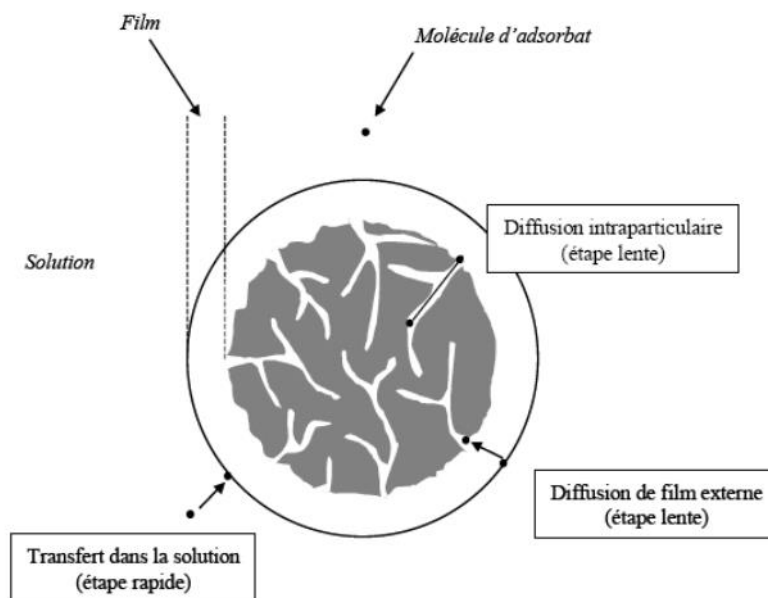
### III – 2 – 4 – L'adsorption

L'adsorption est un procédé physico-chimique par lequel des molécules fluides se fixent sur la surface d'un solide appelé « adsorbant » caractérisé par une structure microporeuse qui favorise la rétention des polluants (**figure (III.3)**). Ce mécanisme se produit grâce aux forces physiques, telles que les forces de Van Der Waals, les forces électrostatiques, les liaisons hydrogènes etc... et aux interactions chimiques entre l'adsorbant et les molécules polluantes par échange d'électrons [22].

Cette technique est largement utilisée pour traiter les effluents industriels, elle permet essentiellement d'éliminer les polluants organiques dissous, mais aussi certains métaux lourds et contaminants inorganiques solubles. Elle est caractérisée par son efficacité à épurer les eaux très chargées en matières organiques, sa simplicité, une faible consommation d'énergie, une réduction des boues chimiques et biologiques et la possibilité de récupération des adsorbants. Cependant, la rentabilité de cette méthode dépend de la nature des contaminants, des caractéristiques physico-chimiques des effluents liquides et de type d'adsorbant utilisé [22].

L'efficacité d'un adsorbant dépend souvent de sa surface spécifique, sa porosité, sa polarité et des composés contaminants contenus dans l'eau. De nombreux adsorbant ont été utilisés pour la purification des eaux polluées, notamment le charbon actif, l'alumine activée, la silice activée, les adsorbants polymériques, les bio-adsorbants etc... [22].

Le charbon actif est l'adsorbant le plus utilisé dans le traitement des effluents industriels par adsorption. Il se distingue par une grande capacité d'adsorption grâce à sa porosité élevée, sa grande surface spécifique qui peut atteindre jusqu'à 1500 m<sup>2</sup>/g et son temps de contact court. Il est également très efficace pour éliminer les colorants, les antibiotiques, les hydrocarbures, les pesticides, les détergents et même certains éléments toxiques. En outre, l'adsorption par charbon actif, peut être adaptée dans le cas d'un effluent réfractaire au traitement biologique, d'où elle permet de diminuer significativement la DCO résiduelle [31].



**Figure (III.3) : Mécanisme de processus d'adsorption [34].**

### III – 2 – 5 – La coagulation-floculation

La coagulation-floculation est un procédé physico-chimique, utilisé pour débarrasser les eaux des matières colloïdales. Ces matières, sont des particules en suspension de très faibles dimensions (entre 1nm et 10  $\mu\text{m}$ ) et non décantables naturellement. Elles sont caractérisées par des charge superficielles électrostatiques de même signe, souvent négatives, ce qui provoque des forces de répulsion entre elles et favorise leur stabilité dans l'eau [35].

Le principe de ce procédé est de diminuer les forces de répulsion électrostatiques entre les particules colloïdales en neutralisant leurs charges superficielles afin de provoquer leur rapprochement [35].

Comme son nom l'indique, le procédé de coagulation-floculation se compose de deux phases :

- La coagulation, c'est la déstabilisation des particules colloïdales par neutralisation de leurs charges électrostatiques, en utilisant des agents chimiques à charges positives appelés « Coagulants ». Ce processus nécessite une énergie d'agitation importante pendant un temps court pour favoriser le contact entre les particules polluantes et

l'agent coagulant [35]. Les coagulants utilisés sont généralement d'origine métallique, comme les sulfates d'aluminium ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), les sulfates ferreux ( $\text{FeSO}_4$ ) et le chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ), comme ils peuvent être des polymères organiques synthétiques, tels que les poly-électrolytes cationiques [5].

- La floculation, est le processus par lequel les particules polluantes déstabilisées s'agglomèrent pour former des flocons et des flocs plus volumineux qui peuvent décanter sous l'effet de leur poids. Cette opération peut être améliorée par l'ajout des agents « floculants » avec une agitation faible, contrairement à la coagulation, pour éviter la décomposition des flocs formés [35].

La coagulation-floculation est largement utilisée dans le traitement des effluents industriels grâce à son efficacité à éliminer les matières en suspension non décantables, les composés phosphorés, les colorants et la turbidité des eaux, ainsi de diminuer leurs teneurs en DCO et en DBO [5].

Cependant, l'efficacité de ce traitement dépend fortement des paramètres opératoires, notamment ; le pH de l'eau, la température, la vitesse et le temps d'agitation, le type et la concentration de coagulant, la charge polluante initiale etc... [22]. Ainsi, ce procédé présente plusieurs inconvénients, entre autres le coût élevé des réactifs chimiques, la production des quantités importantes de boues et le risque d'une pollution secondaire dans le cas d'un mauvais dosage [5].

### **III – 2 – 6 – Le traitement biologique**

Le traitement biologique est une phase indispensable de la chaîne de traitement des effluents chargés en pollution organique biodégradable. Son principe consiste à reproduire un système de traitement similaire à celui de l'autoépuration qu'on trouve dans le milieu naturel [31].

Ce procédé est réalisé simplement par l'utilisation des populations bactériennes qui se nourrissent de la matière organique dissoute et en suspension [36]. Selon le type des micro-organismes utilisés, on distingue deux types de traitements biologiques :

**a) Le traitement aérobie**

Ce type est effectué en présence des bactéries aérobies dans l'eau à traiter qui nécessitent un apport permanent d'oxygène dissous pour leurs métabolismes [36]. Ces bactéries consomment les matières organiques et produisent en parallèle de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et de la biomasse [5].

Ce traitement est utilisé principalement pour les effluents faiblement chargés en pollution organique, cela est en raison de la formation des quantités importantes de boues et la nécessité d'un apport élevé en oxygène ce qui conduit à des coûts très chers [5].

Le traitement aérobie peut s'effectuer soit par culture libre, dont laquelle les microorganismes sont maintenues en suspension dans le mélange à traiter (traitement par lagunage, boues activées...), ou par culture fixée, en fixant les bactéries sur des supports (lits bactériens, biodisques, biofiltres...) [36].

**b) Le traitement anaérobie**

A l'inverse des procédés aérobies, le traitement anaérobie consiste à mettre en contact les matières organiques contenues dans l'eau avec des bactéries qui dégradent ces pollutions sans présence d'oxygène. Ces microorganismes anaérobies transforment les composés organiques en biomasse et en biogaz, composé essentiellement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) en passant par plusieurs étapes de conversion [36].

Ce procédé est recommandé dans le cas d'un effluent très concentré en pollution organique. Il permet une économie d'énergie grâce à l'absence d'aération et la faible production des boues biologiques, ainsi il présente l'avantage de la possibilité de réutiliser le biogaz produit pour d'autres productions. Cependant, il constitue une opération délicate et il nécessite une surveillance importante des paramètres opératoires (pH, température...) [36].

**III – 2 – 7 – L'oxydation conventionnelle**

Les procédés d'oxydation conventionnelle sont destinés au traitement des effluents très chargés en pollution non biodégradable ou toxique. Ils consistent à utiliser des agents chimiques oxydants pour transformer les polluants en d'autres produits non ou moins toxiques, ou bien pour les rendre insolubles dans l'eau, ce qui facilite leur élimination par la suite après décantation [5].



De nombreux oxydants peuvent être utilisés pour ce type de traitement, notamment l'oxygène atomique (O), le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>), le chlore (Cl) et l'hypochlorite de sodium (NaClO) [37].

Ces substances et bien que d'autres, permet d'éliminer certains microorganismes pathogènes et de diminuer les concentrations des métaux lourds, des composés azotés et des hydrocarbures. Cependant, ils ne garantissent pas une élimination complète de ces polluants et ils peuvent avoir des effets indésirables et produire des résidus nocifs [37].

### III – 3 – Les procédés avancés

#### III – 3 – 1 – La filtration membranaire

La filtration membranaire est une technologie développée de séparation physique des différents composés d'un mélange. Elle est basée sur l'utilisation d'un filtre membrane, de nature organique ou minérale, caractérisé par une faible épaisseur et des pores réguliers de très petites dimensions. Le flux d'eau traverse, sous pression, la membrane permettant ainsi la rétention des particules les plus fines [31].

Selon le diamètre des pores de la membrane et la taille des polluants à éliminer, on distingue quatre « 4 » techniques de séparation [38], représentés dans le **tableau (III.1)**.

*Tableau (III.1) : Les techniques séparatives à membrane utilisées dans le traitement des eaux usées.*

Technique	Diamètre des pores	Type de pollution retenue
<b>Osmose Inverse (OI)</b>	0.0001µm – 0.001µm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sels, ions métalliques</li> </ul>
<b>Nanofiltration (NF)</b>	0.001 µm – 0.01 µm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sels ionisés multivalents (calcium, aluminium, sulfates, manganèse etc...)</li> <li>Composés organiques non-ionisés de masse molaire supérieure à 250g/mol</li> </ul>
<b>Ultrafiltration (UF)</b>	0.01 µm – 0.1 µm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Polymères, protéines, colloïdes, virus</li> </ul>
<b>Microfiltration (MF)</b>	> 0.1 µm	<ul style="list-style-type: none"> <li>MES, bactéries, colloïdes</li> </ul>

Le procédé de séparation membranaire est généralement utilisé pour le traitement des eaux de process des différentes industries, le dessalement des eaux saumâtres, la potabilisation des eaux et la dépollution des effluents chargés en micropolluants organiques et minérales qui ne peuvent pas être éliminés par les procédés classiques de filtration [38].

Cependant, cette méthode permet seulement la séparation des polluants et pas leur destruction, ce qui conduit à des coûts complémentaires, significativement importants, de retraitement des solutions obtenues. De ce fait, elle n'est pas favorable pour traiter les eaux très concentrées en micropolluants [37].

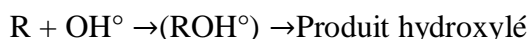
### III – 3 – 2 – L'oxydation avancée

L'oxydation avancée est une nouvelle technologie innovante, écologique et efficace conçue pour éliminer les substances biorécalcitrantes (non biodégradables) présentes dans les rejets liquides industriels qui ne peuvent pas être dégradés par les procédés de traitement conventionnels [39].

Ce procédé est un traitement oxydatif, il consiste à produire des radicaux libres, principalement les radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\circ$ ) qui sont des espèces oxydantes très puissantes et capables d'oxyder la quasi-totalité des substances organiques. Ces composés hautement actifs, réagissent sur les liaisons carbone dans les molécules organiques, pour les transformer en composés facilement biodégradables, ou bien pour les minéraliser totalement en ( $\text{CO}_2$ ), ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et ions inorganiques [39].

Les radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\circ$ ), sont des molécules qui possèdent un électron célibataire (libre), responsable d'une forte polarité. Ces molécules instables, réagissent avec les substrats organiques selon deux modes de réactions [39] :

- Addition électrophile, qui se fait par l'addition du radical  $\text{OH}^\circ$  sur le composé organique :



- Abstraction d'hydrogène, qui se fait par l'élimination d'un atome d'hydrogène :



Les radicaux hydroxyles, en plus de leur haute capacité à minéraliser totalement les substances organiques polluantes, ils sont caractérisés par une vitesse de réactivité très élevée, non toxiques,

non corrosifs pour les équipements de traitement et ils ne génèrent pas une pollution secondaire [5]. Cependant, leur génération peut être onéreuse pour les grands volumes d'eau, ainsi leur action ou leur production peut être limitée à cause des éléments inhibiteurs des radicaux, comme les carbonates et les bicarbonates [39].

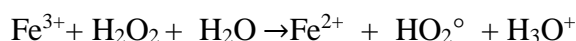
Plusieurs techniques permettent de produire des radicaux hydroxyles. Chaque technique peut être utilisée seule, ou combinée à d'autres procédés ; permettant une meilleure performance.

On distingue ainsi quatre « 4 » procédés principaux d'oxydation avancée, à savoir :

### ***III – 3 – 2 – 1 – Les procédés d'oxydation chimique en phase homogène***

#### ***a) Le procédé Fenton***

Cette technique consiste à produire des espèces radicalaires libres, notamment les radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\circ$ ) et les radicaux hydroperoxydes ( $\text{HO}_2^\circ$ ), à partir des réactions de décomposition entre le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) et les ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) [39].



Ces molécules radicalaires sont très réactives et capables de détruire les polluants organiques réfractaires. Cependant, leur efficacité nécessite un milieu acide (pH compris entre 2 et 4 avec une valeur optimale de 2.8), au-delà de ces valeurs, le fer est susceptible de précipiter limitant ainsi l'activité catalytique et forme des résidus métalliques qu'il faut éliminer [39].

De ce fait, pour améliorer la performance de ce procédé, une nouvelle approche a été développée, appelée « L'électro-Fenton », qui permet une production in situ des réactifs ( $\text{H}_2\text{O}_2$  et  $\text{Fe}^{2+}$ ) par voie électrolytique. Le peroxyde d'hydrogène est alors généré par la réduction de l'oxygène au niveau de la cathode, tandis que les ions ferreux sont libérés en solution par dissolution anodique (oxydation) d'une électrode en fer [39].

La technologie de réactif Fenton est couramment la plus connue, elle permet de dépolluer les effluents industriels de toutes substances réfractaires, notamment les hydrocarbures aromatiques, les antibiotiques, les teintures, les produits phytosanitaires (herbicides, insecticides) etc... [39].

b) Le procédé de Peroxonation

Dans le procédé de Peroxonation, la production des radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\circ$ ) se fait par le couplage entre le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ). Ce couplage, donne une meilleure performance par rapport à lorsque ces deux oxydants sont utilisés séparément (oxydation conventionnelle). Les ions peroxydes ( $\text{HO}_2^-$ ) réagissent très rapidement sur l'ozone selon la réaction suivante [39]:



La Peroxonation est une technique très efficace pour la dégradation des micropolluants et des substances toxiques telles que les pesticides et les hydrocarbures. Cependant, elle est très sensible aux conditions opératoires comme le pH du milieu, la température et la nature des polluants, ainsi elle est affectée par la faible solubilité de l'ozone [39].

### **III – 3 – 2 – 2 – Les procédés photo-catalytiques**

Le traitement photo-catalytique est une technologie basée sur le phénomène naturel de photocatalyse, dans lequel une substance appelée « photocatalyseur » initie une réaction chimique sous l'effet de la lumière (énergie photonique) sans être consommée [40].

Le principe des procédés photo-catalytiques dans l'épuration des eaux contaminées, reposent sur l'initiation des réactions d'oxydation pour décomposer les matières polluantes sous l'action des rayons lumineux, naturels ou artificiels. La dégradation de ces substances polluantes dans l'eau peut se faire par oxydation directe ou par formation des radicaux hydroxyles très réactifs [40].

Ce traitement peut être réalisées par ; le couplage des radiations UV avec des espèces oxydantes puissantes comme l'ozone ( $\text{O}_3$ ) ou le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), ou bien par la photo-excitation d'un catalyseur comme le dioxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ ), un élément semi-conducteur et le catalyseur le plus utilisé dans ce type de procédés grâce à son activité photo-catalytique dans un large domaine de pH [40].

### ***III – 3 – 2 – 3 – Les procédés d’oxydation sonochimiques***

Les procédés d’oxydation sonochimiques sont basés sur l’utilisation des ultrasons pour provoquer des réactions chimiques dans un milieu aqueux. L’introduction des ondes sonores de haute fréquence dans un liquide, peut générer deux actions à l’échelle moléculaire [39] :

- Des ruptures homolytiques (cassure des liaisons covalentes) au niveau des molécules d’eau et d’oxygène, ce qui conduit à la génération des radicaux libres ( $\text{HO}^\bullet$ ), ( $\text{HO}_2^\bullet$ ) et ( $\text{O}^\bullet$ ) qui vont réagir avec les polluants grâce à leur pouvoir oxydant.
- Une génération des bulles de cavitation (phénomène de cavitation acoustique) qui, par leur implosion, vont briser les cellules bactériennes et augmenter la température et la pression dans le liquide ce qui favorise les interactions des radicaux libres avec les molécules polluantes.

La performance de cette méthode dépend largement de la composition de l’effluent, et de la fréquence et l’intensité ultrasonore appliquée. Elle est généralement combinée avec d’autres procédés chimiques ou d’oxydation avancée à cause de son faible rendement dans les grands volumes d’eau et la consommation énergétique très élevée [39].

### ***III – 3 – 2 – 4 – Les procédés d’oxydation électrochimiques***

L’oxydation électrochimique, consiste à utiliser l’électricité pour oxyder les polluants réfractaires présents dans l’eau par transfert d’électrons. Pour ce faire, deux électrodes sont immergées dans la solution conductrice, qui permettent le passage de courant électrique à travers le milieu aqueux [39].

L’oxydation des polluants par voie électrochimique, peut se faire de deux manières différentes, directe ou indirecte. L’oxydation directe repose sur le principe de l’électrolyse, elle s’effectue par l’utilisation des électrodes insolubles à forte surtension d’oxygène, généralement ( $\text{Ti}/\text{IrO}_2$ ), ( $\text{Ti}/\text{RuO}_2$ ), ( $\text{Ti}/\text{SnO}_2$ ) etc...qui permettent d’oxyder les composés difficilement oxydables au niveau de leurs surfaces. L’oxydation indirecte est obtenue par la génération des espèces chimiques réactives intermédiaires par voie électrochimique, tels que ( $\text{HClO}$ ), ( $\text{HBrO}$ ), ( $\text{IOH}$ ), ( $\text{I}_3^-$ ) ou ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), qui réagira en solution avec les contaminants. Ce mode est adapté lorsque l’oxydation directe est inefficace ou lente [39].

Cette technique est capable d'éliminer divers polluants organiques (acides humiques, phénols...) et inorganiques (métaux lourds, fluorures, sulfures, phosphates...) dans l'eau usée, de plus, elle est caractérisée par son aspect non polluant, une facilité d'automatisation et un volume d'équipement réduit [39].

### III – 3 – 3 – Le traitement électrochimique

Le traitement électrochimique est une technique basée sur l'utilisation de l'énergie électrique pour provoquer des transformations chimiques au niveau d'une solution aqueuse. Le passage d'un courant électrique continu à travers un milieu ionique, entraîne des réactions chimiques grâce aux mouvements des électrons et au déplacement des ions, ce qui engendre des modifications des propriétés physico-chimiques des substances polluantes présentes dans l'eau, permettant ainsi leur transformation ou leur séparation [41].

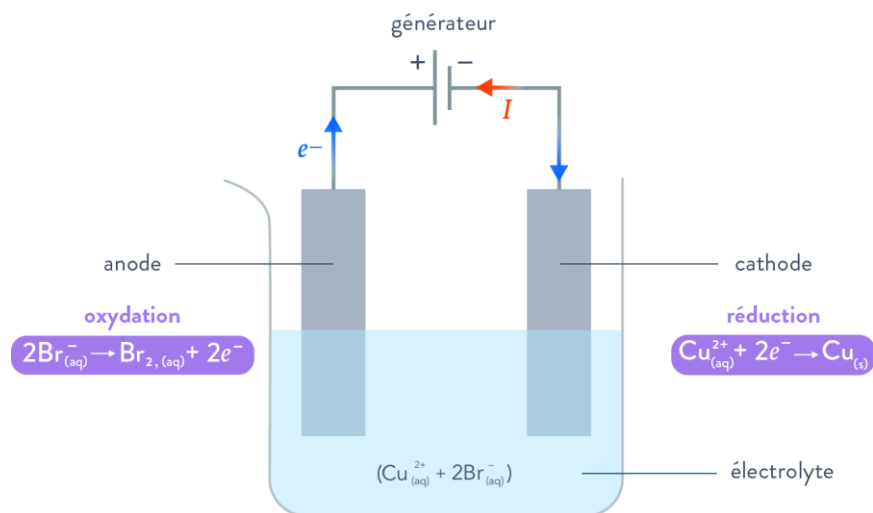
L'application d'une tension électrique se fait à l'aide de deux électrodes ; une électrode positive appelée « anode » et une électrode négative appelée « cathode », qui sont immergées dans l'électrolyte. L'ensemble de système comprenant les électrodes et l'électrolyte est appelé « une cellule électrolytique » (**figure (III.4)**) [41].

Les molécules polluantes subissent une oxydation à l'anode et une réduction au niveau de la cathode [41].

Lorsque ces réactions se produisent directement sur la surface des électrodes, le procédé d'électrolyse est dit direct, et il est également efficace pour traiter les impuretés de petite taille, telles que les ions, les colloïdes et les virus [41].

En revanche, pour les contaminants de plus grande taille, comme les bactéries ou les matières en suspension (MES), il est préférable de générer des oxydants par voie électrochimique dans la solution, comme les halogènes ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$ etc...). Ces oxydants agiront alors en solution pour dégrader les impuretés, ce qui correspond à un procédé d'électrolyse indirecte [41].

Le traitement électrochimique permet de décomposer une large gamme de contaminants organiques, inorganiques, microbiologiques et certains composés réfractaires. Plusieurs procédés électrochimiques ont été développés, notamment l'électrocoagulation, l'électro-oxydation, l'électroflottation, l'électrodialyse et l'électro-Fenton [41].



**Figure (III.4) : Cellule électrochimique [42].**

### III – 4 – L'Electrocoagulation (EC)

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique qui a montré son efficacité dans la dépollution des effluents issus de plusieurs industries, notamment l'industrie agroalimentaire, l'industrie textile, les tanneries, les usines de polymérisation et de métallurgie [43]. L'EC permet également l'élimination des contaminants organiques et minéraux tels que les colorants, les métaux lourds, les composés phosphorés, les huiles, divers contaminants microbiologiques ainsi que les matières en suspensions (MES) et plusieurs d'autres polluants récalcitrants [26].

L'électrocoagulation est une alternative intéressante aux procédés chimiques grâce à sa capacité à traiter des mélanges très complexes, à l'absence de produits chimiques ajoutés, à la faible production de boues, au temps de traitement réduit et à sa facilité d'automatisation [26].

#### III – 4 – 1 – Historique et évolution de procédé d'EC

En 1833, le physicien et chimiste britannique Michael Faraday a défini le concept d'électrolyse, décrivant le phénomène par lequel un courant électrique entraîne des réactions dans une substance et provoque la décomposition de ses composés chimiques. En 1834, il a annoncé les deux lois de l'électrolyse nommées par son nom dont lesquelles il a prouvé que la quantité de décomposition chimique est directement proportionnelle à la quantité d'électricité traversant la

solution, et pour une même quantité d'électricité, les masses des différentes substances dissoutes sont proportionnelles à leurs masses équivalentes chimiques [44].

Cette découverte a donné naissance à de nombreux procédés électrochimiques, notamment l'électrocoagulation. En 1880, Webster a déposé le premier brevet américain qui rapporte l'utilisation de l'EC dans le traitement des effluents en utilisant des électrodes en fer. Sur la base de ce brevet, une station d'épuration fut construite dans la même année en Grande-Bretagne pour épurer les effluents urbains. Un nouveau brevet sur cette technologie a été déposé par Harries en 1909 dans lequel il a utilisé des électrodes en fer et en aluminium. En 1912, deux autres stations de traitement des eaux usées furent construites sur ce principe aux Etats-Unis, mais leur fonctionnement fut arrêté quelques années plus tard en raison du coût très élevé [26].

Au cours des années 1940, plusieurs études sur les procédés électrochimiques ont été publiées, mais ils ne suscitaient pas un intérêt majeur à cette époque. Ce n'est que plus tard, dans les années 1970 et 1980, que les recherches sur l'application de l'électrocoagulation pour le traitement de différents types d'eaux ont généré un intérêt notable. L'électrocoagulation a commencé à regagner de l'importance à la fin du XXe siècle avec les progrès des procédés électrochimiques et la réglementation sur les rejets de plus en plus stricte. Plusieurs applications du procédé ont été réalisées sur différents types d'effluents et montrent une efficacité très élevée et un coût de traitement compétitif par rapport aux procédés classiques grâce aux développements technologiques récents [26].

De nombreuses industries utilisent maintenant le procédé d'EC pour traiter leurs rejets liquides. Cette technique reste jusqu'à l'heure actuelle, un axe de recherche en évolution, afin d'optimiser son efficacité et de l'exploiter à son potentiel maximum [26].

### **III – 4 – 2 – Principe et mécanismes de l'EC**

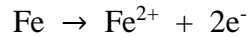
L'électrocoagulation est un procédé électrochimique de dépollution, dérivé de la coagulation chimique conventionnelle, mais il se distingue par un mécanisme différent. Son principe consiste à générer des espèces coagulantes in situ par la dissolution électrolytique d'une anode sacrificielle sous l'effet du champ électrique.

Dans l'EC, des électrodes métalliques sont utilisées, généralement en Fer ou en Aluminium grâce à leurs formes ioniques trivalentes, mais d'autres métaux peuvent également être employés. Le passage d'un courant électrique continu à travers la cellule électrolytique provoque [26]:

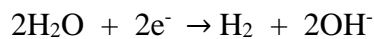


- Des réactions électrochimiques au niveau des électrodes dues au transfert des électrons.
- Des mouvements des particules chargées (ions et colloïdes) dues au gradient de vitesse créé par le champ électrique.

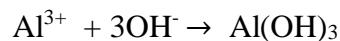
Au niveau de l'anode, des réactions d'oxydation électrolytiques se produisent, permettant la dissolution du métal en ions métalliques. Pour des électrodes en Fer et en Aluminium les réactions d'oxydation sont les suivantes :



Les ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) sont également instables à la présence d'oxygène et ils s'oxydent en ions ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ) [26]. Au niveau de la cathode, l'électrolyse de l'eau aura lieu et permet de libérer de dihydrogène ( $\text{H}_2$ ) sous forme des bulles et des ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) selon la réaction suivante :



Les cations métalliques formés se réagissent avec les ions hydroxydes pour former des hydroxydes de fer et d'aluminium selon les réactions suivantes :

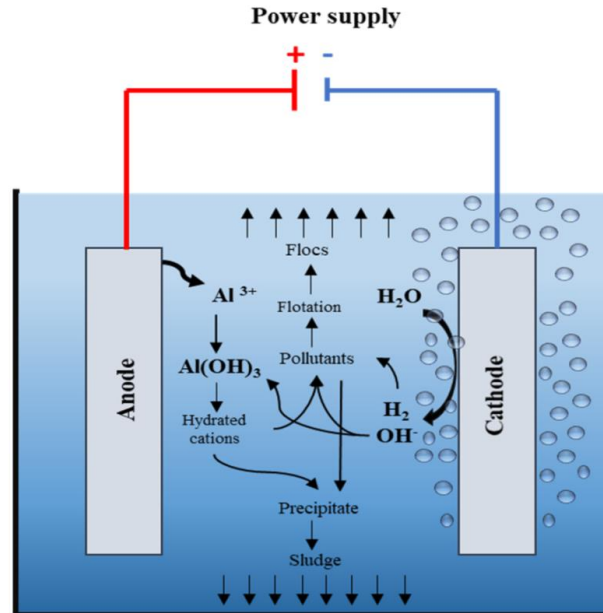


Les ions métalliques et les hydroxydes métalliques formés, peuvent agir directement comme des coagulants pour neutraliser et déstabiliser les particules polluantes chargées négativement, ou bien intervenir dans des réactions secondaires pour former d'autres espèces complexes coagulantes par hydrolyse ou par polymérisation [45].

Ces complexes peuvent être des espèces monomériques telles que  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , ou des espèces polymériques comme  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$  etc... qui sont capables d'éliminer les polluants dissous ou insolubles par adsorption ou par précipitation. Le type des complexes formés dépend fortement de pH du milieu aqueux et de sa conductivité [45].

Le mouvement des particules chargées généré par le champ électrique favorise la rencontre entre les particules polluantes et les coagulants métalliques pour former des floccs facilement

séparables de l'eau (processus d'électro-floculation). La séparation des flocs s'effectue par décantation, sous l'effet de leur propre poids, et par électro-flottation, pour les flocs moins denses, grâce aux petites bulles de dioxygène produites par l'électrolyse de l'eau à l'anode, mais surtout de dihydrogène formé par la réduction de l'eau à la cathode [26]. Le principe général du procédé d'EC est présenté dans la **figure (III.5)**.



**Figure (III.5) : Principe de procédé d'EC [46].**

### III – 4 – 3 – L'influence des paramètres opératoires sur le procédé d'EC

Le rendement global de processus d'électrocoagulation dans la dépollution d'une eau contaminée dépend fortement des paramètres opératoires, notamment l'intensité du courant imposé, le pH et la conductivité de la solution à traiter, les caractéristiques des électrodes, la distance inter-électrodes la température et le temps de traitement.

#### a) La densité du courant

Selon la première loi de Faraday, la quantité du coagulant produite par la dissolution de l'anode est directement proportionnelle à la quantité d'électricité traversant l'électrolyte. La densité du courant est alors un paramètre essentiel dans ce processus, son augmentation conduit effectivement à une production élevée des espèces coagulantes, ce qui permet une dépollution plus efficace. Cela favorise également une génération des bulles de dihydrogène à la cathode,

plus denses et de taille plus faible, ce qui permet d'obtenir une électroflottation très performante [45].

Cependant, une intensité du courant très élevée a pour conséquence une formation excessive des bulles de gaz et une augmentation rapide de la température de la solution, ce qui conduit à la perturbation des différentes réactions électrochimiques et peut causer la décomposition des floccs formés. En outre, l'oxygène produit à l'anode peut rentrer en compétition avec la réaction de la dissolution anodique et empêcher la formation des ions métalliques, réduisant ainsi le rendement de processus d'EC. Pour cela, il est nécessaire d'optimiser la densité du courant appliqué [45].

### ***b) Le matériau des électrodes***

Le matériau des électrodes a une influence significative sur la performance du procédé d'EC. Le choix de matériau dépend essentiellement de type de pollution à traiter, mais aussi d'autres paramètres opératoires comme le pH et la densité du courant. Plusieurs matériaux ont été utilisés en électrocoagulation, notamment le Fer (Fe), l'Aluminium (Al), le Zinc (Zn), le Silicium (Si), l'Argent (Ag) etc... Cependant, le Fer et l'Aluminium sont les plus utilisés en raison de leur disponibilité, de leur faible coût, de leur bonne solubilité, ainsi de leur capacité à éliminer de nombreux types de polluants [47].

Certaines études ont montré que des électrodes en (Al) sont plus efficaces pour éliminer les huiles, la couleur et la turbidité des eaux usées par rapport à celles en (Fe). De même, un taux de réduction de la (DCO) plus élevé a été observé pour des électrodes en (Al). Cela, est dû à la meilleure capacité d'adsorption des hydroxydes d'aluminium. Cependant, à des faibles intensités du courant, les études ont montré que des électrodes en (Fe) donnent de meilleurs résultats. De bons résultats ont été aussi observés par la combinaison des électrodes en fer et en aluminium sur une large gamme de pH [47] [45].

### ***c) Le pH initial de la solution***

Le pH initial de l'eau à traiter a un impact direct sur l'efficacité de procédé d'électrocoagulation. Le type des espèces coagulantes produites par l'hydrolyse des ions de fer et d'aluminium dépend des valeurs de pH dans le milieu. A des valeurs initiales très acides ou très basiques, les

performances de processus diminuent. Lorsque le pH de l'eau est très basique ( $>10$ ), les substances coagulantes dominantes portent des charges négatives, par exemple  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  qui ne présentent aucun effet sur les polluants. De plus, à des valeurs de pH assez élevées, les charges électrostatiques de la surface des particules colloïdales sont modifiées, ce qui perturbe le fonctionnement de processus d'EC [45].

La solubilité des hydroxydes métalliques augmente dans un milieu très acide ( $\text{pH} < 3.9$ ), cela est expliqué par les réactions entre les ions  $\text{H}^+$  et les hydroxydes métalliques, induisant à la dissociation de celles-ci en ions métalliques et ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ce qui empêche la formation des coagulants. Pour les hydroxydes de fer et d'aluminium, les pH limite de solubilité sont respectivement 5.5 et 4 [45].

#### *d) La conductivité de la solution*

La conductivité électrique dans une solution aqueuse représente la quantité d'ions libre capables de transporter le courant. L'augmentation de la conductivité favorise le passage du courant électrique à travers l'électrolyte et permet ainsi d'accélérer les réactions électrochimiques, d'optimiser la consommation énergétique et de réduire le temps de traitement [45].

Si la conductivité de l'eau est faible, il est alors nécessaire d'ajouter une solution saline, telle que  $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etc... Ces substances sont très solubles dans l'eau, elles permettent de libérer un grand nombre d'ions et augmenter la conductivité de l'eau à traiter [48]. Le  $\text{NaCl}$  est généralement le plus utilisé, cependant un surdosage du sel ajouté peut entraîner des réactions entre les ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et les hydroxydes métalliques permettant de générer des composés chlorés non utiles à la coagulation [45].

#### *e) La distance inter-électrodes*

La distance entre les électrodes dans une cellule électrolytique influence significativement le processus d'EC. Une distance très faible, limite l'agglomération des particules polluantes, cela est dû à l'augmentation des forces d'attraction électrostatiques entre les électrodes qui cause la rupture des floes créés par les hydroxydes métalliques [49].

D'autre part, une distance très grande augmente la résistance entre les électrodes, d'où la nécessité de surmonter la tension électrique pour favoriser le passage du courant électrique à travers l'électrolyte, ce qui conduit à des coûts énergétiques plus élevés. De même, les distances importantes entravent le transport des ions, limitant ainsi les interactions entre les polluants et les espèces coagulantes [49].

Une meilleure efficacité est obtenue en maintenant un espacement optimal, de tels sorts que ; les forces électrostatiques ne perturbent pas les interactions entre les molécules et que les coagulants ont un temps idéal pour former des floes [48].

#### *f) La température*

La température est un paramètre fondamental qui affecte la performance de procédé d'EC. Une température élevée peut améliorer les réactions électrochimiques, grâce à la diminution de la viscosité de la solution à traiter, ce qui augmente la mobilité moléculaire, favorisant ainsi les collisions entre les particules [49].

La conductivité de l'eau dépend également de sa température, lorsque celle-ci est importante, la conductivité augmente, ce qui améliore le processus d'élimination des polluants et réduit la consommation énergétique [47].

Cependant, les températures très élevées produisent un excès d'énergie, qui peut perturber les interactions électrochimiques et rompre ou disperser les floes formés. De même, à des hautes températures, des couches fines isolantes d'oxydes métalliques ( $M_nO_m$ ) se forment rapidement sur la surface de l'anode empêchant la production des ions métalliques nécessaires à la coagulation [49].

#### *g) La surface active et la géométrie des électrodes*

La surface active correspond à la zone des électrodes directement exposée au milieu traité, où les réactions électrochimiques ont lieu. Une grande surface permet l'augmentation de la production des coagulants et une bonne répartition du courant ce qui aide à éviter les phénomènes locaux d'intensité élevée qui pourraient dégrader les électrodes.

D'une autre part, la forme et la disposition des électrodes influencent les réactions électrochimiques. On trouve des électrodes plates, poreuses, cylindriques, spirales et en mailles.

Une géométrie bien conçue permet un champ uniforme, assurant une dissolution homogène des électrodes et une production régulière de coagulants.

### **III – 4 – 4 – Les avantages et les inconvénients de procédé d'EC**

Comme toute technologie, l'électrocoagulation présente à la fois des avantages et certains points faibles qui limitent sa performance. Parmi les avantages les plus notables de ce procédé on peut citer :

- Sa capacité élevée à éliminer une grande variété des polluants organiques, inorganiques et microbiologiques présents dans les eaux usées.
- Un procédé applicable aux différents types d'eau (effluents industriels, effluents domestiques, eaux potables...).
- Il possède une installation et un équipement simple et facile à automatiser.
- Une faible production de boues, ce qui réduit le coût d'élimination des résidus de traitement.
- L'absence des produits chimiques ajoutés, ce qui réduit le coût de traitement.
- Un temps de traitement court et un coût total raisonnable.
- La possibilité de combinaison avec d'autres procédés de traitement.

Cependant, ses inconvénients incluent :

- Une consommation énergétique et un coût élevé pour les grands volumes d'eaux usées.
- La nécessité d'un remplacement périodique des électrodes.
- La nécessité des solutions à haute conductivité.
- La production des boues très chargées en résidus métalliques.
- Une efficacité limitée pour certains polluants, tels que l'azote ammoniacal.

### **III – 5 – Conclusion**

Les différents procédés de traitements conventionnels sont parfois moins efficaces face à la complexité croissante des polluants industriels. Pour cela, des procédés avancés ont été développés afin de répondre aux limites des technologies classiques, en visant les composés réfractaires, toxiques ou peu biodégradables, et en assurant une meilleure performance de dépollution.

## Partie II

# Etude Expérimentale



## **Chapitre IV : Matériels et Méthodes**

### **IV – 1 – Introduction**

Dans le but d'évaluer l'efficacité du procédé d'électrocoagulation pour la dégradation des polluants réfractaires présents dans les effluents issus de l'industrie textile, une étude expérimentale a été réalisée, portant sur la cinétique d'élimination d'un colorant synthétique contenu dans ces eaux usées. Cette étude s'est concentrée sur trois paramètres opératoires principaux : la densité du courant appliqué, la distance entre les électrodes, et la conductivité de la solution. L'objectif est d'examiner leur impact sur le rendement du procédé d'électrocoagulation et d'identifier les conditions optimales garantissant une dépollution plus performante. Ce chapitre détaille le matériel utilisé, la méthodologie adoptée pour les essais de traitement, ainsi que les techniques analytiques mises en œuvre.

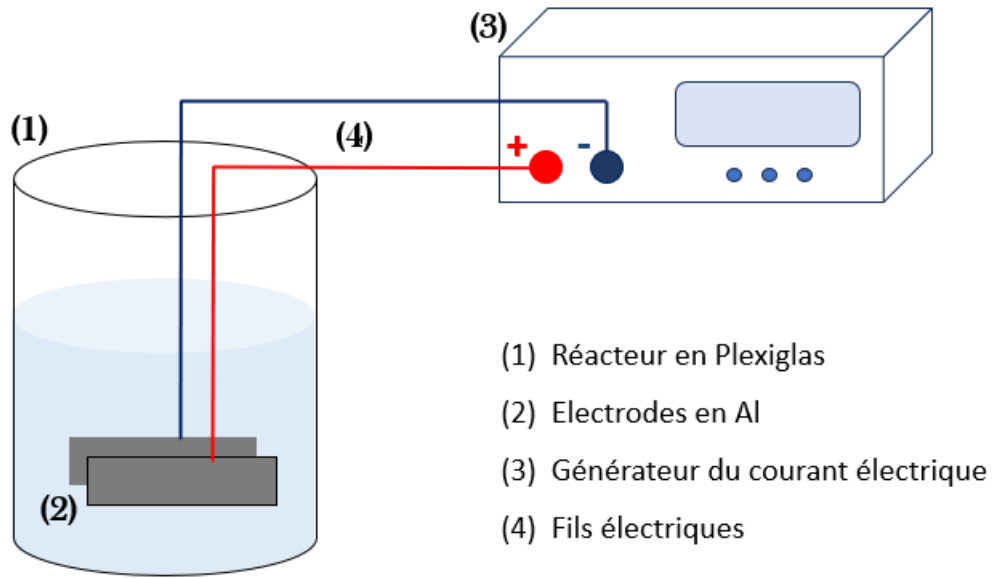
### **IV – 2 – Matériels**

#### **IV – 2 – 1 – Unité de traitement**

Les essais de traitement ont été conduits dans une cellule électrolytique au design simple, composée des éléments suivants :

- ✓ Un réacteur cylindrique en Plexiglas, d'un volume de 12 L.
- ✓ Deux électrodes fixes en aluminium, de forme rectangulaire, présentant une géométrie plane et une surface active de 68 cm<sup>2</sup> chacune.
- ✓ Un générateur de courant continu (0 – 3A), utilisé pour alimenter le système en électricité et ajuster la densité du courant.
- ✓ Des fils électriques d'un diamètre de 1 mm, permettant le transfert du courant vers les électrodes.

Un schéma explicatif de l'unité de traitement est représenté dans la **figure (IV.1)**.



*Figure (IV.1) : Unité de traitement par électrocoagulation.*

#### IV – 2 – 2 – Produits et matériaux utilisés

##### *a) Matériau des électrodes*

Dans ce travail, des électrodes en Aluminium ont été utilisées dans le processus d'électrocoagulation en raison de son efficacité reconnue. Les hydroxydes d'Aluminium formés lors de la dissolution anodique sont très performants dans l'élimination de la couleur grâce à leur capacité d'adsorption élevée, ce qui les rend particulièrement efficaces pour le traitement des effluents textiles. De plus, ce matériau offre également un avantage économique important en raison de sa grande disponibilité et de son faible coût [47].

##### *b) Colorant synthétique*

Afin de produire des échantillons d'eaux usées textiles, nous avons utilisé un colorant synthétique couramment employé dans l'industrie textile, le « Bleu d'Indanthrène RS », également connu sous le nom de bleu d'Indanthrone (C.I. Pigment Blue 60 – PB60). Ce composé chimique appartient à la famille des pigments anthraquinoniques, il se présente sous forme de

poudre bleu vif à nuance rougeâtre et il est spécialement utilisé pour la teinture des textiles à base de fibres cellulosiques [50].

Le Bleu d'Indanthrène est un colorant de cuve, c'est-à-dire qu'il est insoluble dans l'eau sous sa forme oxydée en raison de sa grande stabilité chimique, mais il devient soluble lorsqu'il est réduit. Cette substance synthétique est caractérisée par sa résistance dans l'environnement et sa forte intensité colorante, et nécessite ainsi un traitement avancé [50].

Les propriétés physico-chimiques de ce colorant sont représentées dans le **tableau (IV.1)**.

**Tableau (IV.1) : Caractéristiques de Bleu d'Indanthrène RS [51].**

<b>Nom</b>	<b>Bleu d'Indanthrène RS</b>
<b>Formule Chimique</b>	<b><math>C_{28}H_{14}N_2O_4</math></b>
<b>Masse molaire</b>	<b>442,42 g/mol</b>
<b>Température de fusion</b>	<b>470 – 500 °C</b>
<b>Densité</b>	<b>1,6 g/ml</b>
<b>Longueur d'onde maximale</b>	<b>610 nm</b>

### **c) Chlorure de Sodium (NaCl)**

Le procédé d'électrocoagulation nécessite une solution conductive afin d'améliorer la circulation du courant dans la solution à traiter, pour cela on a utilisé le Chlorure de Sodium (NaCl) à différentes concentrations pour mettre en évidence l'effet de la salinité sur la performance de cette technique. Le (NaCl) est souvent le produit le plus utilisé dans les essais de traitement en raison de son efficacité, sa disponibilité et son coût faible.

## **IV – 3 - Méthodologie expérimentale**

### **IV – 3 – 1 – Objectif**

Ce travail a pour objectif d'étudier la dégradation du colorant textile « Bleu d'Indanthrène RS » par le procédé d'électrocoagulation en utilisant des électrodes en Aluminium. Une analyse a été menée afin d'évaluer l'effet de différents paramètres sur l'efficacité du procédé, à savoir :

- ✓ La densité du courant électrique appliquée.
- ✓ La distance inter-électrodes.
- ✓ La conductivité électrique de la solution.

### **IV – 3 – 2 – Mode opératoire**

Dans le cadre de cette étude, la méthodologie suivante a été mise en œuvre :

- Les solutions ont été préparées en dissolvant le colorant « Bleu d'Indanthrène RS » à une concentration fixe de 100 mg/L, et de NaCl à des concentrations variables (1 g/L ; 1,5 g/L et 2 g/L) dans de l'eau déminéralisée. Le volume final de chaque solution préparée est de 5 L.
- Les solutions ainsi obtenues ont été soumises à une agitation mécanique de 500 tr/mn pendant 5 minutes, afin d'assurer une homogénéisation complète du mélange.
- Une fois le courant électrique appliqué, des échantillons ont été prélevés à intervalles réguliers de 5 minutes à l'aide d'une pipette pour analyser l'absorbance au spectrophotomètre.
- Les étapes précédentes ont été répétées en modifiant à chaque fois les paramètres opératoires, notamment la concentration en (NaCl), la densité du courant et la distance inter-électrodes, afin d'évaluer leur influence sur l'efficacité du procédé d'électrocoagulation et le rendement d'élimination du polluant.

## IV – 4 – Les techniques analytiques

Dans ce travail, le suivi de la cinétique d'élimination du polluant a été faite par l'analyse spectrophotométrique. Cette méthode permet de déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution par la mesure de l'absorbance.

### IV – 4 – 1 – La spectrophotométrie UV-Visible

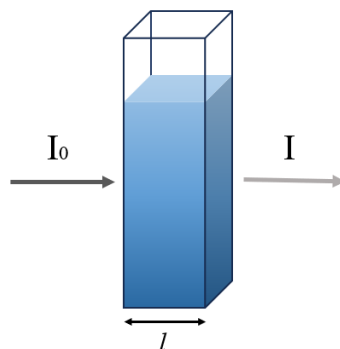
Parmi les différentes techniques instrumentales utilisées pour déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution, les plus courantes reposent sur la mesure de l'absorption d'un rayonnement électromagnétique par une espèce chimique. La spectrophotométrie UV-Visible, est la méthode analytique la plus utilisée dans l'analyse de la qualité de l'eau [51].

Le principe de la spectrophotométrie UV-Visible repose sur l'absorption de la lumière par les substances chimiques présentes dans une solution, c'est-à-dire la quantité de lumière absorbée par la solution colorée. Cette lumière, constituée de photons, interagit avec les molécules qui absorbent des longueurs d'onde précises, en fonction de leur structure électronique. Le spectrophotomètre permet de mesurer cette absorption en fonction de la longueur d'onde. Cette mesure permet ainsi de déterminer la concentration d'une espèce absorbante dans une solution, en utilisant la loi de Beer-Lambert. Le principe du spectrophotomètre (**Figure (IV.2)**) est basé sur la comparaison entre l'intensité lumineuse reçue ( $I_0$ ) avec celle transmise par la solution ( $I$ ) [51].

L'absorbance (Abs) peut alors être exprimée par la relation suivante :

$$Abs = \log(I_0/I)$$

Cette relation montre qu'une solution plus concentrée absorbe plus de lumière, donc une absorbance plus importante.



**Figure (IV.2) :** Principe de fonctionnement du spectrophotomètre.

#### IV – 4 – 2 – La loi de Beer-Lambert

Pour une longueur d'onde maximale ( $\lambda_{\max}$ ) donnée, l'absorbance d'une solution d'une espèce chimique est proportionnelle à sa concentration :

$$A = \varepsilon . l . C$$

D'où

$A$  : L'absorbance (Sans unité).

$\varepsilon$  : Coefficient d'absorption molaire qui dépend de la longueur d'onde maximale (L/mol/cm).

$l$  : Longueur du trajet optique qui correspond à l'épaisseur de la cuve de mesure (cm).

$C$  : Concentration de l'espèce absorbante (mol/L).

#### IV – 5 – Conclusion

Ce chapitre a décrit la méthodologie expérimentale adoptée pour évaluer l'efficacité de l'électrocoagulation dans l'élimination du colorant Bleu d'Indanthrène RS. L'étude a porté sur l'influence de trois paramètres opératoires clés, avec un suivi analytique basé sur la spectrophotométrie. Les résultats obtenus permettront d'identifier les conditions optimales du procédé.

## **Chapitre V : Résultats et discussions**

### **V – 1 – Introduction**

Afin d'étudier la cinétique de dégradation du colorant « Bleu d'Indanthrène RS », des échantillons ont été prélevés à intervalles réguliers de 5 minutes. Chaque échantillon a ensuite été analysé à l'aide d'un spectrophotomètre. Les résultats obtenus, présentés dans les figures suivantes, sont exprimés en termes d'absorbance ou de rendement d'élimination.

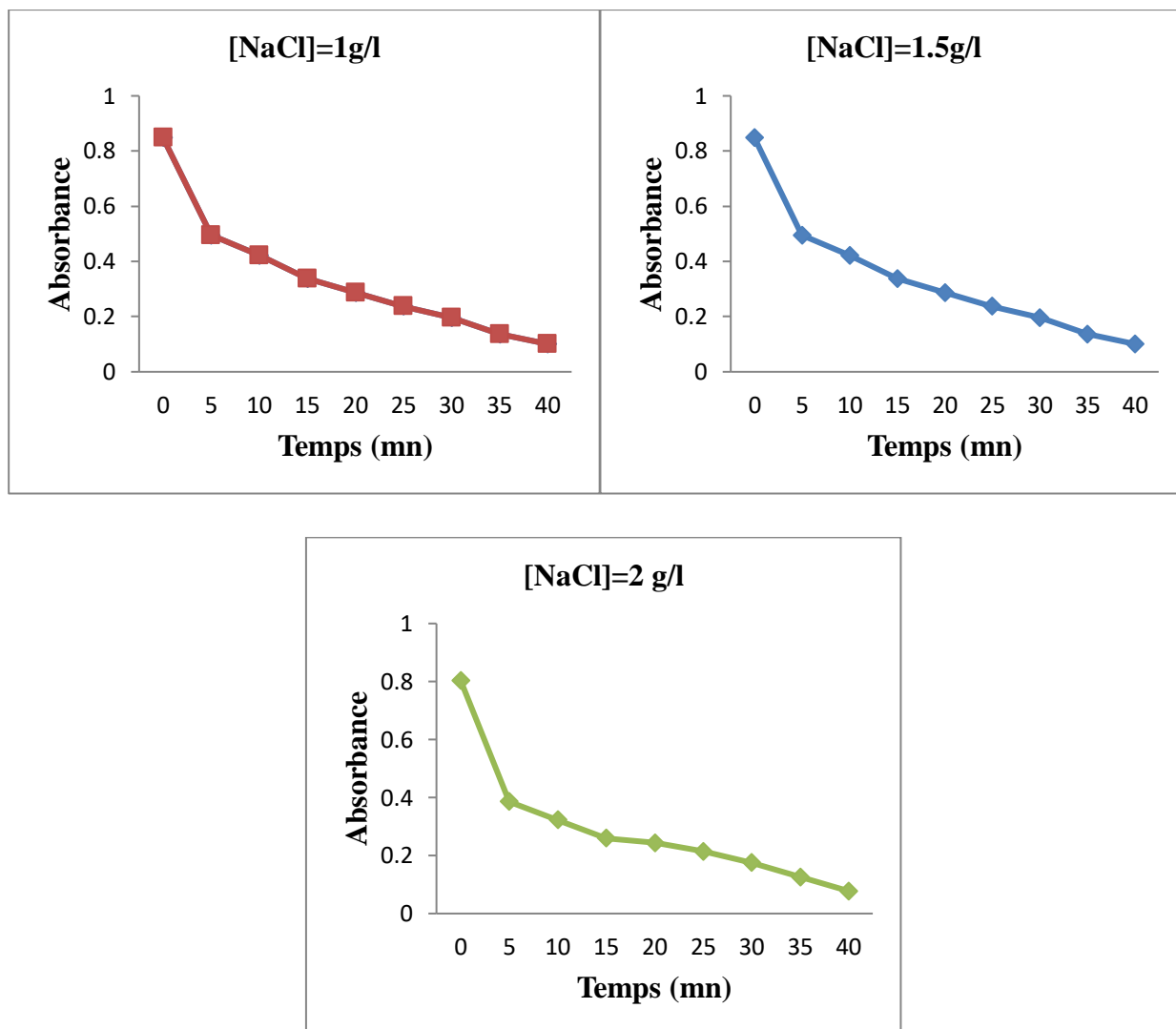
Par ailleurs, une attention particulière a été portée à l'influence de certains paramètres jugés déterminants dans les procédés de traitement électrochimique. L'effet de ces paramètres sur le rendement du procédé EC a été examiné en faisant varier leurs niveaux au sein d'un intervalle défini (**voir Tableau (V.1)**). Pour l'ensemble des essais, la concentration initiale du colorant a été maintenue constante à 100 mg/L. Les rendements obtenus sont présentés sous forme de courbes superposées dans un même graphique, permettant une comparaison directe entre les trois niveaux considérés pour chaque paramètre.

**Tableau (V.1) : Variation des niveaux de chaque paramètre.**

<b>Paramètres étudiés</b>	<b>Niveaux des paramètres</b>
Intensité du courant (A)	1
	2
	3
Distance Inter-électrodes (cm)	1
	2
	3
Concentration de NaCl (g/l)	1
	1.5
	2

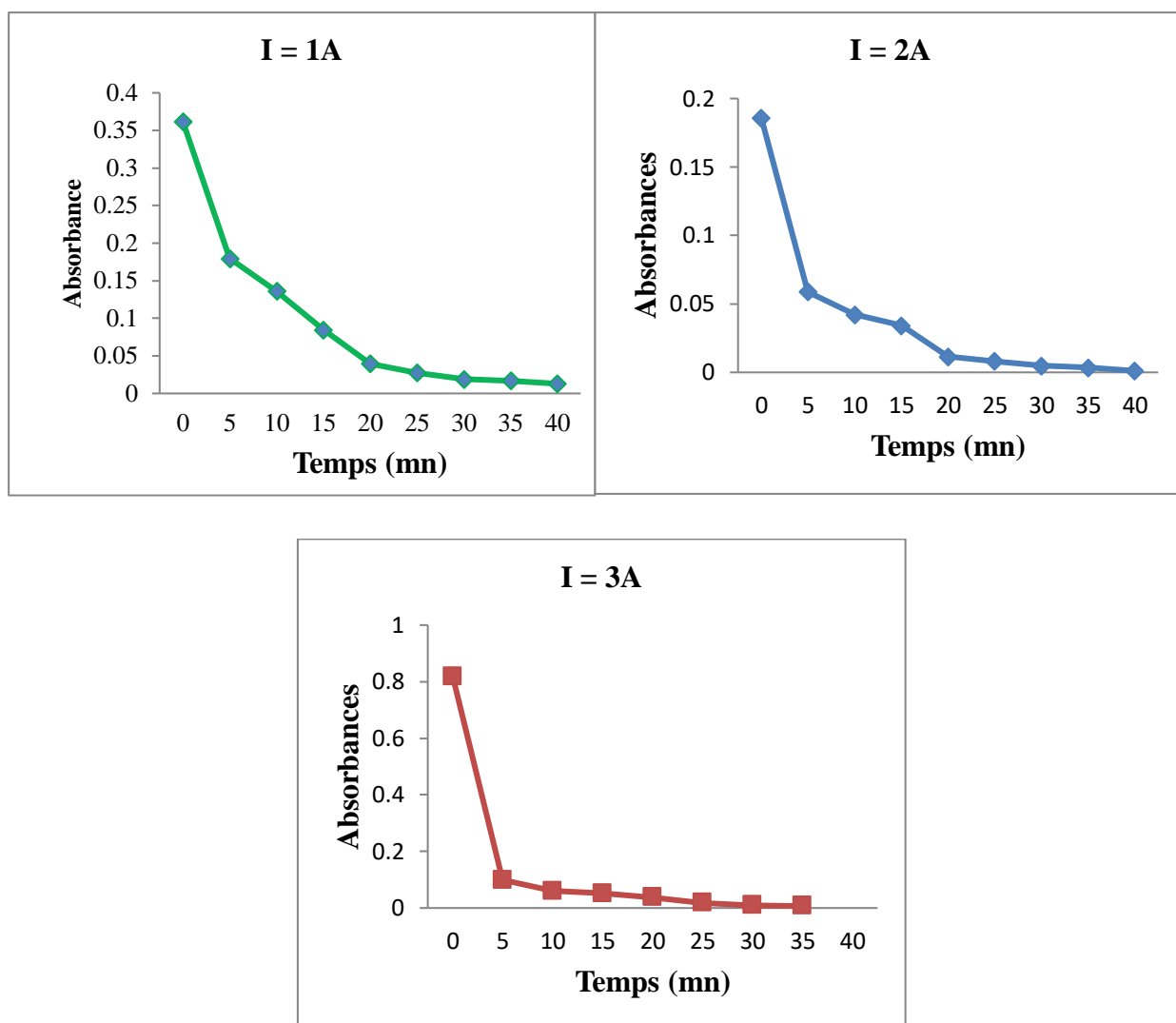
## V – 2 – La cinétique de dégradation

Pour suivre la cinétique de dégradation du colorant « Bleu d'Indanthrène RS » par EC-EF, l'absorbance de ce colorant est suivie au cours du temps de traitement et les résultats obtenus sont illustrés ci-après.



**Figure (V.1) :** Variation des Absorbances en fonction du temps pour les différentes concentrations en NaCl pour  $d=3\text{ cm}$ ,  $I=3\text{ A}$



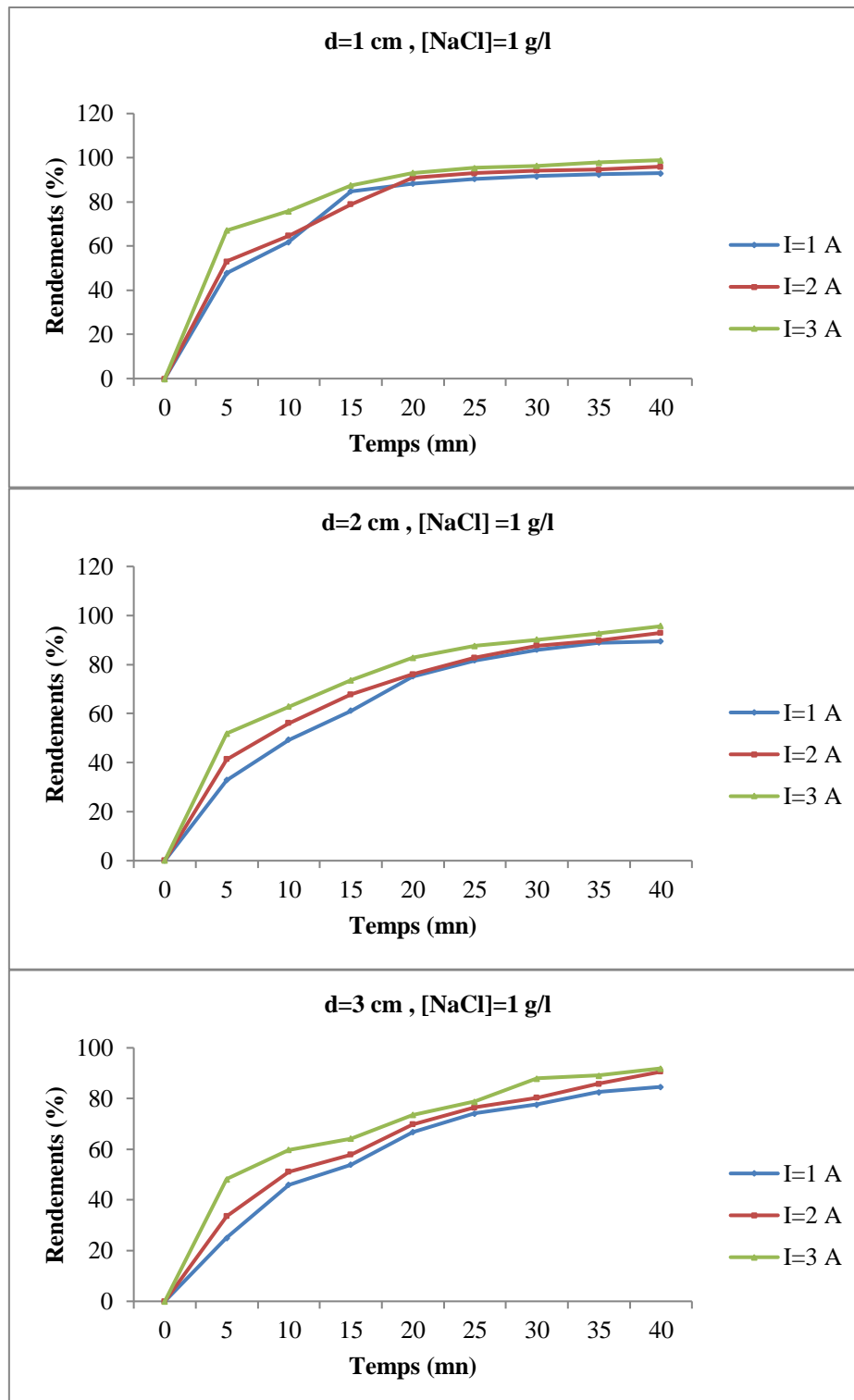


**Figure (V.2) :** Variation des Absorbances en fonction du temps pour les différentes intensités du courant pour  $[NaCl] = 1.5 \text{ g/l}$ ,  $d = 1 \text{ cm}$ .

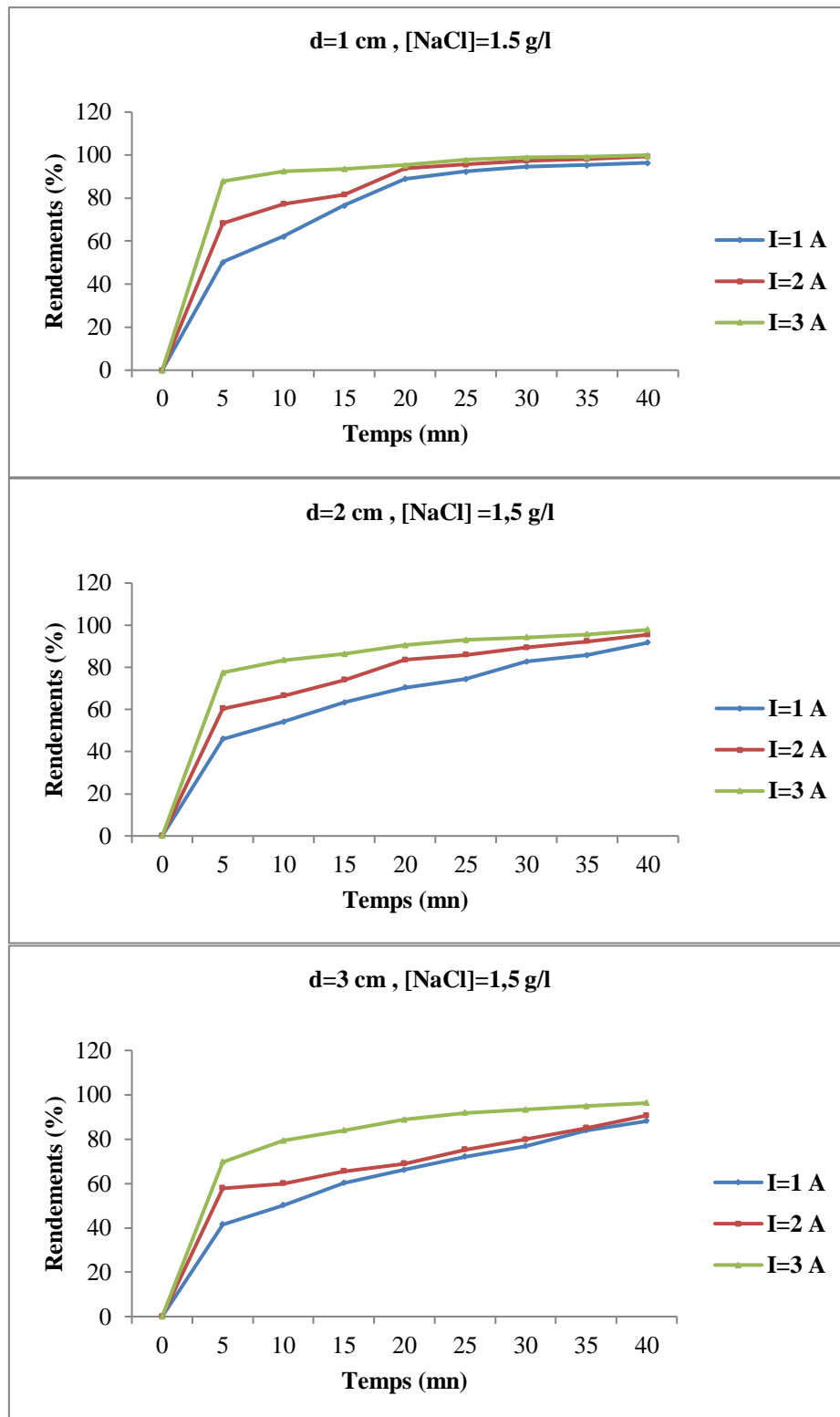
Les **figures (V.1)** et **(V.2)** illustrent l'évolution de l'absorbance du colorant au cours du temps. L'analyse de ces courbes révèle que la dégradation du « Bleu d'Indanthrène RS » suit une cinétique de type exponentiel décroissant.

L'allure des graphes met en évidence deux phases distinctes : une première phase marquée par une forte pente durant les cinq premières minutes, traduisant une dégradation rapide du colorant, suivie d'une seconde phase caractérisée par une pente plus faible, indiquant un ralentissement progressif de la vitesse de dégradation.

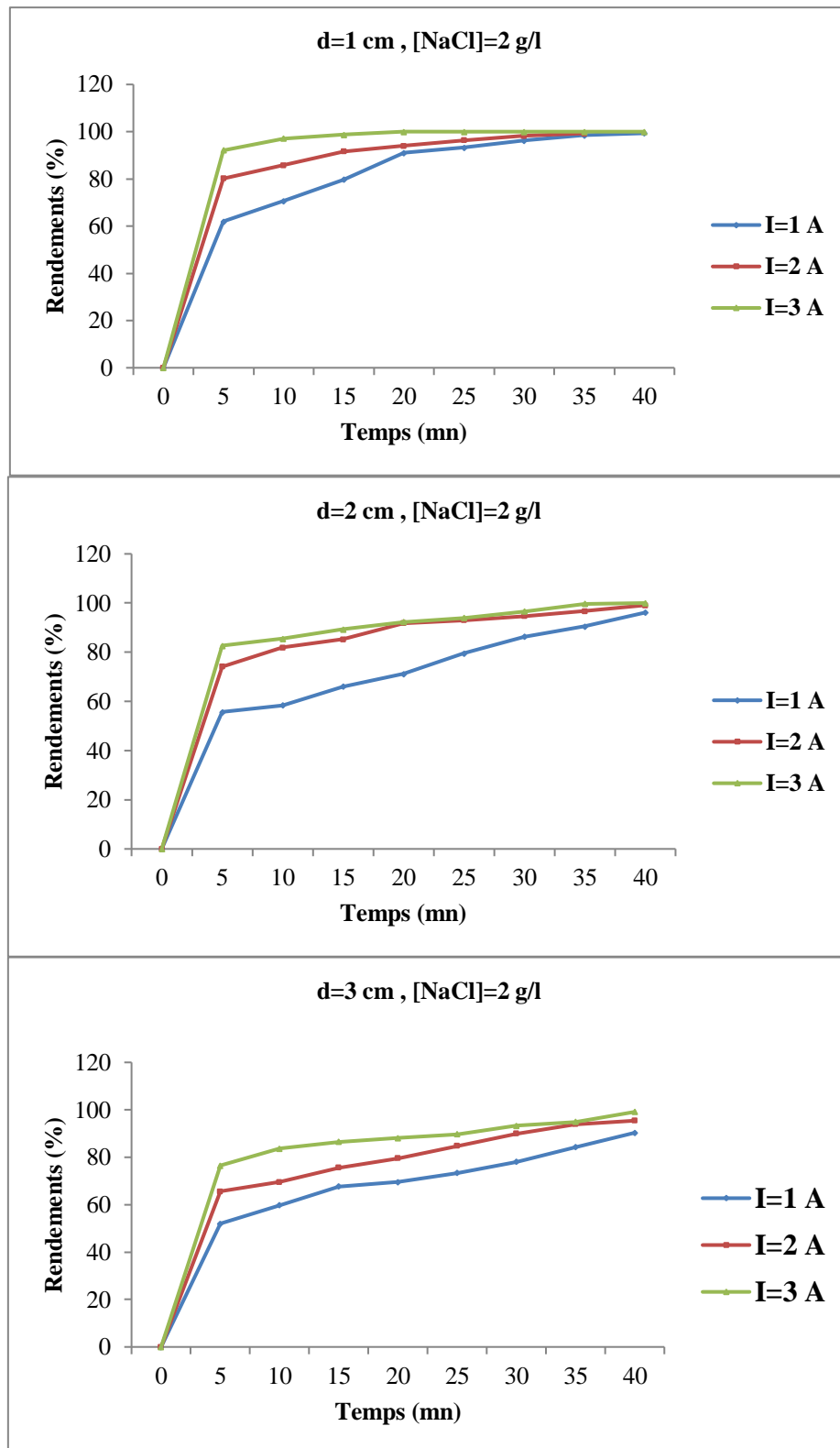
### V – 3 – Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement



**Figure (V.3) :** Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement pour  $[NaCl] = 1 \text{ g/l}$  et  $d = (1, 2, 3 \text{ cm})$



**Figure (V.4) :** Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement pour  $[NaCl] = 1.5 \text{ g/l}$  et  $d = (1, 2, 3 \text{ cm})$



**Figure (V.5) :** Effet de la densité du courant sur l'efficacité de traitement pour  $[NaCl] = 2 \text{ g/l}$  et  $d = (1,2,3 \text{ cm})$

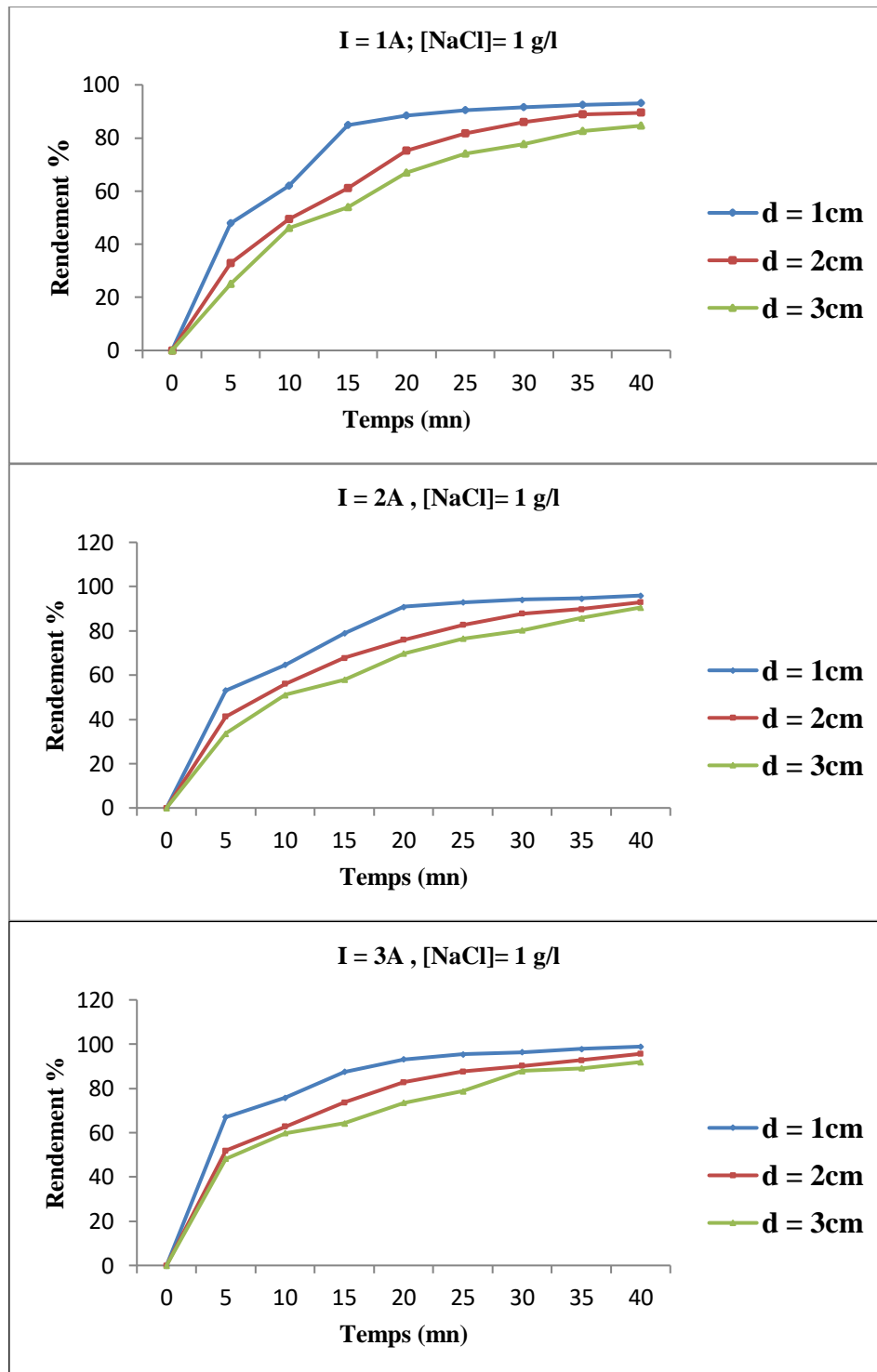
Les **figures (V.3), (V.4) et (V.5)** illustrent l'efficacité de l'élimination de la couleur en fonction de la densité du courant électrique appliqué. L'analyse des courbes révèle une tendance nette : l'efficacité du procédé augmente proportionnellement avec la densité du courant, indépendamment de la distance inter-électrodes ou de la concentration en NaCl.

La densité de courant apparaît ainsi comme un paramètre déterminant dans les procédés d'électrocoagulation-électroflottation [52] [53]. En effet, une augmentation de cette densité réduit le temps de traitement grâce à la dissolution accrue des électrodes, favorisant ainsi la déstabilisation des particules polluantes. De plus, elle intensifie la production de bulles d'hydrogène tout en réduisant leur taille, ce qui améliore l'efficacité de la séparation par flottation [54]. Ce phénomène contribue également à une meilleure collecte des particules floculées durant l'électroflottation [55].

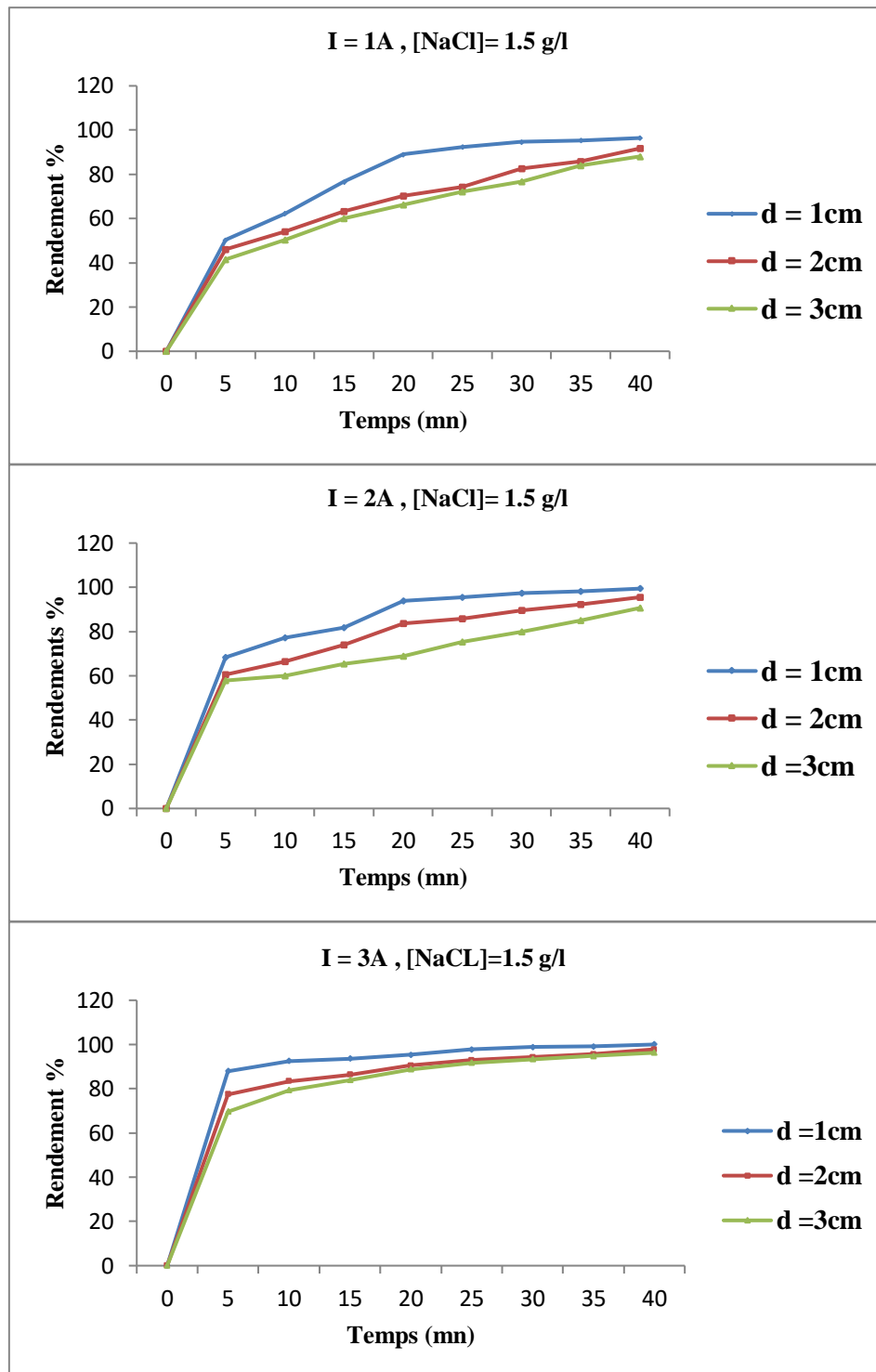
Du point de vue de la consommation, notamment énergétique et matérielle (électrodes), les conditions optimales semblent correspondre à une faible intensité de courant ( $I = 1\text{ A}$ ) associée à un temps d'électrolyse prolongé ( $T = 40\text{ min}$ ).

Toutefois, la densité de courant influençant directement la consommation énergétique et le coût global du traitement, il est essentiel d'en déterminer la valeur optimale pour chaque application spécifique [56]. Dans ce cadre, une intensité de  $2\text{ A}$ , a été identifiée comme optimale.

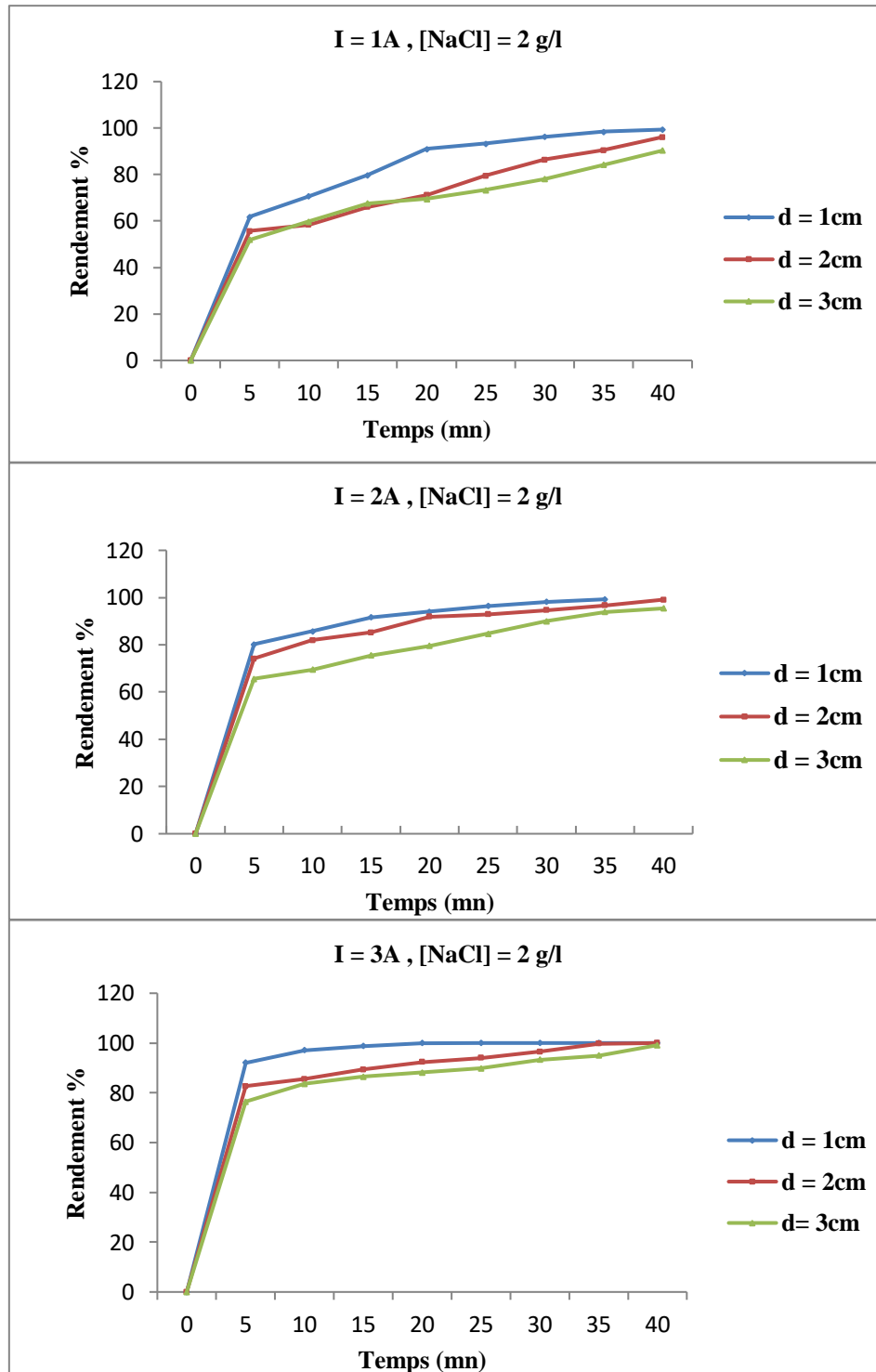
# V – 4 – Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement



**Figure (V.6) :** Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement pour  $[NaCl] = 1 \text{ g/l}$  et  $I = (1, 2, 3 \text{ A})$



**Figure (V.7) :** Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement pour  $[NaCl] = 1.5 \text{ g/l}$  et  $I = (1, 2, 3 \text{ A})$



**Figure (V.8) :** Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement pour  $[NaCl] = 2 \text{ g/l}$  et  $I = (1, 2, 3 \text{ A})$



Pour évaluer l'impact de la distance inter-électrodes sur l'efficacité du traitement, celle-ci a été modifiée entre 1 cm et 3 cm. L'analyse des courbes révèle que plus la distance entre les électrodes augmente, plus le temps requis pour une dégradation efficace du polluant s'allonge.

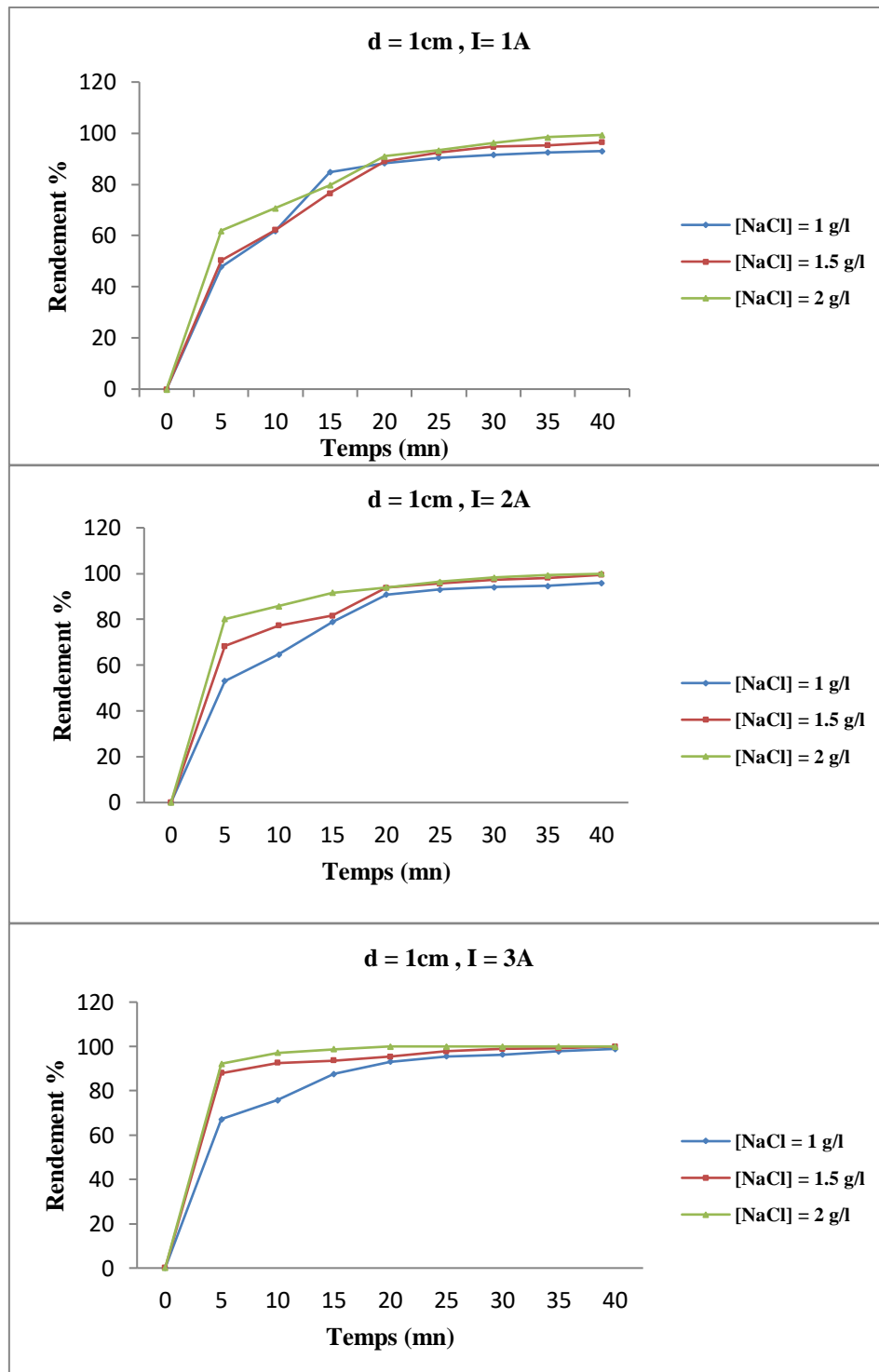
La **figure (V.6)**, établie à une concentration en NaCl constante (1g/l), met en évidence une relation inverse entre la distance inter-électrodes et le rendement du procédé : une diminution de la distance entraîne une amélioration significative de l'efficacité, quel que soit le niveau d'intensité du courant appliqué.

Cette tendance est également confirmée dans la **figure (V.7)**, réalisée à une concentration en NaCl de 1.5 g/l, où les observations concordent avec celles précédemment mentionnées.

La **figure (V.8)**, quant à elle, illustre clairement que l'élimination du « Bleu d'Indanthrène RS » s'améliore avec la réduction de la distance inter-électrodes, validant ainsi l'hypothèse d'une proportionnalité inverse entre cette distance et le rendement du traitement.

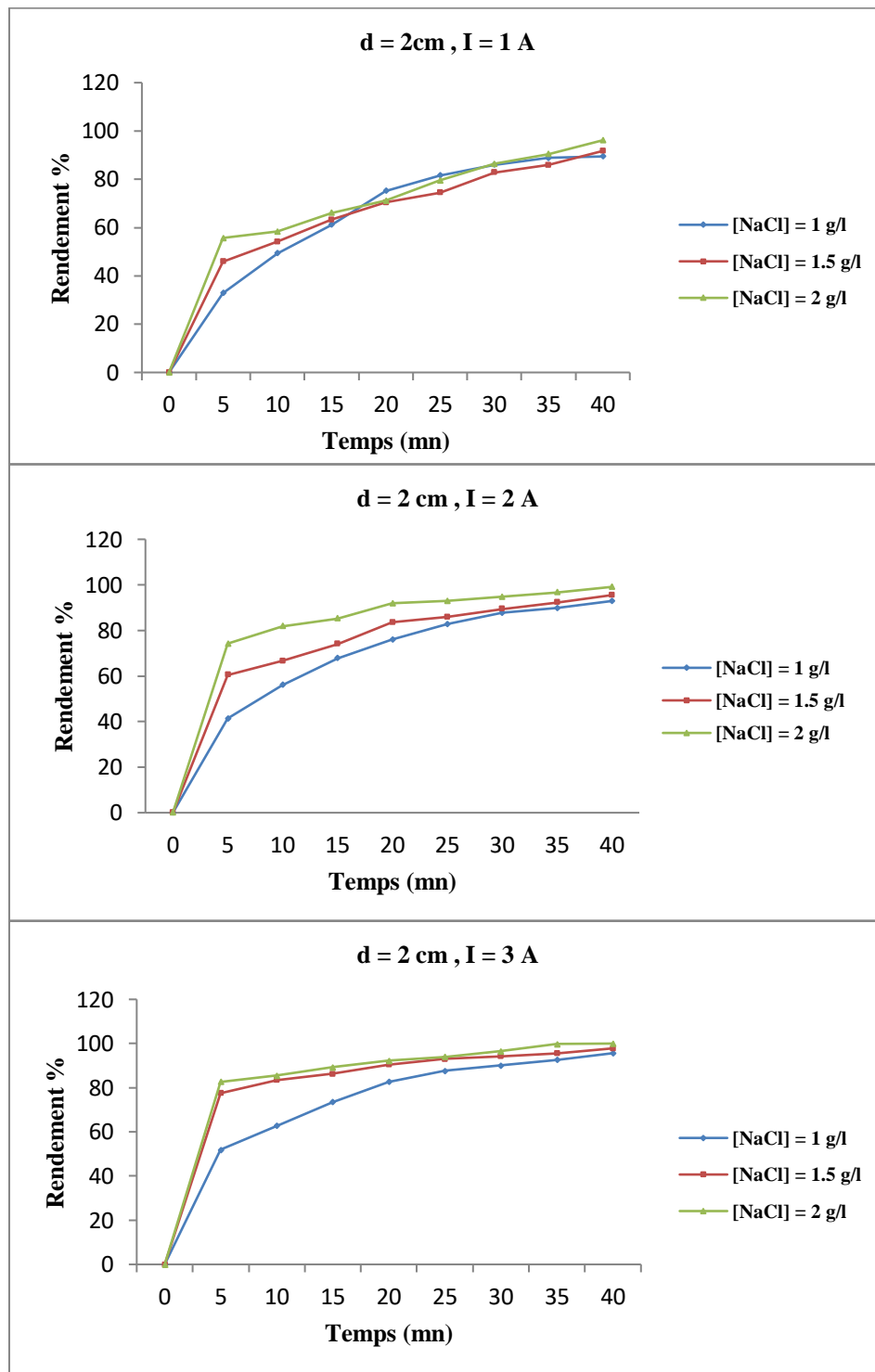
Ce comportement pourrait s'expliquer par une diminution des interactions entre les ions et les polymères hydroxydes à mesure que la distance inter-électrodes augmente [57]. Ainsi, une distance de 1 cm entre l'anode et la cathode s'avère optimale dans notre configuration expérimentale, une valeur également recommandée par plusieurs études antérieures [58] [59].

## V – 5 – Effet de la concentration en électrolyte (NaCl) sur l'efficacité de traitement

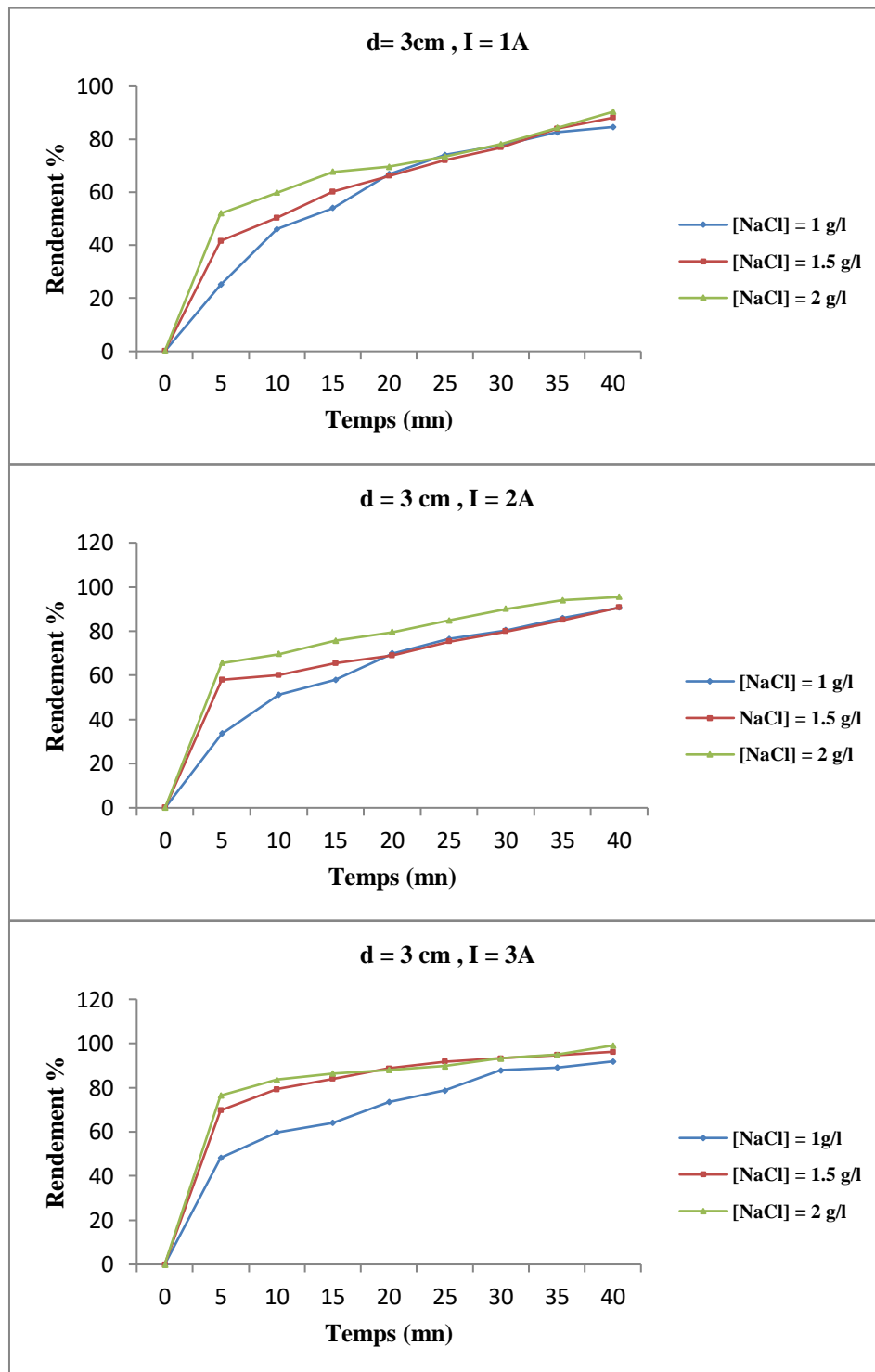


**Figure (V.9) :** Effet de la concentration en NaCl sur l'efficacité de traitement pour

$d = 1 \text{ cm}$  et  $I = (1, 2, 3 \text{ A})$



**Figure (V.10) :** Effet de la concentration en NaCl sur l'efficacité de traitement pour  $d = 2 \text{ cm}$  et  $I = (1, 2, 3 \text{ A})$



**Figure (V.11) :** Effet de la concentration en NaCl sur l'efficacité de traitement pour  $d = 3 \text{ cm}$  et  $I = (1, 2, 3 \text{ A})$

La conductivité électrique de la solution constitue un paramètre essentiel dans le processus d'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF), car elle facilite le passage du courant électrique et favorise le transfert des ions en milieu aqueux. Elle influence directement la densité du courant, la tension appliquée aux bornes des électrodes ainsi que la consommation énergétique du système [60].

Ainsi, pour optimiser la conductivité d'un effluent, l'ajout d'un électrolyte tel que le chlorure de sodium (NaCl) s'avère indispensable.

Les **figures (V.9), (V.10) et (V.11)** illustrent l'évolution du taux d'élimination du colorant « Bleu d'Indanthrène RS » en fonction de la concentration en électrolyte (NaCl). Il ressort de ces courbes que, quelles que soient les conditions opératoires, notamment la distance inter-électrodes ou la densité du courant appliqué, l'augmentation de la concentration en NaCl améliore significativement les performances du procédé d'électrocoagulation. Ces résultats expérimentaux obtenus sont en parfaite cohérence avec les données rapportées dans la littérature scientifique [45].

Dans cette étude, la valeur optimale de la concentration en NaCl retenue est de 2 g/L, permettant d'atteindre un rendement de traitement élevé tout en maîtrisant les coûts et la consommation énergétique.

## **V – 6 – Conclusion**

L'EC est une technique attrayante et convenable pour le traitement des effluents textiles. Ces essais expérimentaux, ont permis de démontrer l'efficacité de ce procédé dans l'élimination d'un colorant textile et l'étude de l'effet des paramètres opératoires a permis d'obtenir les conditions optimales pour une meilleure efficacité.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les polluants liquides issus des activités industrielles présentent des caractéristiques physico-chimiques complexes qui rendent leur traitement particulièrement difficile. Ils sont souvent constitués de mélanges comprenant de nombreuses substances résistantes aux traitements classiques, ce qui impose le recours à des technologies de traitement avancées, comme l'électrocoagulation, capables de répondre efficacement à la nature spécifique de chaque effluent industriel.

Dans cette étude, des essais expérimentaux ont été réalisés afin d'évaluer l'efficacité du procédé d'électrocoagulation pour la dégradation d'un colorant textile « Bleu d'Indanthrène RS », en utilisant des électrodes en Aluminium. Le suivi de la cinétique de décoloration a été effectué par analyse spectrophotométrique, à travers la mesure de l'absorbance. Les résultats obtenus ont montré des rendements d'élimination du colorant élevés, confirmant l'efficacité du procédé.

L'influence de trois paramètres opératoires a été également examinée, permettant d'obtenir les résultats suivants :

La densité du courant s'est révélée déterminante : plus elle augmente, plus le rendement de décoloration s'améliore, en raison d'une meilleure dissolution des électrodes et d'une production accrue de bulles d'hydrogène. Une intensité de 2A a permis d'atteindre un bon compromis entre efficacité et consommation énergétique.

Par ailleurs, la réduction de la distance inter-électrodes à 1 cm a significativement renforcé l'efficacité du traitement, en facilitant les interactions électrochimiques.

Enfin, l'ajout de chlorure de sodium a permis d'augmenter la conductivité de la solution, ce qui a amélioré le passage du courant et, par conséquent, les performances du procédé. Une concentration optimale de 2 g/L a été identifiée, permettant d'obtenir un bon rendement tout en maîtrisant les coûts énergétiques.

Ces résultats sont en accord avec les données rapportées dans la littérature scientifique, confirmant ainsi la fiabilité du procédé d'électrocoagulation dans le traitement des polluants industriels. A titre de perspectives, d'autres travaux peuvent être envisagés, notamment ;

l'optimisation d'autres paramètres opératoires (comme le pH, le type de l'électrolyte...), la comparaison avec d'autres types d'électrodes (Fer, Zinc...), le couplage avec d'autres procédés, l'application en d'autres types de polluants industriels etc...



## **Références Bibliographiques**

- [1] B. Khalila, CONTRIBUTION A L'ETUDE DU ROLE DE LA VEGETATION DANS L'EPURATION DES EAUX USEES DANS LES REGIONS ARIDES, 2010.
- [2] C. E. Claire Eme, Composition des eaux usées domestiques par source d'émission à l'échelle de l'habitation, Office National de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 2015.
- [3] K. BOUGADA, Exploration des différentes étapes de l'épuration biologique des eaux usées et mesure de la charge organique ; Cas station de Oued Athmania, 2020.
- [4] R. H. Yasmine, Analyse physique-chimique des eaux destinées à la consommation humaine - Analyse des paramètres organoleptiques, 2023-2024.
- [5] S. Taous, CONTRIBUTION AU CHOIX D'UN PROCEDE DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE RAFFINERIES DE SUCRE EN VUE DE LEUR REUTILISATION, 2020.
- [6] M. Saïd, ÉLIMINATION SIMULTANÉE DE LA POLLUTION AZOTÉE ET PHOSPHATÉE DES EAUX USÉES TRAITÉES, PAR DES PROCÉDÉS MIXTES. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou, 2012.
- [7] Gharbi, Etude physico-chimique par boue activée et par électrocoagulation - Application aux eaux usées de Guelma, 2019.
- [8] M. Bali, Traitement des eaux usées, vol. 1, 2024.
- [9] B. BENKADDOUR, Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Cheliff (Algérie), 2018.
- [10] B. Naceureddine, Etude et suivi de procédé d'épuration des eaux usées sous climat aride (simulation par l'application des méthodes d'intelligence artificielle) cas de la station d'épuration de Touggourt, 2020.

- [11] «Analyses Physico-chimiques des eaux,» LABORATOIRE DÉPARTEMENTAL D'ANALYSES. [En ligne].
- [12] M. v. Sperling, Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal, vol. 1, 2007.
- [13] T. Mouna, Etude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration, 2015.
- [14] a. Gaëlle Deronzier, Document Technique.
- [15] «Cycle de l'azote,» [En ligne]. Available: [http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Cycle\\_de\\_l'azote\\_\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Cycle_de_l'azote_(HU)).
- [16] M. K. FIDELE, Design of experimental wastewater treatment plant with macrophytes constructed wetlands, 2020.
- [17] C. J. e. R. M. Agathe Euzen, L'eau à découvert, 2015, pp. 170-171.
- [18] d. l. e. d. t. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, «Fiche outil - Caractéristiques des eaux utilisées en industrie agroalimentaire,» 2014.
- [19] O. Cristian, CHARACTERISTICS OF THE UNTREATED WASTEWATER PRODUCED BY FOOD INDUSTRY - University of Oradea-Faculty of Environmental Protection, 2010.
- [20] «La pétrochimie : une industrie incontournable,» [En ligne]. Available: <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/petrochimie-industrie-incontournable>.
- [21] «Polluants dans les eaux usées des industries pétrochimiques et des raffineries de pétrole,» [En ligne]. Available: <https://sigmadafclarifiers.com/fr/sistemas-daf-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-de-refinerias-de-petroleo/>.
- [22] D. Meriem, Application d'un procédé photocatalytique à l'élimination d'un composé organique issu de l'industrie pharmaceutique, 2024.
- [23] «L'Industrie textile responsable de 20 % de la pollution de l'eau mondiale,» 2022. [En ligne]. Available: <https://dnbam.com/fr/finance-blog/lindustrie-textile-responsable-de-20-de-la-pollution-de-leau-mondiale>.

- [24] S. G. Mohamed BAGANE, «Elimination d'un colorant des effluents de l'industrie textile par adsorption,» 2000.
- [25] A. M. ,. E. K. L. Amina ABOUZAIID, «Traitement d'effluents de l'industrie textile par combinaison de procédés de coagulation-floculation-nanofiltration,» 2005.
- [26] 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, 2012.
- [27] e. a. Nabiev, «Purification des eaux usées de l'industrie textile polluée par des colorants organiques synthétiques à l'aide des déchets industriels et des mélanges matériaux locaux,» 2015.
- [28] e. a. M. Tariq, «Characteristics of industrial effluents and their possible impacts on quality of underground water,» 2006.
- [29] e. a. Hayet Djelal, «LES EFFLUENTS INDUSTRIELS ET LEUR TRAITEMENT,» 2008.
- [30] e. a. Solène MOULIN, Traitement des eaux usées, 2013.
- [31] C. Rachid, TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES EAUX USEES, 2021.
- [32] G. TAKTAK, ÉTUDE DE DIFFÉRENTES APPROCHES VISANT LA RÉDUCTION DES POLLUANTS DE REJETS D'EAUX USÉES D'UNE INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE, 2016.
- [33] [En ligne]. Available: <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/7563/flottation>.
- [34] [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Etape-de-transfert-de-masse-pour-ladsorption-sur-charbon-actif-dapres-Knappe-et\\_fig36\\_43220289](https://www.researchgate.net/figure/Etape-de-transfert-de-masse-pour-ladsorption-sur-charbon-actif-dapres-Knappe-et_fig36_43220289).
- [35] «Coagulation - Flocculation,» [En ligne]. Available: <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/processus-elementaires-du-genie-physico-chimique-en-traitement-de-l-eau/coagulation-floculation/generalites>.
- [36] A. Sarah, AMELIORATION DE LA QUALITE MICROBIOLOGIQUE DES EAUX EPUREES PAR BOUES ACTIVEES DE LA STATION D'EPURATION HAOUD

BERKAOUI PAR L'UTILISATION D'UN FILTRE A SABLE LOCAL, 2011.

- [37] C. Derradji, Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique, 2012.
- [38] C. J. Jean Marc BERLAND, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, 2002.
- [39] e. a. François Zaviska, Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels: Application à la dégradation des polluants réfractaires, vol. 22, 2009.
- [40] C.-B. Souâd, Photocatalyse Solaire : Application du rayonnement solaire au traitement de l'eau, 2011.
- [41] F. e. R. M. PERSIN, Le traitement électrochimique des eaux et des effluents, vol. 42, 1989, pp. 45-66.
- [42] [En ligne]. Available: <https://www.schoolmouv.fr/cours/electrolyse-et-generateurs-electrochimiques/fiche-de-cours>.
- [43] S. A. A. Ahmed Samir Naje, Electrocoagulation Technology in Wastewater Treatment: A Review of Methods and Applications, vol. 3, 2013.
- [44] [En ligne]. Available: <https://www.sciencehistory.org/>.
- [45] O. D. P. D. R. & B. G. Dia, Utilisation des procédés électrochimiques et leurs combinaisons avec les procédés biologiques pour le traitement des lixiviats de sites d'enfouissement sanitaires - Revue de littérature, vol. 29, 2016, pp. 63-89.
- [46] [En ligne]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/485>.
- [47] e. a. Sriram Boinpally, A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment, vol. 4, 2023, pp. 26-36.
- [48] E. T. A.-H. a. A. Y. Bagastyo, Electrocoagulation for drinking water treatment, 2021.
- [49] N. A. Shahad .F, Factors Affecting Electrocoagulation Process for Different Water Types, vol. 20, 2024, pp. 17-32.

- [50] [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bleu\\_d%27indanthr%C3%A8ne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bleu_d%27indanthr%C3%A8ne).
- [51] M. Sylia, Contribution à l'élimination d'un colorant textile par le procédé d'électrocoagulation avec un réacteur cylindrique et des électrodes en mouvement, 2019.
- [52] L. B. ALAIN. BOTTA, Pollution de l'eau et santé humaine. Laboratoire de biogénotoxicologie et mutagenèse environnementale. Université Euro-Méditerranée TEHYS., 2001.
- [53] B. C. AMIROUCHE .M, Étude expérimentale pour l'épuration des eaux usées par électroflottation, mémoire de fin d'études, université de Bejaia., 2007.
- [54] B. G., Flottation : machines et circuits, Exploitation. Technique de l'ingénieur A 5360,, 1981, pp. 1-16.
- [55] E. K. BAYRAMOGLU .M, Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: evaluation, Chem. Eng .J. 128, 2007, pp. 155-161.
- [56] BELEGALD.J., Les colorants industriels, Encyclopédie médicochirurgicale pathologie du travail, intoxications maladies par agents physiques 16082 à paris., 1987.
- [57] M. & N. P. BECHAC .J.P BOUTIN P, Traitement des eaux usées, 1984, pp. 6-7.
- [58] G. e. R. BECK .E.C, Électrocoagulation clarifies food wastewater, Food. Techno, 28, (2), 1974, pp. 18-22.
- [59] B. Akila., Étude de la dégradation photocatalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif. Thèse Doctorat, Université de Constantine., 2010.
- [60] G. Kahina, Essai d'élimination des pesticides par électro oxydation en utilisant des électrodes en acier inoxydable - Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, 2022.

## Résumé

Ce travail étudie l'application du procédé d'électrocoagulation pour éliminer le colorant « Bleu d'Indanthrène RS », utilisé dans l'industrie textile, en optimisant trois paramètres opératoires : la densité du courant, la distance inter-électrodes et la conductivité de la solution. Le mémoire comprend une partie théorique sur les effluents industriels et les différentes techniques de traitement, et une partie expérimentale portant sur les essais réalisés et l'analyse des résultats. Les résultats obtenus ont montré des rendements de décoloration élevés, confirmant l'efficacité du procédé.

## Mots clés

Electrocoagulation, Bleu d'Indanthrène RS, paramètres opératoires, effluents industriels, décoloration.

## ملخص

تتناول هذه الدراسة تطبيق عملية التخثير الكهربائي لإزالة صبغة أزرق الإندانترين المستخدمة في صناعة النسيج، من خلال تحسين ثلاثة معايير مخبرية: شدة التيار، المسافة بين الأقطاب، وناقلية المحلول. يتضمن هذا العمل جزءاً نظرياً يتحدث حول المياه الصناعية المستعملة وتقنيات المعالجة المختلفة، وجزءاً تجريبياً يتناول التجارب المنجزة وتحليل النتائج. أظهرت النتائج المحصلة نسب إزالة عالية للون، مما يؤكد فعالية هذه التقنية.

## الكلمات المفتاحية

التخثير الكهربائي، أزرق الإندانترين، معايير مخبرية، المياه الصناعية المستعملة، إزالة اللون.

## Abstract

This work investigates the application of the electrocoagulation process to remove the dye "Indanthrene Blue RS", commonly used in the textile industry, by optimizing three operating parameters: current density, inter-electrode distance and solution conductivity. The thesis includes a theoretical part on industrial effluents and various treatment techniques, and an experimental part focused on the tests carried out and the analysis of the results. The results showed high decolorization efficiencies, confirming the effectiveness of the process.

## Keywords

Electrocoagulation, Indanthrene Blue RS, operating parameters, industrial effluents, decolorization.