

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : RESSOURCES HYDRAULIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par: Hadidane Ramzi

et

Boussalem Hocine

Intitulé

**Elimination de la pollution industrielle de textile
par électrocoagulation**

Soutenu devant le jury composé de:

.....

Merzouk Belkacem

.....

Université de M'sila

Université de M'sila

Université de M'sila

Président

Rapporteur

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

*Au terme de cette étude, nous tenons à remercier **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à exprimer à Monsieur le **Professeur MERZOUK Belkacem**, notre directeur de mémoire, notre profonde reconnaissance pour l'encadrement et les conseils qu'il nous a apportés. Il nous a transmis ses connaissances scientifiques et nous a supporté pendant nos travaux en brillant par sa gentillesse, sa générosité et ses encouragements.*

Nous voulons également exprimer toute notre gratitude aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nos vifs remerciements vont également :

A tout le personnel des laboratoires d'hydraulique et de l'université de M'Sila.

A tout le corps enseignant et administratif du Département d'Hydraulique de l'université de M'sila.

*A tout le **personnel** de **TINDAL**, pour leur aide en nous offrant le colorant.*

*Enfin, Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail, en particulier l'ami **BERRABAH Bahaeddine**.*

HADIDANE Ramzi

et

BOUSSALEM Hocine

Dédicace

Nous dédions ce mémoire de fin d'études à nos très chers parents pour leurs sacrifices afin de réussir dans nos études.

A nos Sœurs et Frères

A Toutes nos Familles

A tous les étudiants et étudiantes de notre promotion, que chacun trouve à travers ces lignes nos sincères amitiés.

**HADIDANE Ramzi
et**

BOUSSALEM Hocine

Résumé

L'objectif de ce présent travail est d'évaluer les performances du procédé d'électrocoagulation (EC) en continu pour l'élimination du colorant Rouge Nylosan présent dans les effluents des industries du textile.

L'effet de différents paramètres de fonctionnement susceptibles d'influer le procédé, tels que, la densité de courant, le temps de traitement, le mode de connexion des électrodes (bipolaire BP, monopolaire en parallèle MP-P et monopolaire en série MP-S), le nombre des électrodes, et le rendement faradique a été étudié.

Les résultats trouvés ont montré que l'EC a bien fonctionné pour tous les modes de connexion étudiés, toutefois, la connexion monopolaire parallèle (MP-P) à 2 électrodes et à 4 électrodes est la plus efficace sur tous les plans y compris celui de la consommation énergétique, et le rendement faradique moyen est supérieur à l'unité.

Mots clés : *Electrocoagulation, Electrodes en aluminium, Turbidité, Couleur, Rouge Nylosan, Connexion des électrodes, Rendement faradique.*

Abstract

The objective of this work was to evaluate the performance of the continuous electrocoagulation process (EC) for the elimination of the Nylosan Red dye present in the effluents of the textile industries.

The effect of different operating parameters that could affect the process, such as current density, treatment time, electrode connection mode (bipolar BP, parallel monopolar MP-P and series monopolar MP-S), the number of electrodes, and faradic yield was studied.

The results found showed that EC functioned well for all the connection modes studied, however, the parallel monopolar connection (MP-P) with 2 electrodes and 4 electrodes is the most efficient in all aspects including that of energy consumption, and the average Faradic yield is higher than unity.

Keywords: *Electrocoagulation, Aluminum electrodes, Turbidity, Color, Red Nylosan, Electrode connection, Faradic yield.*

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N° du Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants	13
Tableau I.2	Résumé des applications d'EC	22-28
Tableau II.1	Propriétés du Rouge Nylosan N-2RBL	32
Tableau III.1	Taux d'élimination de la couleur et de la turbidité après 35 min de traitement	42

Liste des figures

Liste des figures

N° de la Figure	Titre	Page
Figure I.1	Exemple de la structure des colorants à mordant	10
Figure I.2	Exemple de la structure des colorants de cuve	10
Figure I.3	Exemple de la structure des colorants azoïques	11
Figure I.4	Exemples de la structure des colorants anthraquinoniques	12
Figure I.5	Structure du colorant phtalocyanine de cuivre	12
Figure I.6	Schéma de principe du procédé de l'électrocoagulation	16
Figure I.7	Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium	18
Figure I.8	Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires	19
Figure I.9	Connexion monopolaire en série d'électrodes	20
Figure I.10	Connexion bipolaire des électrodes	20
Figure II.1	Schéma du dispositif expérimental d'EC-EF en régime continu	30
Figure II.2	Les cinq modes de connexion d'électrodes étudiés	31
Figure II.3	Formule développée du Rouge Nylosan	32
Figure II.4	Spectre d'absorption UV-visible du colorant étudié	33
Figure II.5	Courbe d'étalonnage du colorant au maximum d'absorption	33
Figure II.6	Microprocesseur pH Mètre "Hanna pH 210"	34
Figure II.7	Conductimètre "Hanna, EC214"	35
Figure II.8	Turbidimètre Hanna "HI88703"	36
Figure II.9	Dispositif représentant le spectrophotomètre UV visible utilisé	36
Figure II.10	Composition élémentaire du métal des électrodes utilisées par MEB	38
Figure III.1	Taux d'élimination de la couleur dans les deux compartiments	40
Figure III.2	Taux d'élimination de la turbidité dans les deux compartiments	40
Figure III.3	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur	41
Figure III.4	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité	41
Figure III.5	Evolution de l'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) en fonction du temps	43
Figure III.6	Evolution de la consommation des électrodes (μ_{Al}) en fonction du temps	43
Figure III.7	Evolution de l'énergie par m ³ d'eau traitée (E_{water}) en fonction du temps	44
Figure III.8	Evolution du pH au cours de l'EC	45
Figure III.9	Effet de la connexion électrique sur la tension entre les électrodes	45
Figure III.10	Effet de la connexion électrique sur l'évolution de la température	46
Figure III.11	Evolution du rendement faradique au cours de l'EC (MP - 2 électrodes)	47
Figure III.12	Concentration théorique et expérimentale d'Al au cours de l'EC	48

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.1. Introduction	02
I.2. Pollution des eaux résiduaires	02
I.2.1. Définition	02
I.2.2. Origine et nature des eaux usées	03
I.2.3. Conséquences de la pollution	04
I.2.4. Paramètres d'évaluation de la pollution	05
I.3. Rejets industriels textiles	08
I.3.1. Présentation de l'industrie textile	08
I.3.2. Identification des principaux procédés et rejets associés	08
I.4.3. Classification chimique des colorants	11
I.4.4. La teinture	12
I.4.5. Les fibres textiles	12
I.4.6. Impact des colorants sur l'environnement et la santé	13
I.4.7. Nécessité de traiter les effluents textiles	14
I.4.8. Législation sur l'environnement	14
I.5. Le procédé d'électrocoagulation	15
I.5.1. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation (EC)	15
I.5.2. Principe du procédé	16
I.5.3. Paramètres influençant le procédé d'EC	19
I.5.4. Technologie du procédé d'électrocoagulation	19
I.5.5. Les différents modes de connexions électriques	19
I.5.6. Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation	21
I.5.7. Principales lois d'électrolyse	21
I.5.8. Application du procédé d'électrocoagulation	22
I.6. Conclusion sur la bibliographie	28

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction	29
II.2. Choix du procédé	29
II.3. Méthodologie	30
II.4. Caractéristiques du colorant Rouge Nylosan	32
II.4.1. Spectre d'absorption en <i>UV-visible</i>	32
II.5. Méthodes analytiques	34
II.5.1. Suivi des paramètres en ligne	34
II.5.2. Analyse chimique	35
II.6. L'énergie consommée	37
II.7. Les électrodes utilisées	38

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction	39
III.2. Influence de la densité de courant	39
III.3. Influence du point d'échantillonnage	40
III.4. Effet du mode de connexion des électrodes	41
III.5. Energie consommée	42
III.6. Evolution du pH au cours de l'EC	44
III.7. Evolution de la tension entre les électrodes au cours de l'EC	45
III.8. Evolution de la température au cours de l'EC	46
III.9. Rendement faradique (ϕ_{Al})	46
III.10. Conclusion partielle	48
Conclusion générale	49

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

Les industries du textile rejettent des quantités importantes d'effluents colorés et fortement chargés en DCO (Demande Chimique en Oxygène). L'épuration de ces effluents industriels nécessite un prétraitement avant d'être acheminés vers une station de traitement biologique classique. L'un des phénomènes les plus alarmants est la croissante accumulation de substances récalcitrantes difficilement biodégradables dans les eaux.

Le procédé d'électrocoagulation (EC) est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit d'imposer un courant électrique entre deux électrodes solubles (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, *in-situ*, des ions (Fe_3^+ , Al_3^+) qui réagiront par la suite en solution avec les ions OH^- pour former des hydroxydes métalliques ($\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$). Ces derniers réagissent comme un coagulant permettant la coagulation-floculation des polluants que l'on souhaite éliminer. La production des fines bulles d'air (H_2) de taille bien adaptée (10 - 50 micromètres) par électrolyse de l'eau entraîne dans leur mouvement ascensionnel les flocs ainsi formés. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent. Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de flocs qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration)

L'objectif de notre travail est l'application du procédé d'EC en vue d'élimination d'un colorant textile (Rouge nylosan), en utilisant un réacteur continu et des électrodes en aluminium.

Cette étude est constituée de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre rappelle les différents types de pollution, les procédés de fabrication d'un produit textile, un aperçu sur les colorants textiles et leur impact environnemental, ainsi que les principaux procédés de traitement des rejets de l'industrie textile.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description du matériel et les méthodes utilisés.
- Le troisième chapitre est dédié à la présentation et la discussion des résultats obtenus.

Enfin, la conclusion générale fait une rapide synthèse des principaux résultats et propose des pistes de recherche pour les prochaines années puisque l'ampleur du sujet mérite encore bien d'autres développements.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Tout le monde s'accorde aujourd'hui à dire que notre planète tourne mal. Elle sera confrontée à une hausse drastique des besoins en eau dans un proche avenir. Ceci commence d'ailleurs déjà à se faire sentir dans certaines régions du globe. Or si on en arrive là aujourd'hui, c'est à cause de notre comportement irresponsable vis-à-vis de cette nature que nous n'avons pas respecté à sa juste valeur.

Les effluents industriels sont chargés de matières polluantes de différents types : organiques, minérales, microbiologiques etc., Ceci confère à ces effluents un caractère agressif et nuisible pour le milieu récepteur, pour s'affranchir de la pollution responsable de nombreux dégâts infligés à l'environnement et de la santé publique.

De nombreux procédés sont mis en œuvre. Parmi ceux-ci, les techniques de traitement électrochimiques, telles que l'électrocoagulation et l'électroflottation prennent de plus en plus d'importance. Ces techniques prometteuses ont été étudiées pour le traitement de divers rejets industriels, tels que, les effluents des industries textiles.

I.2. Pollution des eaux résiduaires

I.2.1. Définition

La pollution des eaux correspond est " tout fait" susceptible de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux en modifiant leurs caractéristiques physiques, chimiques ou bactériologiques, qu'ils s'agissent des eaux superficielles, souterraines ou des eaux de mers.

Les eaux usées quelle que soit leur origine, sont généralement chargées en éléments indésirables, qui selon leur quantité et leur composition, représentent un danger réel pour les milieux récepteurs et leurs utilisateurs. L'élimination de ces éléments toxiques exige de concevoir une chaîne de traitement. Toutefois, avant de concevoir tout procédé d'épuration, il est impératif de caractériser l'effluent à traiter, quantitativement et qualitativement.

1.2.2. Origine et nature des eaux usées

1.2.2.1. Origine des eaux usées

Les eaux usées proviennent principalement de quatre sources [1]:

- Les eaux usées domestiques
- Les eaux usées industrielles
- Les eaux de pluie et de ruissellement dans la ville
- Le ruissellement dans les zones agricoles.

a) Eaux usées domestiques

Ces eaux sont constituées par :

- Eaux usées ménagères provenant des usages domestiques : eaux de bain, de lessive.
- Eaux vannes : urines, et matières fécales.

En général, ces eaux sont chargées en matières organiques, graisses et des produits d'entretiens ménagers. Elles présentent une bonne biodégradabilité.

b) Eaux usées industrielles

Ces eaux proviennent des différentes usines de fabrication ou de transformation. La qualité de ces eaux varie suivant le type d'industrie. Elles peuvent être chargées en matières toxiques difficilement biodégradables qui nécessitent un traitement spécifique.

c) Eaux de ruissellement

Ce sont des eaux de pluies et de lavage des chaussées. Ces eaux sont caractérisées par la présence des matières en suspension en grande majorité, ainsi que des hydrocarbures provenant de la circulation automobile.

d) Eaux de caractéristiques mixtes

Ces eaux issues d'un mélange entre les deux sources d'eaux usées, industrielles et urbaines. Elles sont parfois très chargées, ce qui rend leur composition variable.

e) Eaux usées agricoles

Ce sont des eaux de drainage et des rejets de fermes. Elles se caractérisent par la présence de fortes concentrations de pesticides et d'engrais. Elles ont une valeur fertilisante très importante.

1.2.2.2. Les types de pollutions des eaux

La pollution des eaux usées se manifeste sous forme minérale organique et microbiologique.

a) Pollution minérale

Elle est constituée essentiellement des métaux lourds en provenance des industries métallurgiques, de traitement de minerais. On peut citer quelques-uns, comme le plomb, le cuivre, le fer, le zinc, et le mercure.

Il y'a aussi le cas de certains sels à forte concentration. Ces éléments sont non biodégradables et de ce fait un traitement tertiaire devient plus que nécessaire.

b) Pollution organique

La pollution organique des eaux usées urbaines se compose principalement de protéides, de glucides et de lipides ainsi que des détergents utilisés par les ménages. Il est à noter l'existence d'autres substances organiques utilisées ou fabriquées industriellement, c'est le cas des phénols, des aldéhydes, et des composés azotés.

c) Pollution microbiologique

Le rejet urbain en général présente des conditions très favorables à la prolifération de certains germes pathogènes et d'organismes vivants. On peut citer les virus, les bactéries, les protozoaires, les vers et les microchampignons. Ces différents éléments garantissent une masse permanente en germes utiles à l'épuration par biodégradation.

1.2.3. Conséquences de la pollution

Les conséquences de la pollution des eaux de surface peuvent être classées en cinq principaux groupes, à savoir :

1.2.3.1. Conséquences sanitaires

Les conséquences sanitaires sont donc celles à prendre en compte en priorité. Elles peuvent être liées à l'ingestion d'eau, de poissons, mais aussi au simple contact avec le milieu aquatique (cas de nombreux parasites). La conséquence sanitaire d'une pollution est variable dans le temps en fonction de l'usage, elle est immédiate si on utilise cette eau pour l'alimentation en eau potable [2].

1.2.3.2. Conséquences écologiques

Les conséquences écologiques se mesurent en comparant l'état du milieu pollué par rapport à ce qu'il aurait été sans pollution. Elles sont à considérer au travers l'affectation de la biodiversité et la productivité d'un milieu aquatique :

- Réduction des potentialités d'exploitation du milieu (pêche, aquaculture, tourisme, promenade...) à court et à long terme ;
- Perturbation du fonctionnement trophique ;
- Risque accru d'eutrophisation conduisant à un déséquilibre écologique qui affecte la diversité taxonomique (dégradation du milieu biologique).

1.2.3.3. Conséquences agricoles

L'eau est, dans certaines régions, largement utilisée pour l'arrosage ou l'irrigation, souvent sous forme brute (non traitée).

La texture du sol (complexe argilo humique), sa flore bactérienne, les cultures et le bétail, sont sensibles à la qualité de l'eau.

De même, les boues issues du traitement des eaux usées pourront, si elles contiennent des produits toxiques (métaux lourds) être à l'origine de la pollution des sols [2].

1.2.3.4. Conséquences industrielles

L'industrie est un grand consommateur d'eau : il faut par exemple **1m³** d'eau pour produire **1kg** d'aluminium.

La qualité requise pour les utilisations industrielles est souvent élevée, tant sur le plan chimique (minéralisation, corrosion, entartrage), que biologique (problème de bio-fouling, c'est-à-dire d'encrassement des canalisations par des organismes).

Le développement industriel peut donc être stoppé par la pollution (c'est une des raisons pour laquelle la "*préoccupation pollution*" est apparue d'abord dans les pays industrialisés) [2].

1.2.3.5. Conséquences esthétiques

Cette catégorie de conséquence, pour être la plus subjective, n'en est pas moins importante. Il s'agit de pollution n'ayant pas de conséquences sanitaires ou écologiques importantes, mais perturbant l'image d'un milieu (par exemple : des bouteilles en plastiques ou du goudron rejeté sur une plage). Nous pouvons inclure dans cette catégorie, les problèmes de goût de l'eau (le chlore en AEP). Les flottants et débris solides divers, qui occasionnent des nuisances esthétiques, dans la plupart des cas dangereux pour le milieu (carcasses de véhicules abritant des populations animales qui sont beaucoup plus riches que le milieu environnant).

Les conséquences esthétiques sont, par définition, les plus perceptibles, et c'est donc celles dont les riverains et le grand public auront, en premier, conscience [2].

1.2.4. Paramètres d'évaluation de la pollution

Les déversements polluants modifient profondément les composantes physico-chimiques, organoleptiques et biologiques des milieux aquatiques récepteurs, ainsi que la biocénose aquatique.

Le problème se posera dès qu'un rejet aura un effet sur la qualité de l'eau et le milieu récepteur ; si cet effet a des conséquences négatives, il s'agira d'une pollution [3].

1.2.4.1. Paramètres organoleptiques

- **La couleur**

La coloration d'une eau peut être soit d'origine naturelle, éléments métalliques, microorganismes liés à un épisode d'eutrophisation...etc., soit associée à la pollution de composés organiques colorés. Elle est donc très souvent synonyme de la présence des composés dissous [4].

- **L'Odeur la saveur**

Les eaux résiduaires industrielles se caractérisent par une odeur de moisi. Toute odeur est signe de pollution qui est due à la présence de matières organiques en décomposition [4]. Elles proviennent des composés azotés ou soufrés : (amines, ammoniacale...). Mais la molécule qui pose le plus de problème est l'hydrogène sulfuré (H_2S), qui possède une odeur caractéristique d'œuf pourri. La saveur de l'eau est due à de nombreuses molécules (fer, manganèse, le chlore actif...) et ne révèle pas si l'eau est polluée ou non. Des eaux peuvent avoir une saveur salée.

1.2.4.2. Paramètres physicochimiques

- **La température**

Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier l' O_2) dans l'eau ainsi que, la détermination du pH et la vitesse des réactions chimiques. La température agit aussi comme facteur physiologique sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau [4].

- **Le potentiel d'hydrogène (pH)**

Sa valeur caractérise un grand nombre d'équilibre physicochimique. La valeur du pH altère la croissance des microorganismes existant dans l'eau (leur gamme de croissance est comprise entre 5 et 9) [4].

- **La demande chimique en oxygène (DCO)**

C'est la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire qui correspond à la quantité des matières oxydables par oxygène renfermé dans un effluent. Elles représentent la plus part des composés organiques (détergents, matières fécales). Elle est mesurée par la consommation d'oxygène par une solution de dichromate de potassium en milieu sulfurique en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure II (complexant des chlorures), à chaud pendant 2h [5].

- **L'oxygène dissous**

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'environnement aqueux, puisqu'il est le réactif limitant de la principale voie de dégradation de la pollution organique. Le dosage d'oxygène dissous est d'une importance principale dans les études portant sur la qualité des eaux. Les substances biodégradables consomment de l'oxygène, si bien que la détermination de sa teneur constitue une mesure indirecte du degré de pollution.

- **Demande biochimique en oxygène (DBO_5)**

L'oxydation des composés organiques biodégradables par les microorganismes entraîne une consommation d'oxygène ; le milieu exerce donc une certaine demande biochimique d'oxygène. La mesure de cette DBO_5 permet d'évaluer le contenu d'une eau en matières organiques biodégradables et donc, dans une certaine mesure, sa qualité ou son degré de pollution,

représente la quantité d'oxygène consommée dans les conditions de l'essai, c'est-à-dire, après incubation durant 5 jours à 20 °C, et dans l'obscurité par certains microorganismes présents dans l'eau.

- **Les matières en suspension (M.E.S)**

Les matières en suspension sont constituées par les solides en suspension dans l'eau. Ils proviennent des sources naturelles, d'effluents municipaux et industriels du ruissellement des terres agricoles, et des retombées de matières atmosphériques en suspension.

1.2.4.3. Paramètres complémentaires

- **Le phosphore**

Le phosphore se trouve dans l'eau usée sous deux formes :

- Sels minéraux (orthophosphates, polyphosphates) ;
- Composés organiques.

La présence des orthophosphates dans les eaux naturelles est liée à la nature des terrains traversés, à la décomposition de la matière organique, aux engrais phosphatés industriels entraînés par lessivage ou par infiltration.

Les polyphosphates sont utilisés dans de nombreuses unités industrielles et industries pharmaceutiques.

Les polyphosphates peuvent être toxiques pour l'homme et sont considérés responsables des accidents cardiaques et vasculaires [1].

Le phosphore est un élément indispensable à la vie des algues, la présence de phosphore entraîne un risque d'eutrophisation des cours d'eau ou des lacs, c'est-à-dire, que celui-ci peut se voir envahi par un développement excessif de la population algale.

- **Azote**

L'azote se présente sous diverses formes dans les eaux usées.

- Forme oxydée : azote nitreux (NO_2^-) et nitrique (NO_3^-)
- Forme moléculaire : azote dissous N_2
- Forme réduite : azote organique (ammoniaque) (NH_4^+).

L'azote est l'un des éléments qui favorise la prolifération d'algues, par conséquent la réduction de sa teneur avant le rejet des eaux est plus que nécessaire [1].

- **Les métaux lourds**

Ce sont les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer (55,845 g/mole). Ils sont pour certains très dangereux parce que potentiellement toxiques, non-biodégradables et bio-cumulables dans les chaînes alimentaires. Ils sont principalement d'origine industrielle.

Les métaux lourds se trouvent dans les eaux usées urbaines à l'état de trace. Des concentrations élevées sont en général révélatrices d'un rejet industriel sans aucun doute.

Leur élimination se fait au cours de la phase de décantation, filtration du traitement [1].

I.3. Rejets industriels textiles

I.3.1. Présentation de l'industrie textile

L'industrie textile rassemble de très nombreux métiers tout au long d'une chaîne de transformation partant de matières fibreuses jusqu'à des produits semi-ouvrés ou entièrement manufacturés.

La première étape consiste en la transformation de matières premières issues de fibres naturelles, artificielles ou synthétiques en fils. Les métiers associées sont la filature, le guipage, le moulinage ou encore la texturation.

A partir des fils unidimensionnels, les techniques de tissage et de tricotage permettent d'obtenir des surfaces textiles bidimensionnelles (voire tridimensionnelles). Ces surfaces sont alors très souvent ennoblies pour leur donner de la couleur (teinture, impression) ou des propriétés particulières (apprêts chimiques, apprêts mécaniques, enduction, contre-collage, etc.).

I.3.2. Identification des principaux procédés et rejets associés

Dans l'industrie textile, on peut trouver comme activités :

- La préparation de la laine (délainage, lavage, séchage, cardage, peignage) avant la filature
- La filature du coton, du lin, de la laine ou encore de fibres synthétiques
- Le tissage ou le tricotage ou encore la technique des non-tissés (fabrication à partir de fibres synthétiques artificielles ou naturelles, formation de la nappe par un procédé par voie sèche ou humide, puis consolidation mécanique, chimique ou thermique puis séchage)
- L'ennoblissement : tout ce qui confère au textile son aspect final : blanchiment, teinture, impression....

Toutes ces activités sont à l'origine de rejets liquides et/ou gazeux. Toutefois l'activité la plus polluante est l'ennoblissement [6].

I.4. Les colorants textiles

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 400 à 700 nm). Tous les composés répondants à cette définition se différencient par leur structure chimique, organique ou inorganique, ou par leur origine, naturelle ou synthétique. Cependant, la distinction faite entre les colorants et les pigments est bien plus importante puisqu'elle tient compte de l'interaction entre la matière colorante et le substrat. Les pigments ont la particularité d'être insolubles dans le milieu où ils sont appliqués, ce qui

nécessite de faire appel à des produits auxiliaires, comme certains polymères dans la peinture, pour assurer la cohésion avec le support. En revanche, les colorants doivent présenter vis-à-vis des matériaux à teindre, tels que les textiles, le cuir, le papier, une certaine affinité qui se traduit par une montée progressive, suivie d'une fixation de la substance colorante sur le substrat [7].

1.4.1. Utilisation des colorants

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

- pigments (industrie des matières plastiques)
- encre, papier (imprimerie)
- colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire)
- pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment)
- colorants capillaires (industrie des cosmétiques)
- colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique)
- carburants et huiles (industrie automobile etc.,...)
- colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport ...
- colorants textiles à usage médical [8].

1.4.2. Nature des colorants

Il existe deux grandes classes de colorants, en l'occurrence les colorants naturels et les colorants synthétiques.

1.4.2.1. Colorants naturels

Dès 1500 avant notre ère, les Égyptiens réalisèrent des teintures avec le safran (jaune), le pastel (bleu), la garance (rouge), l'indigo et la pourpre. Dès lors, la majorité des colorants utilisés sont d'origine végétale, extraits des plantes, des arbres ou des lichens, ou bien d'origine animale, extraits des insectes comme le kermès et la cochenille ou des mollusques comme la pourpre, ou bien encore dans les micro-organismes. Cependant, le nombre de colorants naturels n'a jamais excédé quelques dizaines. Les colorants naturels sont extraits des éléments naturels par des procédés simples comme le chauffage ou le broyage. Parmi l'ensemble de ces colorants naturels, on distingue deux catégories : les colorants à mordant et les colorants de cuve [9].

- **Les colorants à mordant** : ils se caractérisent par la présence dans leur molécule de groupes hydroxyles, souvent en position voisine des groupes cétoniques, ce qui permet de former des complexes insolubles avec des sels métalliques (le mordant) d'aluminium, de fer, d'étain, de zinc et de chrome.

Le complexe insoluble colorant-mordant se développe à l'intérieur de la fibre, ce qui conduit à une teinture solide. La gaude, la garance, le kermès et la cochenille figurent dans cette catégorie.

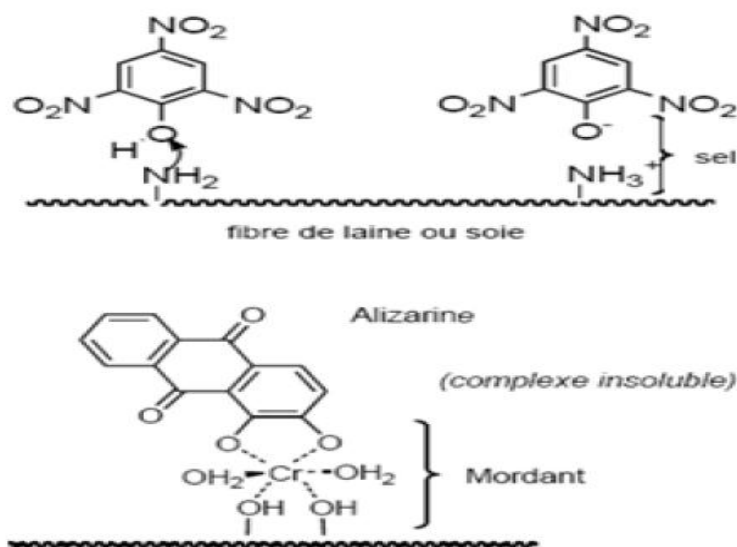


Figure I.1 : Exemple de la structure des colorants à mordant

- **Les colorants de cuve** : ces colorants sont insolubles dans l'eau, il faut tout d'abord les dissoudre en réalisant une réduction du colorant dans une solution alcaline : la cuve. L'indigo et la pourpre sont des colorants de cuve.

Aujourd'hui, l'importance économique des colorants naturels a beaucoup diminué, on ne les utilise plus dans l'industrie textile, du cuir et du papier, que pour des traitements spéciaux. Ils restent en revanche, très utilisés dans les produits alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques [9].

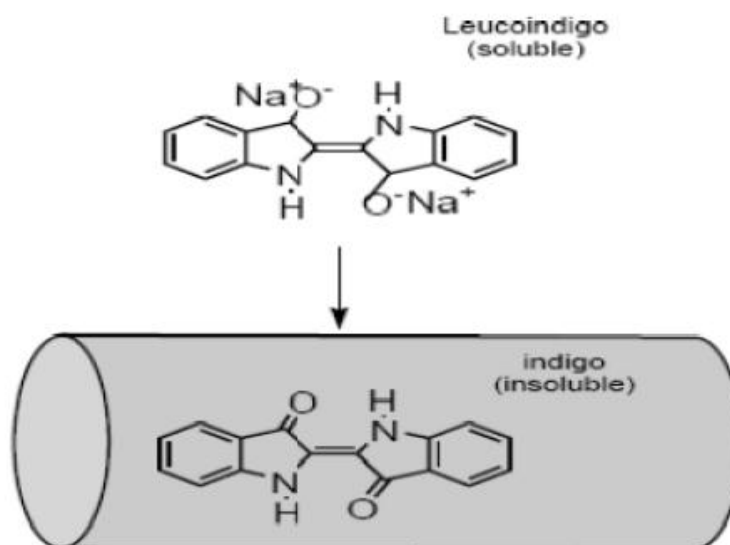


Figure I.2 : Exemple de la structure des colorants de cuve

1.4.2.2. Colorants synthétiques

Ce sont des composés ayant comme matières premières des molécules telles que le benzène, issu de la distillation de la houille. C'est grâce à une série de procédés chimiques, qui correspondent en général à la substitution d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène du produit de départ par des éléments ou des radicaux particuliers, que sont fabriqués les intermédiaires. Ces derniers serviront à la fabrication du colorant final. Les colorants synthétiques dont les propriétés peuvent être précisément adaptés à leur utilisation, dominent aujourd'hui le marché [9].

1.4.3. Classification chimique des colorants

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore. Les classes chimiques les plus utilisées dans les colorants textiles sont principalement les colorants azoïques, les colorants anthraquinoniques et les phtalocyanines.

a) Les colorants azoïques

Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques. Cette catégorie de colorant est actuellement la plus répandue sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50 % de la production mondiale de matières colorantes [9,10]. Les colorants azoïques se répartissent en plusieurs catégories : les colorants basiques, acides, directs et réactifs solubles dans l'eau, et les azoïques dispersés et à mordant non-ioniques insolubles dans l'eau. On estime que 10 à 15 % des quantités initiales sont perdues durant les procédures de teinture et sont évacuées sans traitement préalable dans les effluents [10]. Or ces composés organiques cancérigènes sont réfractaires aux procédés de traitements habituellement mis en œuvre, et sont très résistants à la biodégradation.

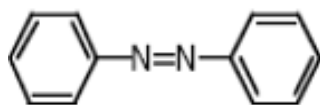


Figure I.3 : Exemple de la structure des colorants azoïques

b) Les colorants anthraquinoniques

D'un point de vue commercial, ces colorants sont les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau quiconque sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amines.

Ils sont synthétisés par substitution d'atomes d'H₂ par des groupements hydroxyles (-OH) et aminos (-NH₂). On obtient des composés de toutes les teintes. A titre d'exemple, le rouge alizarine (dont la structure a été déterminée par C. Graebe et G. Liebermann en 1869) s'obtient

par substitution de 2 hydrogènes par 2 groupements OH [10].

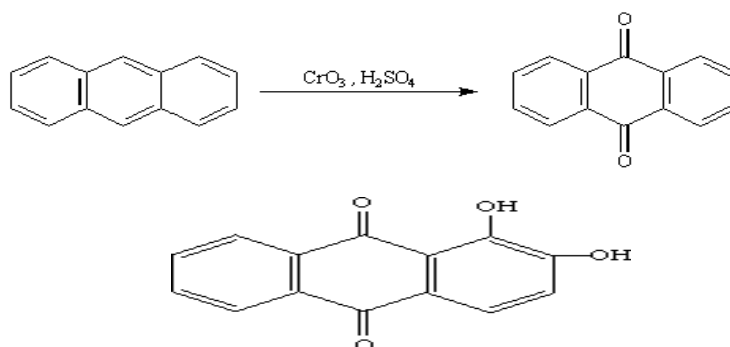


Figure I.4 : Exemples de la structure des colorants anthraquinoniques

c) Les phtalocyanines

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, ...).

Ci-dessous la formule du phtalocyanine de cuivre.

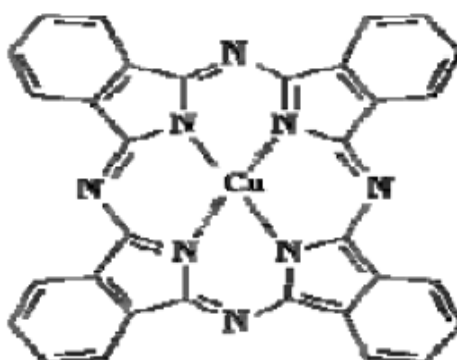


Figure I.5 : Structure du colorant phtalocyanine de cuivre

I.4.4. La teinture

La teinture est un procédé qui implique une interaction entre le colorant et la fibre, et le résultat dépend de cette combinaison. On distingue deux processus de coloration :

- **Le processus direct** : les fibres sont plongées dans le bain de teinture.
- **Le processus indirect** : on travaille la fibre ou on ajoute des composés de différentes natures avant de mettre en contact fibre et colorant.

I.4.5. Les fibres textiles

Elles sont classées en trois grandes catégories.

- Les fibres naturelles d'origine végétale (coton, lin, chanvre).

- Les fibres artificielles obtenues par transformations de matières premières naturelles (viscose).
- Les fibres synthétiques, obtenues par synthèse chimique, le plus souvent à partir de dérivés du pétrole (nylon, polyamide, polyester ...).

Tableau I.1: Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants [8]

Classes de colorant	Fixation (%)	Fibres utilisées
Acide	80 – 93	Laine, nylon
Azoïque	90 – 95	Cellulose
Basique	97 – 98	Acrylique
De cuve	80 – 95	Cellulose
Direct	70 – 95	Cellulose
Dispersé	80 – 92	Synthétique
Réactif	50 – 80	Cellulose
Soufré	60 – 70	Cellulose

D'après le tableau (I.1), nous voyons que le taux de fixation n'atteint pas toujours les 100 %. Les colorants qui ont un taux de fixation élevé sont les colorants dispersés (80 – 92 %) et basiques (97-98%), ce sont les plus utilisés dans l'industrie textile.

1.4.6. Impact des colorants sur l'environnement et la santé

L'utilisation des colorants peut entraîner des dangers soit sur l'environnement ou bien sur l'être humain.

a) Sur l'environnement

La production et l'utilisation des colorants naturels sont beaucoup moins polluantes que celle de la plupart des colorants et pigments de synthèse qui génèrent, des sous-produits nocifs, lorsque ces rejets sont déversés directement dans le milieu naturel sans aucun traitement spécifique des constituants toxiques.

Ces colorants sont pour la plupart synthétiques et représentent aujourd'hui un large groupe de composés chimiques. La production mondiale de ces colorants de synthèse est évaluée à 700000 tonnes/an. Une partie de ces colorants, approximativement 140000 tonnes/an, sont rejetées lors des étapes de fabrication et coloration des tissus. Les industries textiles, et plus particulièrement les phases de teinture et d'ennoblissement utilisent principalement des produits chimiques, nuisibles pour la santé, comme certains colorants azoïques cancérigènes, et engendrent une pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques. L'hétérogénéité de la composition des produits utilisés pour teindre fait qu'il est extrêmement difficile d'atteindre des niveaux de

pollution satisfaisants, c'est-à-dire, les seuils imposés par les normes environnementales, après traitement par les techniques utilisées.

b) Sur la santé : sont dus à certaines capacités de ces colorants qui peuvent :

- Etre mutagènes
- Etre génotoxiques
- Entraîner des cancers de la thyroïde
- Entraîner des tumeurs des glandes surrénales
- Contenir des substances cancérigènes
- Avoir des actions sur le système nerveux central
- Inhibition ou déficit de certaines enzymes
- Augmentation de la perméabilité intestinale.

1.4.7. Nécessité de traiter les effluents textiles

Au cours des différentes étapes de teinture, des quantités plus ou moins importantes de colorants sont perdues par manque d'affinité avec les surfaces à teindre ou à colorer. Ces rejets organiques sont toxiques et nécessitent une technique de dépollution adaptée.

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la conception d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par étapes successives. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage.) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide/liquide.

1.4.8. Législation sur l'environnement

Vus le grand danger que pose l'industrie textile et l'utilisation des colorants dans notre vie quotidienne sur l'environnement et notre santé, l'Algérie à l'instar de tous les pays européens a mis une réglementation stricte N°06-141 sur les rejets des effluents textiles dans le milieu hydrique.

I.5. Le procédé d'électrocoagulation

I.5.1. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation (EC)

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster [11] qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique. En 1946, Stuart étudie plus précisément le procédé avec un réacteur équipé d'électrodes en aluminium. Comparant le procédé de coagulation physico-chimique et le procédé électrochimique, il observe que le phénomène de coagulation semble plus rapide avec la méthode électrochimique. *Bollina (1947)*, se base sur les résultats de *Stuart* et réalise une comparaison économique des deux procédés. Il estime que pour les installations de petites tailles, l'électrocoagulation peut s'avérer plus compétitive que les procédés classiques. Les recherches se sont poursuivies sur les effluents de caractéristiques très différentes :

Holden (1956) s'intéresse à la possibilité de traiter les eaux de surface pour la production d'eau potable alors que *Sadek (1970)* propose un traitement des eaux usées en éliminant les phosphates par EC. *Back et coll. (1974)* emploient le procédé pour le traitement des effluents issus des industries agro-alimentaires. En 1975, *Strokachen*, évoque divers "électrocoagulateurs", permettant le traitement et le recyclage des eaux usées pour une éventuelle réutilisation en agriculture. En 1980, de nombreux travaux ont été présentés par des chercheurs russes sur l'électrocoagulation comme moyen de traitement efficace des eaux usées. Enfin, en 1984, *Vik* réalise un travail conséquent démontrant la possibilité de produire de l'eau potable par le procédé d'électrocoagulation à partir des eaux naturelles norvégiennes fortement chargées en substances humiques[11]. En dépit de ces nombreuses recherches, le procédé d'EC a marqué un net recul en raison de l'évolution des autres procédés de traitement des eaux qui sont apparus plus simples et moins coûteuses. Ainsi l'électrocoagulation s'est finalement peu développée jusqu'au début des années 90.

Le développement de la législation concernant les rejets d'eaux polluées en milieu naturel ainsi que l'avancement des recherches dans les différents procédés d'électrochimiques ont dans les années 80, réactualisé l'électrocoagulation qui a alors connu un regain d'intérêt.

Les efforts récents concernant le développement des procédés propres de traitement des eaux, ont permis à l'électrocoagulation de prendre de l'importance, offrant ainsi un coût d'investissement et de traitement compétitif, et une large efficacité d'élimination de polluants. Les industries de traitement de surface ont été les premières à instaurer des procédés d'électrocoagulation, en France, dans les années 90. Depuis, la technologie des procédés d'EC ne cesse d'être développée et améliorée dans des domaines industriels variés (textile, Agroalimentaire, semi – conducteurs...). L'importance de l'électrocoagulation s'est accrue du fait de son efficacité, généralement supérieures aux autres techniques, pour éliminer les différentes formes de pollution, répertoriées par les indicateurs tels que, la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biologique en oxygène (DBO₅), le carbone organique total (COT), les matières en suspensions (MES), le taux de solides dissous (TDS), le taux alcalimétrique complet (TAC), les métaux lourds et la coloration liée à l'absorbance de l'effluent (ABS).

1.5.2. Principe du procédé

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions (Fe_2^+ , Fe_3^+ , Al_3^+) susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation/floculation des polluants que l'on souhaite éliminer. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent. Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floccs qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration) [12]. La figure suivante présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

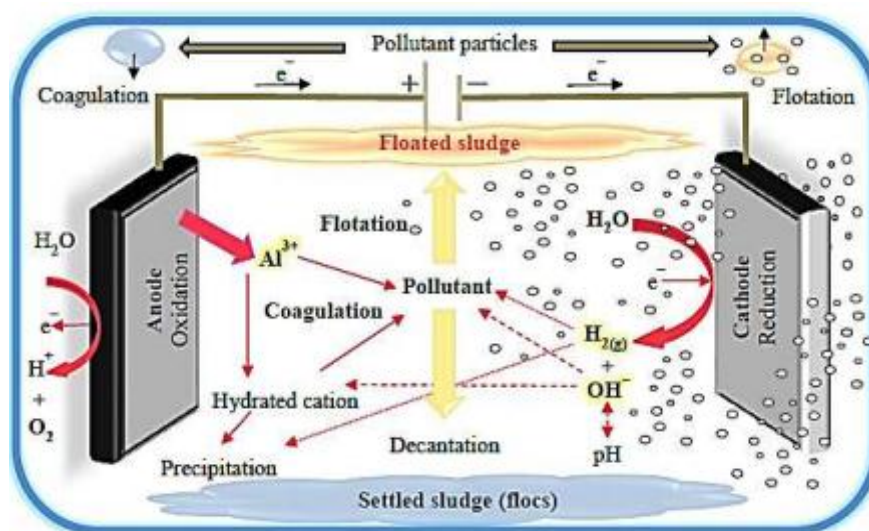


Figure I.6: Schéma de principe du procédé de l'électrocoagulation [12]

Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations. Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube. Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux qui sont choisis de manière à optimiser le procédé de traitement. Les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium [13].

Les principales réactions qui se déroulent avec les électrodes (cas des électrodes en aluminium) sont :

- A l'anode :
- L'oxydation du métal : $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$
- La formation de l'hydrogène : $2\text{Al} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3/2 \text{H}_2 + 3 \text{e}^-$
- A la cathode : La réduction de l'eau : $\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow 1/2 \text{H}_2 + \text{OH}^-$

Il est aussi possible d'utiliser d'autres métaux comme anode soluble. Néanmoins, l'aluminium et le fer restent les plus utilisés grâce à leur prix abordable et à leur forme ionique qui présente une valence élevée. Dans le cas d'une anode en aluminium, le cation métallique formé est Al^{3+} tandis que l'utilisation d'une électrode en fer conduit à la formation d'ions ferreux Fe^{2+} , qui peuvent s'oxyder en présence d'oxygène dissous ou bien par auto oxydation pour donner les ions ferriques Fe^{3+} .

Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH du milieu. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques [14].

On peut distinguer:

- Les mono complexes tels que : $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$
- Les poly complexes tels que : $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$
- Les espèces amorphes et très peu solubles telles que : $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3

Ces espèces jouent le rôle de coagulant et conduisent à la formation de précipités, puis de floccs facilement éliminables. La différence entre l'EC et la coagulation chimique réside principalement dans la source des coagulants, qui sont générés électrochimiquement (*in-situ*) dans l'une, et ajoutés directement sous forme de composés chimiques dans l'autre.

En revanche, les procédés classiques basés sur la coagulation chimique n'ont besoin que d'énergie mécanique pour réaliser l'agitation tandis que l'EC consomme aussi de l'énergie électrique essentiellement pour dissoudre l'anode sacrificielle.

Au voisinage de la cathode, la réduction du solvant (eau) provoque la formation du gaz hydrogène. Ce dégagement de gaz se présente sous formes de bulles, estimées à un diamètre d'environ 10 à 100 μm et contribuent fortement à l'agitation du milieu. Dans certains cas, lorsque l'installation est conçue dans le but de réaliser une floculation après électrocoagulation, ces bulles adhèrent aux solides formés en solution (adsorbant- polluant) et favorisent leur flottation.

Plusieurs travaux portant sur les procédés d'EC ont montré que la séparation des matières s'agglomérés en solution à l'issue de l'adsorption des polluants, peut se réaliser de deux façons :

- Par décantation
- Par flottation.

Généralement, la récupération des boues s'effectue en aval du réacteur électrochimique, grâce à un bassin de décantation. Il existe certaines applications où la récupération s'effectue dans le réacteur lui-même. Cela concerne, la plupart du temps, des procédés conçus pour réaliser à la fois l'EC et la décantation ou flottation Cette dernière est assistée par une injection d'air comprimé, dans la majorité des cas [11-15].

Dans le cas des électrodes en aluminium, et sur la base des réactions chimiques citées ci-dessus, on peut établir la prédominance des espèces d'aluminium en fonction du pH (Fig. I.7). *Pourbaix* (1963) a établi les diagrammes potentiel-pH de nombreux métaux en déterminant leur réactivité en fonction du pH et du potentiel E pour les réactions électrochimiques à l'équilibre thermodynamique [14].

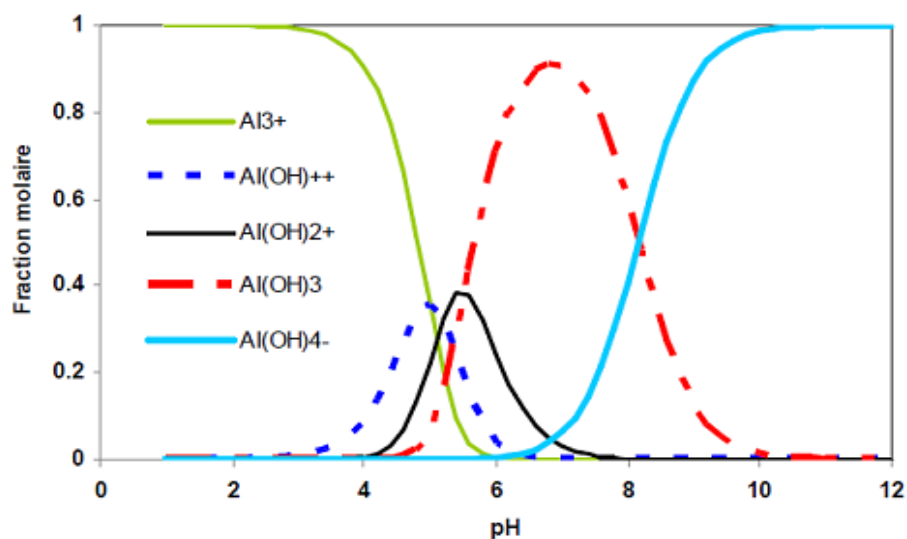


Figure I.7 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium (sans tenir compte des formes polymères de ces hydroxydes) [14]

1.5.3. Paramètres influençant le procédé d'EC

Plusieurs facteurs peuvent influencer la taille des bulles générées par EC, tels que, la densité de courant, la température, le matériau, la position des électrodes, le mode de connexion des électrodes, le pH du milieu, la concentration initiale et la nature de l'effluent.

1.5.4. Technologie du procédé d'électrocoagulation

Plusieurs technologies d'EC ont été mises au point au niveau du laboratoire et industriel. Les cellules électrochimiques sont montées seule ou en séries avec d'autres types de procédé. Dans les petites installations de laboratoire, les géométries des électrodes sont diverses, telles que, les plaques, cylindriques, des lits fixes de billes sphériques et des électrodes rotatives. Plusieurs modes de connexions électriques peuvent être réalisés.

On distingue généralement trois modes :

- Mode monopolaire en série
- Mode monopolaire en parallèle
- Mode bipolaire en série.

1.5.5. Les différents modes de connexions électriques

Afin d'améliorer les performances de l'EC à deux électrodes, il est nécessaire d'utiliser d'autres modes de connexions (monopolaires ou bipolaires) à plusieurs électrodes pour avoir une grande surface active. Ces trois modes de connexions diffèrent par leurs expressions de tension électrique et d'intensité de courant dans la cellule d'électrolyse

a) Connexion monopolaire en parallèle

La figure montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle.

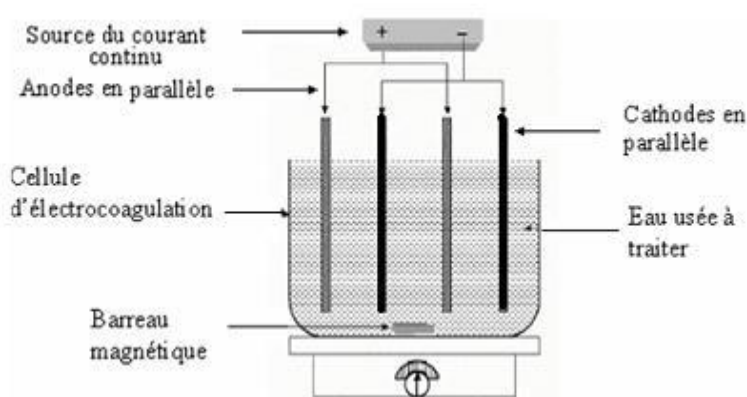


Figure I.8 : Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires

Cette cellule EC consiste essentiellement en paires de plaques de métal conducteur placées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu. Les plaques métalliques conductrices

sont appelées communément "électrodes sacrificielles". L'anode sacrificielle abaisse le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être constituées des mêmes matériaux que l'anode ou de matières différentes

b) Connexion monopolaire en série

Comme le montre la figure ci-après, chaque paire d'électrodes sacrificielles est interconnectée l'une avec l'autre, et n'a donc pas d'interconnexions avec les électrodes externes. Cette disposition de cellules avec des électrodes monopolaires en série est similaire du point de vue électrique à une simple cellule avec plusieurs électrodes et des interconnexions.

Dans un montage en série, une même intensité de courant traverse toutes les électrodes, la tension (différence de potentiel) nécessaire sera plus importante, puisque les résistances s'additionnent. Il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevées.

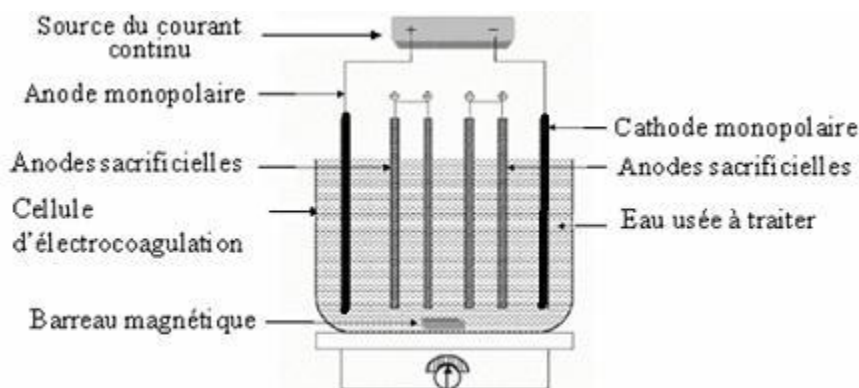


Figure I.9 : Connexion monopolaire en série d'électrodes

c) Connexion bipolaire

Seules les deux électrodes monopolaires sont connectées à la source de courant sans aucune interconnexion entre les électrodes sacrificielles. Les différentes électrodes sont placées comme l'indique la figure suivante.

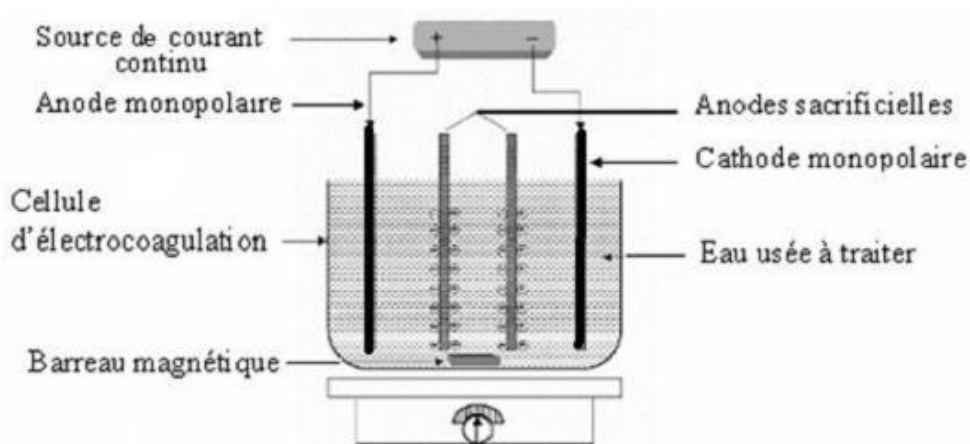


Figure I.10 : Connexion bipolaire des électrodes

I.5.6. Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation

Comme tous les procédés d'épuration des eaux, l'EC possède des avantages et des inconvénients qui limitent ses domaines d'applications.

- Le procédé d'EC ne nécessite pas l'ajout de produit chimique, il nécessite l'ajout de petite quantité d'additif pour améliorer la conductivité électrique de l'effluent.
- L'eau usée traitée par EC donne une eau claire, sans couleur et inodore...etc. [9,13,14,16].
- Le procédé de l'EC a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales. L'application d'un champ électrique entre les électrodes entraîne les particules dans un mouvement plus rapide, facilitant de ce fait leur agglomération.

L'EC présente quelques **inconvénients** parmi lesquelles on peut citer :

- l'effluent traité par EC doit être un électrolyte ce qui impose un ajout de sel pour certains effluents faiblement conducteurs.
- électrodes sacrificatoires sont dissoutes dans l'effluent à traiter en raison de l'oxydation, et doivent être régulièrement remplacées.
- La maintenance des installations est parfois coûteuse, le nettoyage et changement des électrodes nécessite l'arrêt du procédé au cours de ces opérations.

I.5.7. Principales lois d'électrolyse

a) Loi de Faraday

Si l'on considère que les seules réactions chimiques qui se déroulent dans le réacteur d'EC sont :

- A l'anode, l'oxydation du métal,
- A la cathode, la réduction de l'eau,

Il est possible de déterminer la masse de métal dissoute m et d'hydrogène formé pendant une durée t d'électrolyse à un courant I , en utilisant la loi de Faraday [17]:

$$m = (I.t.M) / n.F$$

m : masse du métal dissous ou du gaz formé (g)

I : intensité du courant imposé (A)

t : durée d'électrolyse (s)

M : poids moléculaire de l'élément considéré (g.mol^{-1}).

F : constante de Faraday (96500 C.mol^{-1}).

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

b) Rendement faradique (Φ)

Il est défini comme étant le rapport entre la quantité du métal dissous expérimentalement (Δm_{exp}) et la quantité du métal consommé théoriquement (Δm_{th}).

$$\Phi = \frac{\Delta m_{\text{exp}}}{\Delta m_{\text{th}}} = \frac{3F}{M_{\text{Al}} I t} \Delta m_{\text{exp}}$$

Le rendement faradique peut souvent être supérieur à l'unité (01) en raison de la dissolution chimique du métal [17,18].

I.5.8. Application du procédé d'électrocoagulation

Actuellement, les avantages du processus d'électrocoagulation le placent parmi les processus les plus prometteurs dans différents domaines du traitement. Ses domaines d'application sont très vastes et l'amélioration des procédés électrochimiques réduit la plupart des inconvénients qui ont freiné l'utilisation de l'électrocoagulation. L'électrocoagulation a le potentiel d'être le choix économiques et environnemental distinct pour le traitement de l'eau usagée et d'autres issues relatives de gestion de l'eau.

De plus, dans les dernières décennies l'EC a été proposé comme procédé efficace pour éliminer les espèces ioniques solubles des solutions, en particulier les métaux lourds. Le processus d'électrocoagulation a été prouvé efficace dans la séparation (solide/liquide). Ce procédé a été utilisé pour le traitement de solutions colorées par différentes substances, telles que, le bleu méthylène, rouge nylosan, rouge de congo, jaune éosine, ...

Le traitement de l'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières suspensions, une DCO supérieure à 500 mg/L, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg/L, a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et 75% de DCO par EC en utilisant des électrodes en fer et en aluminium.

La recherche bibliographique, nous a permis de constater que le processus d'EC connaît un développement considérable en termes de publications et applications industrielles. La revue était organisée en plusieurs catégories et présentée dans les tableaux suivants ... [9,15,19].

Tableau I.2 : Résumé des applications d'EC**a- Textile et tannerie**

Référence	Effluent	Polluant	Réacteur, Electrodes	Conditions expérimentales	Résultats
Kongjao et al., (2008)	Eaux usées de tannerie contenant des polluants organiques et inorganiques.	DCO, DBO, NTK, Cr, MEST, TDS, huile (O) et graisse (G)	Batch Fe-Fe	V = 3000ml, d = 50 mm, J = 22.4 A/m ² , t = 20 min, pH = 7-9	DCO: 95%, DBO: 96% , Cr : 100%, MEST : 96%, NTK : 62%, TDS :50%, O et G : 99%, EEC :0.13kwh/m ³ , CO = 0.25 €/m ³

Apaydin et al., (2009)	eaux usées de tannerie.	DCO, Sulfure, Cr, MES	Batch Fe-Fe	V = 400ml, d = 60 mm, J = 333A/m ² , t = 2-30m n, pH = 7.4	DCO : 56%, Sulfure : 96% , Cr : 97%, MES: 70%, EEC :15.63kwh/m ³ , CO : 0.25€/m ³
Şengil et Özacar (2009)	Solution contenant Colorant azoïque Noir réactif 5	couleur	Batch Al-Fe	V = 500ml, d = 25mm, J = 45.75 A/m ² , t = 5 min, pH = 5	Couleur : 99 % EEC: 0.053kwh/m ³
Merzouk et al., (2009)	Solution de Colorant rouge (mélange de l'acide 2-naphtoïque et de 2-naphtanol)	DCO Couleur	Continu Al-Al (mp)	C _{DCO} : 2500 mg / L, C _{Colorant} < inférieure à 200 mg / L , pH = 6 - 9 , t = 14 min, J = 31,25 mA/cm ² , k = 2,4 mS / cm , d = 1cm, Q = 25.2 L/h	DCO (> 80%). Couleur (> 85%)
Zodi et al., (2010)	Eaux usées industriel de textile	DCO, Turbidité, MST	Batch Al-Al	V=2200ml, d=20mm, J=80A/m ² , t=70min, pH=7	DCO : 70%, Turbidité : 70%, MST : 50%
Aoudj et al., (2010)	l'industrie textile (le rouge Direct 81)	Colorant	Batch Al-Al	V=500ml, d=25mm, J=18.75A/m ² , t=60min, pH=6	Colorant : 98%
Durango-Usuga et al., (2010)	Solution de Colorant violet cristalline	DCO, Colorant	Batch Al-Fe	V=500ml, d=11mm, J=28A/m ² , t=5min, pH=5.8	DCO: 100 % Colorant : 96%
El-Ashtoukhy & Amin (2010)	Colorant vert acide 50	DCO, Colorant	Batch Al-Al	d=10mm, J=16.7A/m ² , t=21min, pH=6.9-11	DCO: 87% Colorant : 96% EEC : 0.48 kwh/m ³
Phalakornkule et al., (2010)	eaux usées synthétique et réelles de textile	Colorant Bleu réactif 140, rouge dispersé 1 et mixte	Batch Al-Al ; Fe-Fe ; Fe-Al (5 paires, mpp)	pH=9.6 ; J=30A/m ² ; d=1.2cm; C _{Colorant} =100mg/l; T=28°C; k= 850-870 mS/ cm.	Abattement > 95 % pour les deux Colorant avec électrodes en Fe et EEC = 1kWh/m ³
Mollah et al., (2010)	eaux usées synthétique contenant un Colorant Orange II	Colorant Orange II	Continu Al-Al	J= 120 A / m ² , d=6mm C _{Colorant} = 10 ppm, pH =6,5, k = 7,1 mS / cm, Q = 350 ml / min; C _{NaCl} = 4,0 g / L , T=25°C	Couleur : 94.5 %
Merzouk et al., (2010)	Solution synthétiques. effluents de l'industrie textile	DCO, DBO ₅ , MES, Turbidité, Couleur.	Batch Al-Al	U=0-30 v i =11.55 à 91.5 mA/cm ² , d = 1 cm	DBO ₅ : 88,9 % , DCO : 79,7 % , MES : 85,5 % , Turbidité : 76,2 % et la Couleur > 93%.
Parsa et al. (2011)	marron Acide 14 (Colorant azoïque)	DCO, Colorant	Batch Al-Acier	V=500ml, d=10mm, J=6.33A/m ² , t=18min, pH=6.4	DCO : 87% Colorant : 91% EEC : 0.053 kwh/m ³
Secula et al., (2011)	Carmin d'indigo (bleu acide 74)	couleur	Batch Acier doux	V=1000ml, d=3mm, J=10.91A/m ² , t=180min, pH=8	Couleur : 99% EEC : 0.053kwh/m ³
Merzouk et al., (2011)	Eff. réel de textile. Solution de Colorant rouge 14. Solution	DCO ; COT ; absorbance et la Turbidité	Batch à recirculation Al-Al	J=40-200A/m ² Q=0.15l/mn ; d=2cm; T=20°	Le traitement de l'effluent mixte peut être considéré comme la superposition du traitement individuel des effluents.

	combinant les deux.				
Pajootan et al., (2012)	eaux usées synthétique de textile	Colorant noir acide 52 ou et jaune acide 220	Batch Al-Al	pH=5 ; J=0-6A ; u=0-30v ; J=40A/m ² ; D=1cm ; C _{Colorant} =200mg/l ; t= 7min.	Les résultats sont très proches pour le traitement individuel ou mixte. N52 : 92 %, J220 : 97 %
Zongo et al., (2012)	Effluent de Tannerie	DCO ; chrome ; Turbidité	Batch à recirculation Al-Al / Fe-Fe(bipolaire)	62.5v ; 67.5Am ⁻² ; 10.5m ³ /h ; 1.2kwhm ⁻³	DCO : 86 % ; Cr(VI) : 100 % ; couleur : 91 % ; Turbidité : 100 %.
Krishna Kumar et al., (2013)	eau usée synthétique de textile contenant le Colorant réactif écarlate	Colorant, DCO	Continu électrodes en Fer tubulaires	Q =100-400ml/min J=30mA/cm ² pH=7.1, d=1.25cm t=90min	DCO : 96,5 % . La décoloration atteint 99.4%
Umran Tezcan Una , Ersin Aytac (2013)	eaux usées de textile	DCO, couleur	Batch et Continu. Fe-Fe	pH=9 ; t=60min ; J=50 mA/cm ² (batch) 20mA/cm ² (continu) ; Q=540ml/min	Batch : DCO (90,84%) ; Couleur: 99,9 % ; EEC=2,66 10 ⁻⁴ kWh/mg Continu : DCO : 98,46 % ; EEC = 0,518 10 ⁻⁴ kWh/mg
Zodi et al., (2013)	Eaux usées synthétique.	Colorant, DCO, MES, Turbidité	Continu Al-Al	Q=(0-28)l/h J=100-200A/m ² d=10mm,	Colorant : 90.2%, DCO :76.1% , MES: 66.1%, Turbidité : 97.83% EEC : 66kw/kgAl
Tyagi et al., (2014)	Eau usée synthétique de textile contenant le Colorant réactif bleu 21	Colorant, DCO	Continu Fe-Fe (mpp)	pHi = 9, i = 17 mA/cm ² , κ = 4.7 mS/cm, d = 4 cm, Q = 75 mL/min, t = 20 min	Couleur : 95% ; DCO : 76%.
Koby et al., (2016)	Eaux usées d'une unité de teinture	DCO , COT, Turbidité	Continu Fe-Fe (mpp)	pH = 9, i = 65mA/m ² , κ = 2.3 mS/cm, d = 4 cm, Q= 10 mL/min, t = 80 min	DCO : 85% COT : 76% Turbidité : 95% CO : 1,562 \$ / m ³
Amour et al., (2016)	Eau usée synthétique de textile contenant le Colorant Rouge Nylosan N-2RBL		Continu Al-Al(mpp)	Se = 48 cm ² , pH= 2.3- 8.8, J= 100 - 400 A/m ² , κ = 2540 μS/cm, Q = 15 – 60 L/h, t = 5 - 60 min	Couleur : 97%, NTU : 98 % pH = 7.74, j = 300 A/m ² , Q = 15 L/h, t = 35 min, EEC = 19.5 kWh/kg dye

b- Industrie agroalimentaire

Référence	Effluent	Polluant	Réacteur, Electrodes	Conditions expérimentales	Résultats
Koby et al., (2006)	eaux usées de fabrication des Croustilles (chips)	DCO, Turbidité,	Batch Al-Al Fe-Fe	V=250ml, d=11mm, J=20-300A/m ² , t=5-40min, pH=4-6	DCO: 60% Turbidité: 98% EEC : 4 kWh/m ³ , CO : 0.36€/m ³
Roa-Morales et al., (2007)	eaux usées d'une unité de fabrication de	DCO DBO Turbidité	Batch + H ₂ O ₂ (EF)	V = 1500ml, J = 0.0182A/m ² , t = 60min, pH = 4	DCO : 80/90 DBO : n.d./96 Couleur: n.d./57

	pâtes alimentaires	Couleur Coliformes	Al-Al		Turbidité:n.d./97 MST: n.d./95 Coliformes:n.d./100
Koby et Delipinar (2008)	eaux usées d'une unité production de la levure de boulangerie	DCO, COT, Turbidité	Batch Al Fe Monopolaire parallèle	V=800ml, d=20mm, 15mm, J=70A/m ² , t=50min, pH=5.7	DCO: 71/69 TOC: 53/52 Turbidité: 90/56 CO : 1.54 - 0.51 \$/m ³
Asselin et al., (2008)	eaux usées de l'abattoir de Volaille	DCO, DBO, Turbidité, H et G, MES, MST	Batch + Polymère (10 mg/l) Fe-Fe Al-Al	V=1700ml, d=15mm, J=3A, t=60min, pH=6.1-6.5	DCO: 80 – 84 % DBO: 84 – 88 % Turbidité: 86 – 94 % H et G: 98 – 100 % MES: 85 – 93 % MST: 58 – 70 % CO:4.07 - 4.31€/m ³
Maghanga et al., (2009)	Les eaux usées de l'usine de thé	DCO DBO Couleur	Batch acier	V=400ml, d=5mm, t=50min, pH=6	DCO : 91 % DBO : 84 % Couleur: 100 % CO : 2.27kW/m ³
Yetilmezsoy et al., (2009)	eaux usées de fumier de volaille	DCO, Couleur	Batch Al-Al Fe-Fe	V=400ml, d=61mm, 15mm, J=150A/m ² , t=20min, pH=5	DCO: 90% Couleur: 92% EEC : 2.6 kWh / kg _{DCO}
Kushwaha et al. (2010)	Eaux usées de produit laitier	DCO, Turbidité, MST, NT	Batch Fe-Fe	V=1500ml, d=10mm, J=270A/m ² , t=50min, pH=7	DCO: 70% Turbidité: 100% MST: 48% NT: 93%, EEC : 0.83 kWh/m ³
Valero et al., (2011)	eaux usées de l'industrie d'amande	DCO, COT, DBO Couleur.	Batch, continu Al-Fe, Fe-Al	V=700ml, Q :6.67l/min d=15mm, J=50A/m ² , t=15min, pH=5.7	DCO: 81% COT: 79% DBO: 67 % Couleur: 98%
Serkan Bayar et al., (2011)	eaux usées de l'abattoir de volailles	DCO ; Turbidité	Batch Al-Al	J=1mA/cm ² ; pH=3 ; t=30min ;k= 2860µS/cm v=150t/min.	DCO : 85 % Turbidité : 98 %
Valente et al., (2015)	Effluent laitier	DCO	Batch Al-Al	V = 650 ml J = 62A/m ² , t = 25min, pH = 5	DCO : 57 %

c- Industrie de papeterie

Référence	Effluent	Polluant	Réacteur, Electrodes	Conditions expérimentales	Résultats
Uğurlu et al., (2008)	Effluent de l'industrie de papeterie	DCO, DBO, phénol, lignine	Batch Al-Al Fe-Fe	V=2500ml, d=20mm, J=48A/m ² , t=7.5min, pH=7.6	DCO :75%, DBO: 70% lignine = 80%, phénol = 98%, EEC = 0.46 kWh/m ³ , CO = 0.25 €/m ³
Zaied et Bellakhal (2009)	Liqueur noir de l'industrie de pâte à papier	DCO, polyphénols, couleur	Batch Al-Al Fe-Fe	V=300ml, d=5mm, J=140A/m ² , t=50min, pH=7	DCO : 98%, polyphénols = 92%, couleur = 99 %
Terrazas et al., (2010)	eaux usées du papier de soie	DCO, DBO, Turbidité, MEST MDT	Batch Al-Al	V=300, 4500ml, d=10mm, J=10.8A/m ² ,	DCO :50%, DBO = 60%, Turbidité = 92%, EEC = 0.68kwh/m ³

				t=30, 60min, pH=6.7-7	
Katal et al., (2011)	Effluents de papeterie	Couleur, DCO, Phenol	Batch Al ou Fe mmp	V=1500ml, d=10mm, J=700A/m ² , t=30min, pH=5- 7	Couleur = 92 % (Fe), DCO : 86 % (Al), Phenol = 96% (Fe)
Zodi et al., (2011)	Effluents de papeterie	DCO, Arsenic, lignine	Batch Al ou Fe mmp	V = 2500ml, d = 20mm, J = 48A/m ² , t = 7.5 min, pH=7.6	DCO : 68%, DCO : 46%, Turbidité = 100%, Arsenic = 92%, lignine = 50%

d- Autres types d'effluents

Référence	Effluent	Polluant	Réacteur, Electrodes	Conditions expérimentales	Résultats
Petsriprasit et al., (2010)	Effluent de l'industrie billette	Cu ; Cr ; Pb ; Zn	Batch et continu Fe-Fe (mp)	T =30°; d=3Cm en batch :j= 98A/m ² ; pH= 5; t=30min. en continu : pH= 3; t=120min ; q=55ml/min	> 99%
Shafaei et al., (2010)	eaux usées synthétiques	Mn	Batch à recirculation. Al-Al	T =25°; d=1cm ; U=0- 30V;J=0-6A; J=6.25mA/cm ² ; pH=7 ; t=60Min ;C _{Mn2+} =100mg/l	94.4%
Koby et al., (2011)	eaux souterraines	As	Batch Fe-Fe Al-Al	V=650ml, d=13mm, J=2.5A/m ² , t=2.5min, pH=6.5,C _{0As} =0.15mg/l	As : 99%
Wan et al., (2011)	eau potable contaminée	As Phosphate	Batch Fe-Fe	V=100 ,50000ml, d=20, 5mm, J=0.022, 2A, J=3.9A/m ² , t=50min, pH=7	As : 97,100 % Phosphate :100 %
Dermentzis et al., (2011)	Eau usée de galvanoplastie	DCO ; Cr(VI)	Batch. Fe-Fe	40Am ⁻² ;pH=4-8 ; C _{Cr} =200-400 ;d=1.5cm, t=50mn	Cr (VI) et DCO Réduits en dessous des limites admissibles
Zhu et al. (2011)	Eau usée d'une mine d'antimoine (Sb)	Sb	Batch. Al-Al	V=500ml, d=10mm J = 166.67 A/m ² t = 60min	Sb : 77%
Bhatti et al., (2011)	Eaux contenant le Cuivre	Fe	Batch Al-Al, mpp	V=560ml, d=15mm, J = 22 mA/cm ² , t=50min, U=20v	Cu : 81%
Mansouri et al., (2012)	-Solution aqueuse contenant acide tannique. -Effluent de l'industrie de pâte et de tannerie.	DCO	Batch. Al-Al	C _{acide tannique} =0.51g/l pour solution aqueuse et =1.45g/l pour eau usée réelle.	-Eau usée synthétique DCO (> 80%). -Eau usée réelle DCO (> 60%)
Aliet Yaakob (2012)	Effluent de raffinerie d'huile de palme	DCO ; Turbidité	Batch. Al-Al ;mpp	V=20l ; d=1.5- 3.5cm ;U=2-4v ; J= 0-20A; pH=4.	DCO : 57%; Turbidité : 62%.
Al Aji et al., (2012)	Solution aqueuse	Cu ; Ni ; Zn ; Mn.	Batch. Fe-Fe (mp)	2-25mA/m ² ; 50- 250mg/l ; pH (3, 5.68, 8.95).	Mn : 72.6% et > 96 % pour les autres ; EEC= 49 kWh/m ³

El-Ashtoukhy et al., (2013)	eaux usée pétrochimique	phénol	Batch. Al-Al	J=8.59mA/m ² ; ph=7 ; d=0.5cm ; U=40v ; T=2h	100 %
Gao et al., (2013)	eau usée de galvanoplastie	Argent ; cyanure	Batch. Fe-Fe	U=4v ;pH=9,5 ; t=3h	Réduction simultanée d'Ag de 221 à 0,4 g/L et le CN de 157 à 4,9 mg/L
Kabuk et al., (2014)	Lixiviat	DCO NH ₄	Batch Al-Al	V=1.5l, J=20 mA/cm ² , t=60min, pH=8, d=2cm	DCO : 60,5 % NH ₄ : 24,3 %
Mohora et al., (2014)	Eaux souterraine contenant l'arsenic	Arsenic	Continu Al-Al, bp	J=8.86mA/cm ² t=30min pH=5.3	As: 93% CO : 0.25 €/m ³ EEC : 3.03 kW h/m ³
Hamdan et al., (2014)	Eaux souterraine saumâtres	chrome	Batch Fe-Fe	J=79.4A/m ² , t=5min, pH=8	Cr(IV) : 100% CO = 0,6 kWh / m ³
Kobia et al., (2015)	Eaux souterraine contenant l'arsenic	Arsenic	Batch+ Air dissous Fe-Fe	V=600ml J=14.3A/m ² , t=20min, pH=7.6, Q _{air} =6L/min	As : 99.3% CO : 1,55 \$ / m ³

e- Huiles et graisses

Référence	Effluent	Polluant	Réacteur, Electrodes	Conditions expérimentales	Résultats
Avsar et al., (2007)	Eaux usée d'huile de rose	DCO, DBO, Turbidité	Batch Fe-Fe	V=400ml, d=65mm, J=80A/m ² , t=20min, pH=6.4-7.1	DCO : 80%, Turbidité : 81% EEC : 6.25 kWh/m ³
Tir et al., (2008)	Emulsion d'huile	DCO, Turbidité	Batch Al-Acier doux	V=400ml, d=10mm, J=250A/m ² , t=22min, pH=7	DCO : 90, Turbidité: 99, EEC = 3kWh/m ³
Koby et al., (2008)	Fluide de coupe rejeté par usines de fabrication de métal	DCO, COT, Turbidité	Batch Al-Fe	V=800ml, d=10mm, J=60A/m ² , t=25min, pH=6 -7	DCO : 92%, COT : 82%, Turbidité : 100%, CO : 0.348 €/m ³
Asselin et al., (2008)	Eaux huileuse de cale	Huile et graisse, MES, MST	Batch Al-Fe	V=1700ml, d=15mm, J=34A/m ² , t=60min, pH=4	Huile et graisse : 95 % MES : 99%, MST : 32% EEC : 0.25kWh/m ³ , CO : 0.033€/m ³
Chavalparit et Ongwande (2009)	Eaux usée d'un biocarburant à base d'huile de palme	DCO, Huile et graisse, MES	Batch Al- Graphite	V=1000ml, d=15mm, J=135-140A/m ² , t=25 min, pH=6,	DCO : 55%, Huile et graisse : 97%, MES : 98%, EEC : 5.57 kWh/m ³
Un et al., (2009)	Eaux usées de raffinage d'huile végétale		Batch Al-Fe	V=300ml, d=8mm, J=350A/m ² , t=90min, pH=6	DCO : 98,9% EEC : 42kWh/kg DCO traitée. CO : 1.2€/m ³
Meas et al., (2010)	Effluent Industriel chargé en huile fluorescente	DCO, Turbidité, couleur	Continu Al-Al	V=23000ml, Q=3.2 l/min, d=5mm, J=110A/m ² , t=5min, pH=7.5	DCO : 95%, Turbidité : 99% Couleur : 99% EEC : 0.7kWh/m ³ CO : 0.18€/m ³
Hanafi et al., (2010)	Margine 2013	DCO Couleur Polyphénols	Batch Al-Al	V=100ml J=250A/m ² ;pH=4.2; t=15min ;k= 3.6 S/cm	DCO : 84% Couleur : 92% Polyphénols : 87%.

				$C_{\text{DCO}}:20000\text{mg/l}$; $C_{\text{poyphenol}}=260\text{mg/l}$; $C_{\text{NaCl}}=2\text{g/l}$; $d=2.8\text{cm}$	EEC : 2.63 kWh / kgDCO, CO : 0.27 €/kgDCO.
Moussavi et al., (2011)	Les eaux souterraines contaminées (hydrocarbures pétroliers)	total petroleum hydrocarbon (HPT)	Batch, Continu Différentes combinaisons Al, Fe, Acier inox	$Q=0.005-0.011/\text{min}$ $V=200\text{ml}$, $d=30\text{mm}$, $J=180\text{A}/\text{m}^2$, $t=20-40\text{min}$, $\text{pH}=7.2$	HPT : 93.4%. (Acier inox-Fe)
Yazdanbakhsh et al., (2013)	Margine	DCO	Batch Ti-Fe	$J=117.18\text{A}/\text{m}^2$ $t=60\text{min}$, $\text{pH}=5.2$	DCO : 96.14%
Kraljić Roković et al., (2014)	Margine	DCO	Batch Fe-Fe	$t=60\text{min}$, $\text{pH}=4.8$ $J=10\text{mA}/\text{cm}^2$	DCO : 80%
El-Naas et al., (2014)	Effluent d'une raffinerie de pétrole	DCO Phénols Crésols	Continue Al-Al	$J=3\text{mA}/\text{cm}^2$; $U=17$ V ; $Q=10\text{ml}/\text{min}$; $d=7.5\text{cm}$; $\text{pH}=8.5$	DCO : 97% Phénol : 100% Crésols : 100%
Safari et al., (2016)	Eaux usées d'une raffinerie de pétrole	DCO, Carburant	Batch Al-Fe / mpp	$V=2\text{l}$, $d=2\text{cm}$ $J=3.125\text{mA}/\text{cm}^2$, $t=40\text{min}$, $\text{pH}=7.4$, $U=10.5\text{v}$	DCO : 99.1% Gazoil : 98.8% EEC : 6.47 kWh/m^3

I.6. Conclusion sur la bibliographie

Suite à cette étude bibliographique, il s'avère que l'application de l'EC a connu des applications dans des domaines très divers (industries des colorants, textile, traitement de surface, l'agroalimentaire ...), contribuant à l'élimination de plusieurs composés d'origines différentes.

Ce chapitre nous a permis de voir un certain nombre de points peu ou pas assez étudiés dans la littérature et qui sont pourtant importants. La majorité des travaux effectués en cas continu, les débits d'alimentation sont faibles et sans recirculation pour avoir des taux d'abattement supérieurs à 80 %. La seule source d'énergie utilisée dans la littérature est l'énergie électrique avec connexion monopolaire à deux électrodes. C'est dans cette problématique que nous allons aborder notre étude en utilisant l'EC en réacteur continu en vue d'élimination certains types de polluants, tels que, les colorants utilisés dans l'industrie de textile en Algérie par application de plusieurs modes de connexion des électrodes, afin de voir le plus performant du point de vue efficacité d'élimination de la pollution avec une faible consommation d'énergie électrique.

Chapitre II

Matériel et méthodes

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel et les méthodes utilisés pour mener nos expériences. Cette partie présentera aussi une description des méthodes d'analyses et des outils utilisés pour l'évaluation des performances du procédé.

Le but de ce chapitre est d'étudier l'effet de quelques paramètres sur les performances de la technique d'EC, tels que, la densité de courant j , le temps de traitement t , l'échantillonnage, le mode de connexion et le nombre des électrodes pour l'élimination d'un colorant rouge utilisé dans l'industrie de textile (Rouge nylosan - Acid Red 336).

Les paramètres tels que le pH initial, la conductivité κ , le débit d'alimentation Q et la concentration initiale C_i ont été étudiés et optimisés lors des précédents travaux [20-23].

II.2. Choix du procédé

Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographie, assez peu d'études ont été réalisées en réacteur continu et avec plusieurs modes de connexion des électrodes. Le dispositif d'électrocoagulation utilisé est conçu au laboratoire, et il est constitué de deux compartiments. Le premier est une cellule électrochimique munie des électrodes planes parallèles disposées verticalement. Tandis que le deuxième est une chambre de séparation physique (décantation-flottation) (Fig. II.1).

Dans le premier compartiment dont le volume est de **3.1 L** s'effectue la formation des bulles et du complexe bulle-particule, où le rendement de séparation peut atteindre un pourcentage élevé et on assiste à un mouvement Co-courant de liquide et de flux de bulles formées.

Le liquide prétraité est ensuite véhiculé par débordement à travers un déversoir qui présente à sa partie supérieure une rainure triangulaire vers le deuxième compartiment d'un volume de **5.5 L** où il se produit un traitement final plus poussé. Dans le deuxième compartiment on assiste à une décantation et une flottation. La prise d'échantillonnage s'effectue à la sortie du premier et du deuxième compartiment.

Pendant les essais, des prélèvements ont été effectués à des intervalles de temps choisis pendant toute la durée de chaque essai. Les paramètres suivis sont :

- Potentiel d'hydrogène (pH)
- La conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- La température ($^{\circ}\text{C}$)
- La tension électrique (volt).

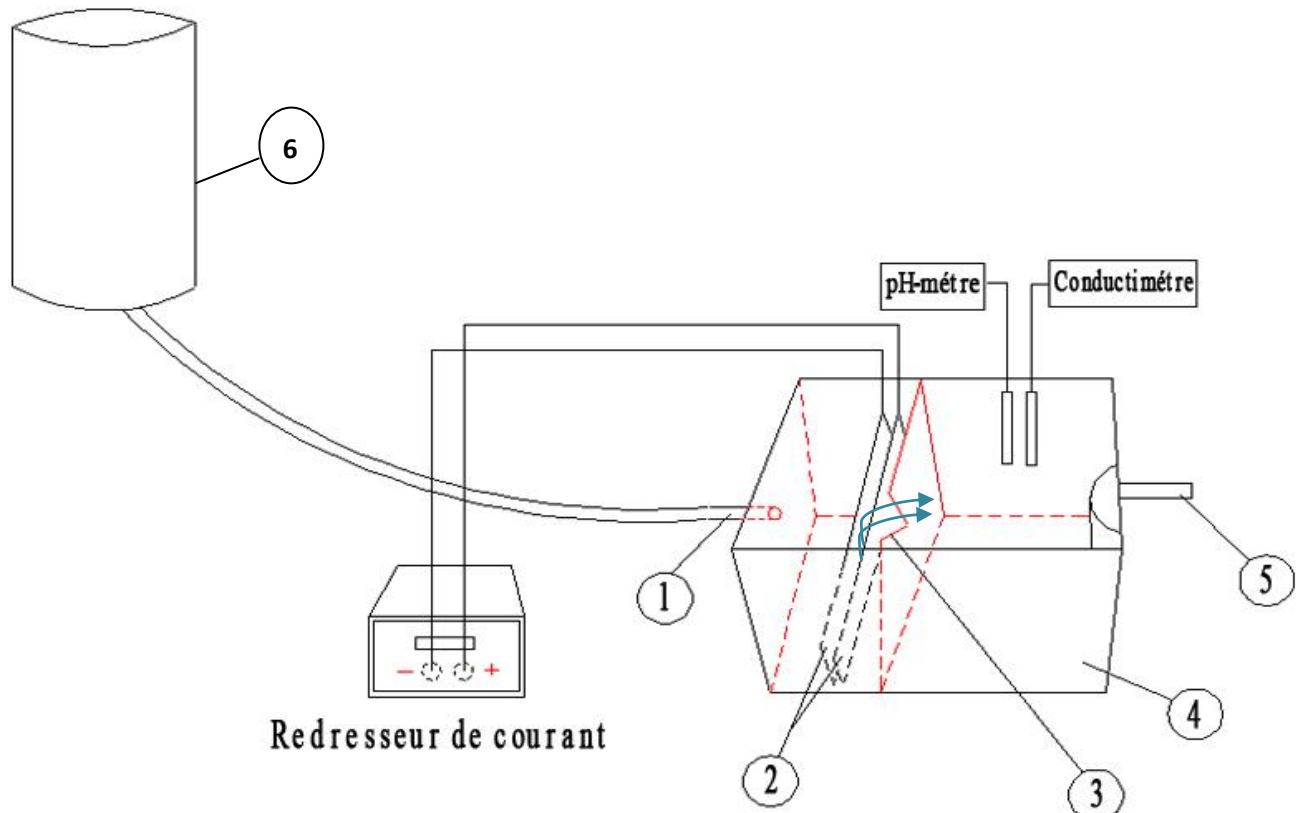


Figure II.1 : Schéma du dispositif expérimental d'EC-EF en régime continu

(1 : Entrée d'eau à traiter au premier compartiment, 2 : Électrodes en aluminium, 3 : Déversoir, 4 : Chambre de séparation (décantation – flottation), 5 : Sortie d'eau traitée, 6 : Réservoir de stockage de l'eau à traiter).

II.3. Méthodologie

Le réacteur est constitué d'un seul bloc principal mais séparé en deux : une partie électrochimique et une partie séparation physique. L'effluent synthétique s'écoule gravitairement dans la cellule électrochimique contenant des plaques d'aluminium (pureté de Al était 98 %) utilisées comme électrodes (dimension 240*20*10 mm) et déposées verticalement. Les électrodes sont plongées dans la solution qui s'écoule dans le réacteur en plexiglas. L'écart entre les deux électrodes a été maintenu constant à 10 mm pour toutes les expériences [24].

Les électrodes sont reliées à un générateur d'alimentation électrique continu (GPS3303_{3CH}) fournissant une tension entre 0 et 30 V et un courant dans la gamme de 0 à 3 A.

Les modes de connexion étudiés sont (Fig. II.2) :

- a) Connexion monopolaire à 2 électrodes (MP)
- b) Connexion bipolaire à 4 électrodes (BP)
- c) Connexion monopolaire en série à 4 électrodes (MP-S)
- d) Connexion monopolaire en parallèle à 4 électrodes (MP-P)
- e) Connexion monopolaire en série à 6 électrodes (MP-S).

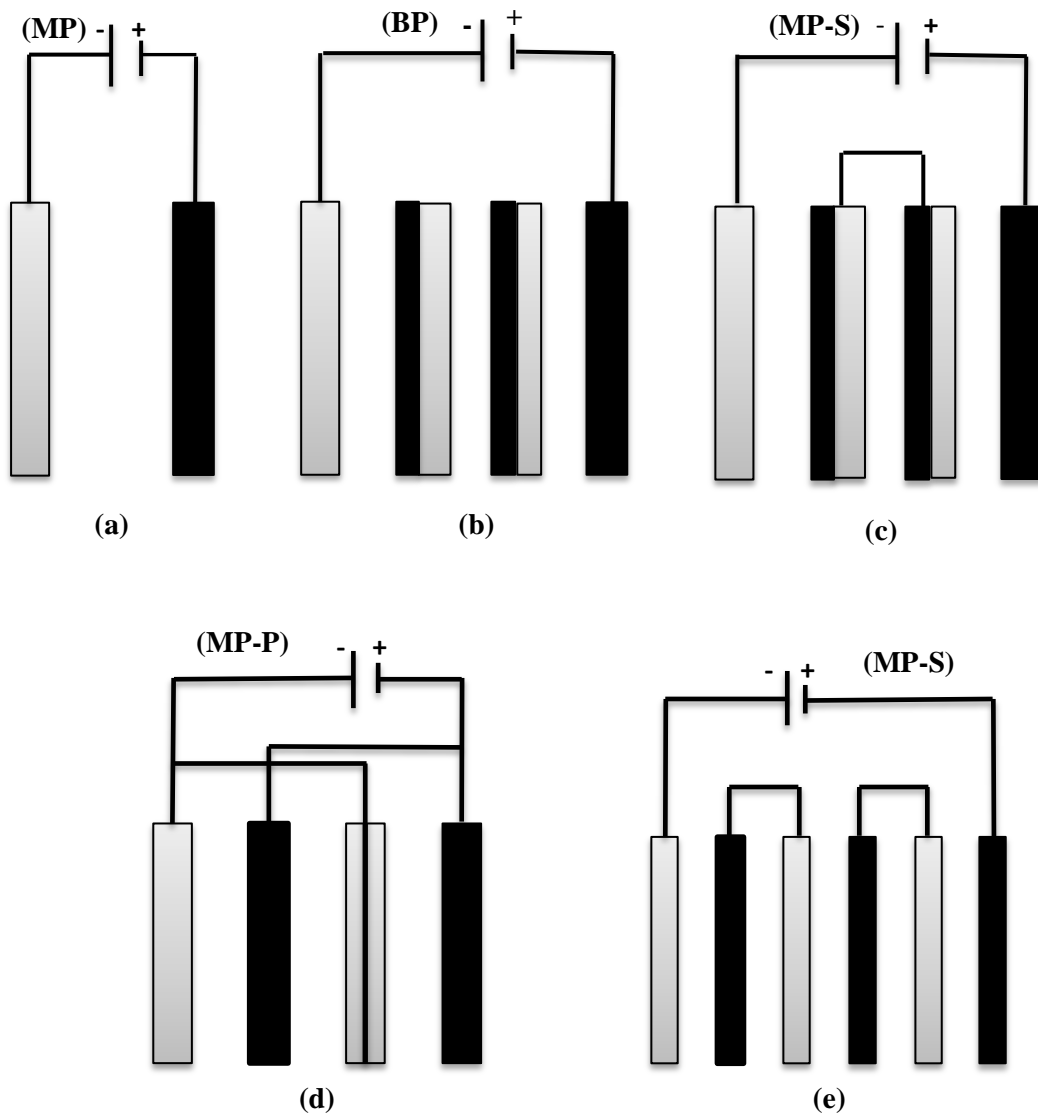


Figure II.2 : Les cinq modes de connexion d'électrodes étudiés

II.4. Caractéristiques du colorant Rouge Nylosan

Le colorant Rouge Nylosan N-2RBL (Acid Red 336) est un colorant anionique (acide) azoïque, portant un groupement de type sulfonate (SO_3^-). Il est cristallisé sous la forme de son sel de sodium [20,22,23]. Son nom selon la nomenclature est sodium 6-amino-5-[[4-chloro-3-[(2,4-diméthylphényl) amino] sulphonyl] phényl]azo]-4-hydroxynaphthalène-2-sulphonate (formule chimique : $\text{C}_{24}\text{H}_{21}\text{ClN}_4\text{O}_6\text{S}_2,\text{Na}$). Sa structure chimique est représentée sur la Figure (II.3) et ses caractéristiques sont regroupées dans le Tableau II.1. Ce colorant nous a été fourni par la société TINDAL (Toiles Industrielles Algériennes) de M'sila. Ses caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau II.1 : Propriétés du Rouge Nylosan N-2RBL

Index de Couleur : C.I.	Acid Red 336
Formule chimique	$\text{C}_{24}\text{H}_{21}\text{ClN}_4\text{O}_6\text{S}_2, \text{Na}$
Poids moléculaire ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	587,97
λ_{max} (nm)	502

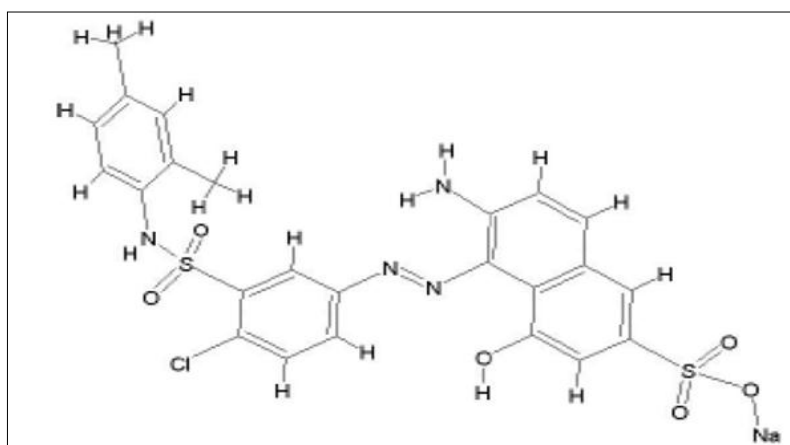


Figure II.3 : Formule développée du Rouge Nylosan

II.4.1. Spectre d'absorption en UV-visible

Le spectre d'absorption en UV-visible (Fig. II.4) du colorant Rouge Nylosan N-2RBL (Acid Red 336) a été obtenu par un balayage spectral, entre 200 et 800 nm, d'une solution de colorant à 100 mg/L. Ce spectre montre bien la longueur d'onde du maximum d'absorption de Rouge Nylosan N-2RBL ($\lambda_{\text{max}} = 502 \text{ nm}$).

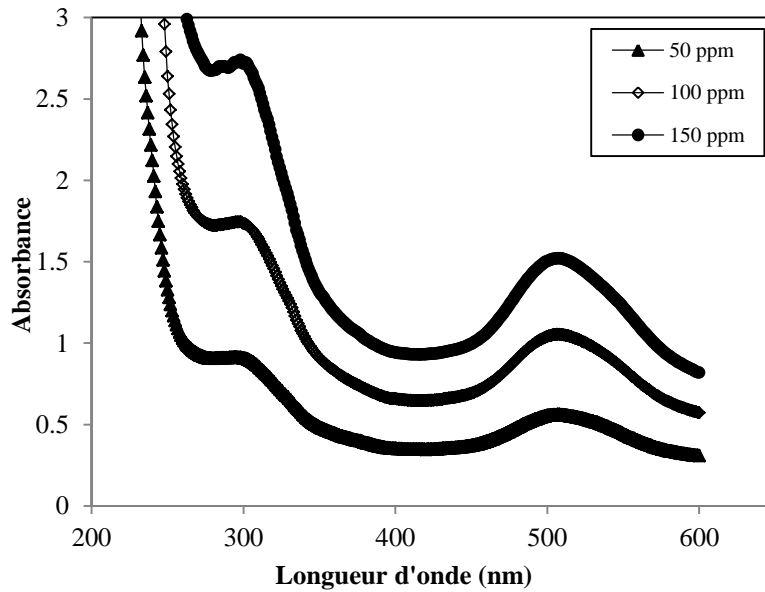


Figure II.4 : Spectre d'absorption UV-visible du colorant étudié

Les concentrations des solutions du Rouge Nylosan N-2RBL ont été analysées en mesurant leurs absorbances à une longueur d'onde maximale A_{502} ($\lambda_{\max} = 502 \text{ nm}$).

Une courbe d'étalonnage des absorbances en fonction des concentrations en Rouge Nylosan N-2RBL a été obtenue en utilisant des solutions de Rouge Nylosan N-2RBL de concentrations comprises entre 0,5 et 200 mg/L. Les données expérimentales rapportées sur la figure suivante indiquent une relation linéaire entre l'absorbance et la concentration.

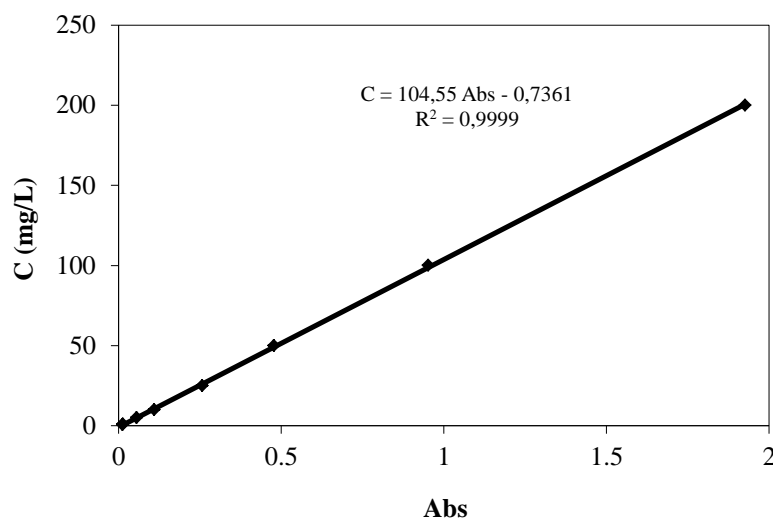


Figure II.5. Courbe d'étalonnage du colorant au maximum d'absorption

II.5. Méthodes analytiques

Les expériences concernant le rejet de textile ont été réalisées avec des solutions synthétiques préparées à base d'un colorant en poudre rouge Nylosan N-2RBL (Acid Red 336). Pour suivre le traitement des effluents, on a mesuré en ligne des caractéristiques des effluents (pH, conductivité, température), et analysé la phase clarifiée après traitement. Ces analyses incluent les indicateurs de la dépollution (Turbidité, Absorbance) et la consommation des électrodes par pesée.

Durant toute la durée des manipulations, nous avons effectué des prélèvements, et avant d'être analysés par le spectrophotomètre *UV-visible* et le turbidimètre, les échantillons ont subi des décantations de 24 heures.

II.5.1. Suivi des paramètres en ligne

Les pH des échantillons prélevés sont mesurés par un pH mètre "Hanna, pH210" muni d'une électrode en verre contenant une solution de KCl de concentration 4M. La tension aux bornes des électrodes est enregistrée en continu. Le pH initial a été varié entre 3,46 et 9 en utilisant une solution de HCl (0,1 N) ou une solution de NaOH (2N).



Figure II.6 : Microprocesseur pH Mètre "Hanna pH 210"

Les mesures de conductivité sont effectuées à l'aide d'un conductimètre "Hanna, EC214 conductimètre".



Figure II.7 : Conductimètre "Hanna, EC214"

II.5.2. Analyse chimique

Les mesures des indicateurs de la dépollution (turbidité, absorbance) sont effectuées sur les échantillons prélevés.

a. Mesure de la turbidité et de l'absorbance

La turbidité et l'absorbance sont mesurées après 24 heures de décantation et sur le surnageant clair. Nous avons utilisé un appareil de type Hanna instruments "HI88703" comportant une diode infrarouge de longueur d'onde 890 nm et un détecteur de lumière réfléchi qui est un appareil à lecture directe pour la mesure de la turbidité. La mesure est basée sur l'absorption par les particules en suspension. L'unité utilisée pour la turbidité est la Néphélométrie Turbidity Unit (NTU).



Figure II.8 : Turbidimètre Hanna "HI88703"

L'absorbance des différents prélèvements se mesure sur le surnageant clair. Ces mesures se font en spectrométrie UV visible de marque Shimadzu-2401 après la prise de ligne de base avec de l'eau déminéralisée (Fig.II.9). L'absorbance permet d'estimer la coloration des effluents de façon indirecte.



Figure II.9 : Dispositif représentant le spectrophotomètre UV visible utilisé

Le rendement d'élimination de la turbidité **Turb** (%) est déterminé par la relation suivante :

$$\mathbf{Turb} \text{ (\%)} = \frac{(\mathbf{Turb}_i - \mathbf{Turb}_f)}{\mathbf{Turb}_i} \cdot 100$$

\mathbf{Turb}_i et \mathbf{Turb}_f sont les turbidités de la solution avant et après traitement par EC, en NTU.

L'efficacité d'élimination de la couleur **Abs** (%) est exprimée comme suit:

$$\mathbf{Abs} \text{ (\%)} = \frac{(\mathbf{Abs}_i - \mathbf{Abs}_f)}{\mathbf{Abs}_i} \cdot 100$$

\mathbf{Abs}_i et \mathbf{Abs}_f sont les absorbances de la solution avant et après traitement par EC.

II.6. L'énergie consommée

La consommation d'énergie spécifique par kg de colorant éliminé (E_{dye}), la consommation spécifique des électrodes par kg de colorant (μ_{Al}) et la consommation d'énergie par m³ d'eau traitée (E_{eau}) sont calculées par les équations suivantes, respectivement [20,22,23]:

$$E_{\text{dye}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kgdye}} \right) = \frac{UI}{1000Q(C_i Y_{\text{COL}})}$$

$$\mu_{\text{Al}} \left(\frac{\text{kgAl}}{\text{kgdye}} \right) = \frac{M_{\text{Al}} I \phi_{\text{Al}}}{3F} \frac{1}{Q(C_i Y_{\text{COL}})}$$

$$E_{\text{eau}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) = \frac{UI t}{V}$$

La concentration initiale en colorant C_i est en kg/m³, l'intensité de courant I est en ampère (A), la tension U entre les électrodes est en volt (V), le débit d'alimentation Q en m³/h, la masse molaire de l'aluminium M_{Al} (0.027 kg/mol), la constante de Faraday F (96487 C/mol), t est le temps de traitement (s) et le rendement faradique ϕ_{Al} de la dissolution d'aluminium. ϕ_{Al} est estimé par le rapport de la perte de masse effective des électrodes lors des expériences Δm_{exp} à la masse théorique d'aluminium libérée à l'anode Δm_{th} :

$$\phi_{\text{Al}} = \frac{\Delta m_{\text{exp}}}{\Delta m_{\text{th}}} = \frac{3F}{M_{\text{Al}} I t} \Delta m_{\text{exp}}$$

Le rendement faradique ou l'efficacité de courant sont deux dénominations du même paramètre (ϕ_{Al}) ; il dépend fortement de l'évolution du pH de la solution et des espèces qui y sont présentes,

par exemple de la coexistence d'autres anions [20,25]. Il est souvent supérieur à l'unité (01) en raison de la dissolution chimique du métal.

II.7. Les électrodes utilisées

Les électrodes utilisées sont en aluminium d'une pureté d'environ 98 % (Fig. II.10). Leur conductivité électrique est de l'ordre de $38,2 \cdot 10^6$ mS/cm. Le métal des électrodes peut être obtenu par récupération des déchets d'aluminium, ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution.

Les deux plaques parallèles et rectangulaires d'aluminium, ont été préalablement traitées avec un papier abrasif au niveau de leur surface, dans le but d'homogénéiser celles-ci et d'éliminer les impuretés et les dépôts qui peuvent les contaminer. Les électrodes sont extraites du réacteur, après chaque manipulation d'électrocoagulation dans le but de les examiner, et de les nettoyer, étant donné que les résidus de décomposition des polluants peuvent se déposer sur leur surface.

Le nettoyage s'effectue avec une solution d'acide chlorhydrique de 0.2 N, permettant ainsi de d'éliminer les dépôts des polluants pouvant former une couche résistante sur la surface.

La figure (II.10) représente la composition élémentaire du métal des électrodes réalisée par microscope électronique à balayage (MEB) [20,22,23].

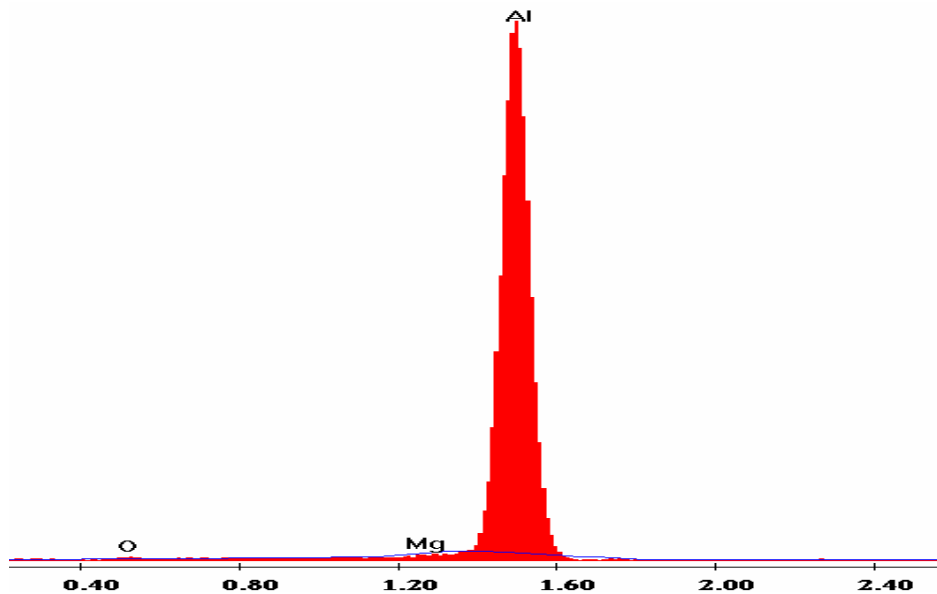


Figure II.10 : Composition élémentaire du métal des électrodes utilisées par MEB

Chapitre III

Résultats et discussions

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction

Cette partie du travail est consacrée à l'évaluation de l'efficacité de la technique d'électrocoagulation en réacteur continu, pour l'élimination de la couleur et de la turbidité d'un colorant (rouge nylosan) utilisé dans l'industrie de textile (rouge nylosan).

Des essais ont été effectués pour étudier les effets des paramètres de fonctionnement du procédé, tels que, la densité de courant j , le temps de traitement t , le mode de connexion des électrodes et le lieu de la prise des échantillons.

III.2. Influence de la densité de courant

La densité de courant (j) est le rapport entre l'intensité de courant appliquée aux bornes des électrodes (I) en ampère sur la surface active des électrodes (S) en m^2 ($j = I/S$).

Elle est considérée comme l'un de paramètres clés de l'EC [20,26-28]. Lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des bulles d'hydrogène (H_2) augmente et leur taille diminue lorsque la densité de courant augmente. Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation.

Lors des travaux précédents, des densités de courant (100, 200, 300 et 400 A/m^2) ont été testées [23,29]. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la densité de courant de 100 à 400 A/m^2 a engendré une augmentation de l'efficacité de décoloration de 88,96 à 94,55 % pour l'absorbance et 93,78 à 97,88 % pour la turbidité après 60 min de traitement. Ceci est prévisible : quand la densité de courant augmente, la quantité de cations d' Al^{3+} libérée par l'anode et donc de particules d' $Al(OH)_3$ augmentent également. Cependant, la différence entre les courbes correspondant aux différentes densités de courant devient petite lorsque j est supérieure à 200 A/m^2 . En conséquence, une densité de courant de 300 A/m^2 correspondant à une intensité de courant $I = 1.44 A$ a été maintenue pour mener toutes les prochaines expériences.

III.3. Influence du point d'échantillonnage

Afin de voir si le lieu de la prise des échantillons a un effet sur le fonctionnement de notre réacteur, des prises d'échantillons ont été effectuées à la sortie du premier compartiment (Comp.1), c'est-à-dire, au niveau du déversoir de la chambre d'électrolyse, et à la sortie du deuxième compartiment (Comp.2), ie, à la sortie de la chambre de décantation-flottation (Fig. II.1).

Pour une connexion monopolaire à deux électrodes, et sous une densité de courant de 300 A/m^2 , une concentration initiale du colorant $C_i = 50 \text{ mg/L}$, un pH initial de 7.75 et un débit d'écoulement $Q = 15 \text{ L/h}$, les résultats trouvés sont représentés sur les figures suivantes.

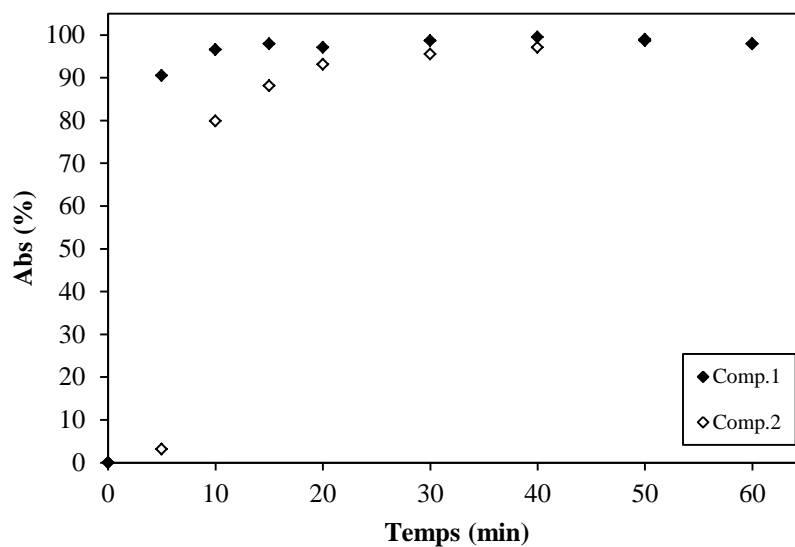


Figure III.1 : Taux d'élimination de la couleur dans les deux compartiments: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 7.75, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 1200 \text{ }\mu\text{S/cm}$

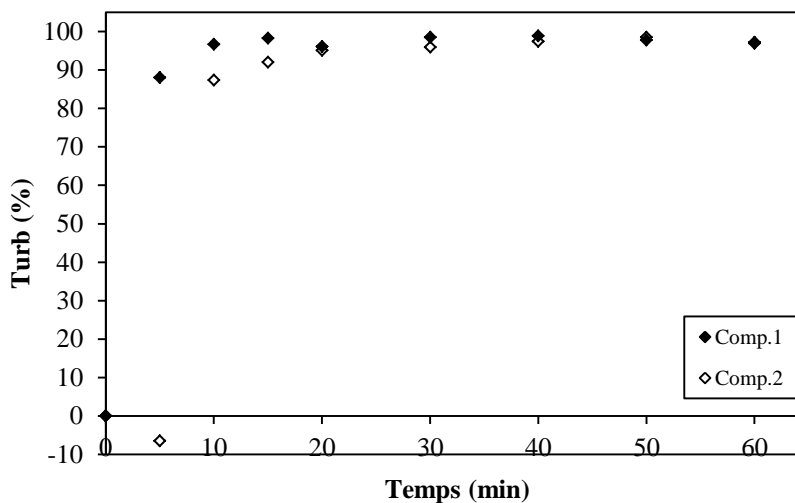


Figure III.2 : Taux d'élimination de la turbidité dans les deux compartiments: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 7.75, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 1200 \text{ }\mu\text{S/cm}$

D'après les résultats trouvés (Figs. III.1 et III.2), on voit que les taux d'abattement de la couleur et de la turbidité sont presque les mêmes pour les deux compartiments, surtout après 35 min de traitement qui est le temps de séjour de l'effluent dans le réacteur. Ainsi, pour la suite des expériences, les échantillons seront pris à la sortie du réacteur.

III.4. Effet du mode de connexion des électrodes

Cinq modes de connexion des électrodes ont été étudiés (monopolaire MP à 2 électrodes, bipolaire BP à 4 électrodes, monopolaire en parallèle MP-P à 4 électrodes, et monopolaire en série MP-S à 4 et à 6 électrodes). Les résultats trouvés sont les suivants.

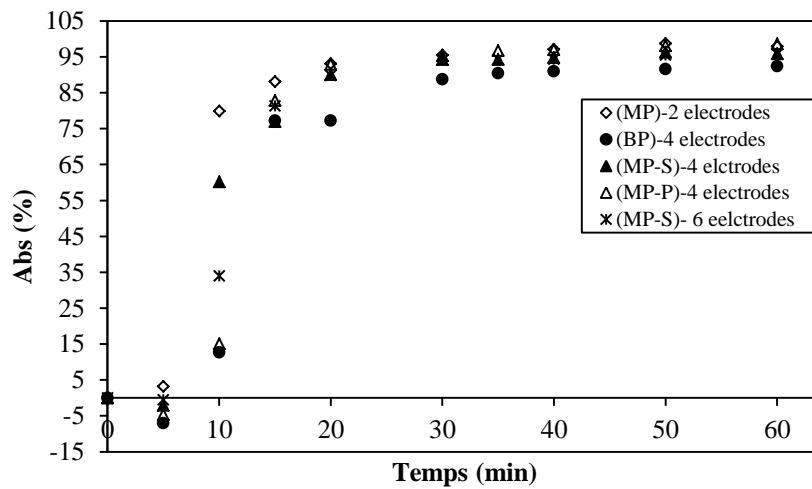


Figure III.3 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50$ mg/L, $j = 300$ A/m², pH initial = 8.03, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3900$ μ S/cm

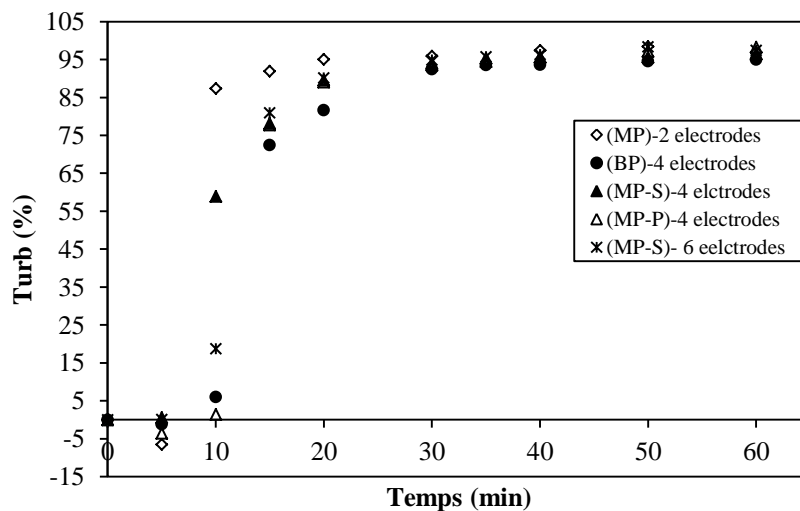


Figure III.4 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50$ mg/L, $j = 300$ A/m², pH initial = 8.03, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3900$ μ S/cm

Les figures (III.3 et III.4) montrent que le temps requis pour atteindre les valeurs optimales, correspondant aux valeurs sur le plateau, et devient presque constant à environ 35 min, qui est le temps de séjour de l'effluent dans le réacteur.

Selon ces résultats, notre réacteur a bien fonctionné pour tous les modes de connexion étudiés.

On constate que les taux d'élimination les plus élevés sont obtenus avec les connexions monopolaires, quel que soit le nombre d'électrodes et le mode de connexion (Tableau III.1).

L'efficacité négative de la réduction de la turbidité et de l'absorbance au début de traitement peut être due au fait que durant le passage du courant électrique, une convection additionnelle apparaisse. Selon Edeline [30] l'aluminium dissous se polymérise sous la forme d'hydroxyde d'aluminium et augmente ainsi la turbidité.

Tableau III.1 : Taux d'élimination de la couleur et de la turbidité après 35 min de traitement

Mode de connexion	$j = 300 \text{ (A/m}^2\text{)}$	
	Abs (%)	Turb (%)
(MP) 2 électrodes	97.08	97.39
(BP) 4 électrodes	90.42	93.52
(MP-S) 4 électrodes	94.24	94.43
(MP-P) 4 électrodes	96.72	95.37
(MP-S) 6 électrodes	95.75	94.33

III.5. Energie consommée

De nombreux travaux sur l'électrocoagulation ont porté sur la consommation énergétique en termes d'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) [20,31]. Cette énergie a souvent été étudiée en fonction des paramètres de l'EC d'une façon générale.

Du point de vue efficacité, les deux modes de connexions (MP-P et MP-S) ont donné des résultats satisfaisants, avec des rendements supérieurs à 90 %.

L'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}), la consommation spécifique des électrodes par kg de colorant (μ_{Al}) et la consommation d'énergie par m³ d'eau traitée (E_{water}) sont calculées par les équations citées dans le chapitre (II), section (II.6).

Les allures de ces trois paramètres sont représentées sur les figures ci-après.

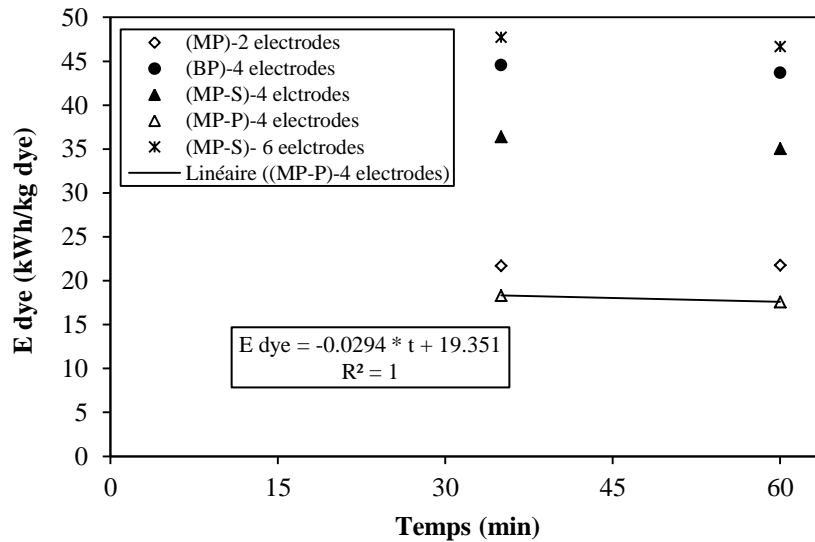


Figure III.5 : Evolution de l'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) en fonction du temps : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} \approx 8$, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2900 \text{ } \mu\text{S/cm}$

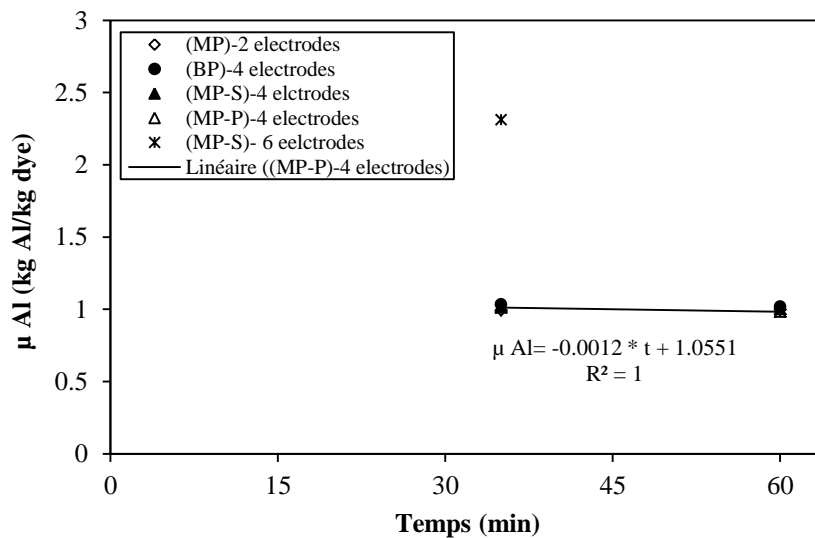


Figure III.6 : Evolution de la consommation des électrodes (μ_{Al}) en fonction du temps: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} \approx 8$, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$

Les figures (III.5 à III.7) montrent que E_{dye} et μ_{Al} ne dépendent que de la densité de courants et non du temps de traitement. Ce qui signifie que la diminution de la durée de traitement ne compense pas l'augmentation de la densité de courant sur la consommation énergétique. E_{dye} ne représente qu'une fraction des coûts de l'opération d'électrocoagulation, entre 20 et 50 % [25]. Selon cet auteur, le coût principal est dû à la consommation du matériau des électrodes. Par contre E_{water} dépend beaucoup plus du temps (Fig. III.7). Une densité de courant élevée conduit à une consommation élevée du métal des électrodes (μ_{Al}) et de l'énergie E_{dye} par l'effet de joule ;

ce qui engendre un coût élevé du procédé. Même constat en cas où les modes de connexion (BP à 4 électrodes, MP-S à 4 électrodes et MP-S à 6 électrodes) sont utilisés.

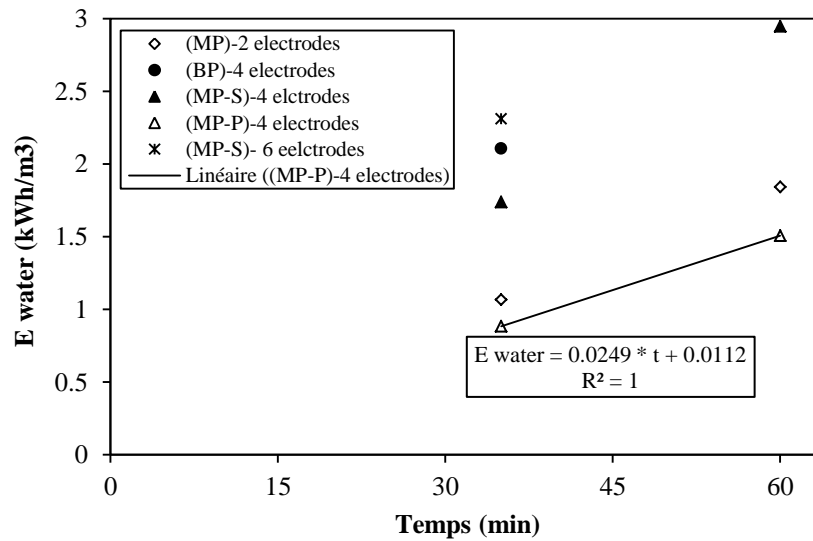


Figure III.7 : Evolution de l'énergie par m³ d'eau traitée (E_{water}) en fonction du temps :
 $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} \approx 8$, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2900 \text{ } \mu\text{S/cm}$

III.6. Evolution du pH au cours de l'EC

Le pH initial est l'un des principaux paramètres jouant un rôle important dans l'efficacité de l'EC. Son évolution dépend du pH initial.

La tendance du pH final à se rapprocher de la neutralité ($\text{pH} = 7$) et sans ajout d'aucun réactif chimique constitue un avantage considérable pour la technique d'EC. La formation de l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui joue le rôle d'un coagulant est favorisée dans cette gamme de pH (5 – 9).

Ceci montre que le procédé de l'EC a un certain pouvoir tampon en raison d'une balance entre la production et la consommation de OH^- et du besoin de la neutralisation de la charge avant la transformation finale des composés solubles d'aluminium sous forme d' $\text{Al}(\text{OH})_3$ [26], qui empêche le changement élevé du pH de la neutralité, comme le montre la figure (III.8).

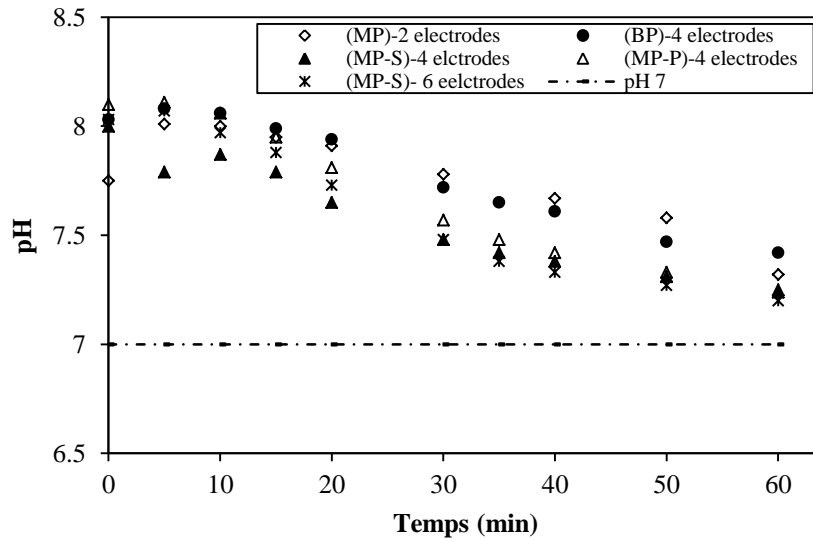


Figure III.8 : Evolution du pH au cours de l'EC: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 1306 \text{ } \mu\text{S/cm}$

III.7. Evolution de la tension entre les électrodes au cours de l'EC

La figure (III.9) nous résume l'effet de la densité de courant ($j = 300 \text{ A/m}^2$) et de la connexion électrique sur l'évolution de la tension entre les électrodes en fonction du temps.

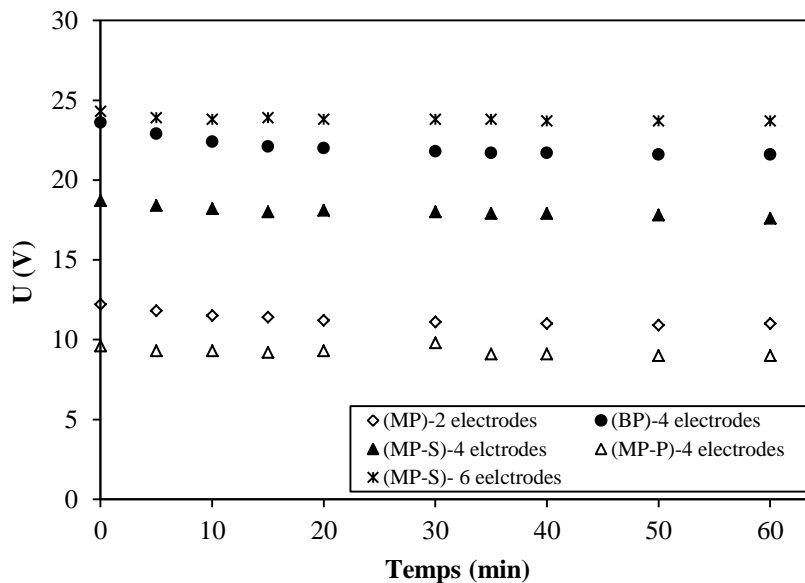


Figure III.9 : Effet de la connexion électrique sur la tension entre les électrodes : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 1306 \text{ } \mu\text{S/cm}$

La tension de cellule représente la valeur relevée de la tension sur le générateur stabilisé. Cette valeur de tension est fonction de l'intensité de courant, du matériau d'électrode, de l'effluent et de la connexion électrique des électrodes. Pour un effluent dont la conductivité est élevée, la tension est faible s'il n'y a pas de dépôt sur la surface des électrodes qui empêchent le passage du courant [32].

Comme il a été déduit lors du calcul des différentes énergies, la connexion monopolaire parallèle (MP à 2 électrodes et MP-P à 4 électrodes) est plus efficace par rapport aux autres connexions. Ceci est dû au fait que la tension dans ce cas est presque à un tiers (1/3) des autres modes (BP à 4 électrodes et MP-S à 4 et 6 électrodes).

III.8. Evolution de la température au cours de l'EC

Pour voir l'influence du mode de connexion sur l'évolution de la température, nous avons enregistré toutes les valeurs des températures pour chaque pas de temps d'échantillonnage durant toutes les expériences réalisées. La figure ci-après nous résume l'allure de l'évolution de la température pour chaque mode de connexion.

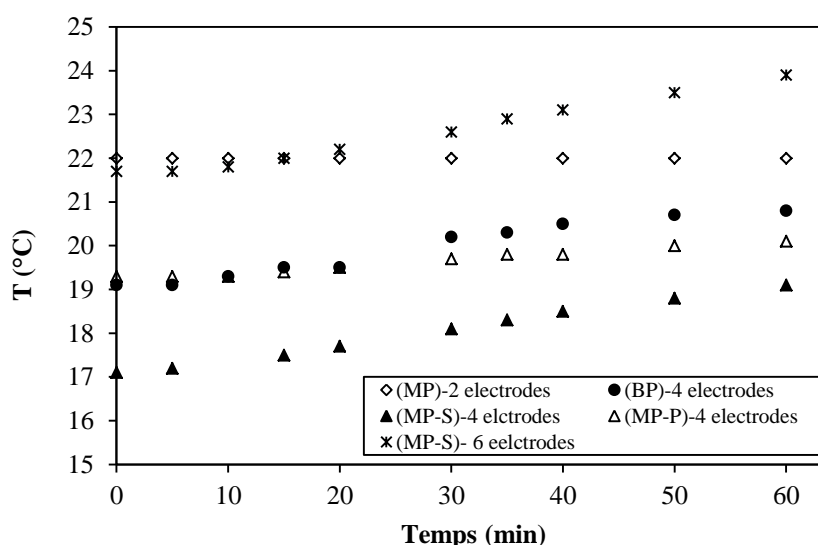


Figure III.10 : Effet de la connexion électrique sur l'évolution de la température : $C_i = 50$ mg/L, $j = 300$ A/m², $Q = 15$ L/h, $\kappa = 1306$ μ S/cm

D'après les résultats obtenus, malgré que les valeurs des tensions appliquées sont relativement élevée (MP-S avec 6 électrodes : 24.3 V) ont augmenté légèrement les températures (de 21.7 à 23.9 °C), et après une heure de traitement les taux d'élimination de la couleur et de la turbidité restent élevés (95.7 % et 97.45 %) respectivement ; ce qui nous permet de dire que l'augmentation de la température n'a pas influencé le fonctionnement du procédé d'EC.

III.9. Rendement faradique (ϕ_{Al})

Afin de vérifier l'évolution du rendement faradique en fonction du temps de traitement par EC, nous avons mesuré la concentration en aluminium dissoute expérimentalement avant et après chaque essai, par pesée des électrodes (Δm_{exp}).

$$\phi_{Al} = \frac{\Delta m_{exp}}{\Delta m_{th}} = \frac{3F}{M_{Al}It} \Delta m_{exp}$$

La masse théorique d'Al consommée (Δm_{th}) est donnée par la relation :

$$\Delta m_{th} = \frac{ItM_{Al}}{3F}$$

Avec :

$\Delta m_{th, exp}$: masse d'Al dissoute (g)

I : intensité du courant imposé (A)

t : durée de traitement (s)

M_{Al} : poids moléculaire de l'élément considéré (g/mol)

F : constante de Faraday (96500 C/mol).

L'évaluation du rendement faradique pour $j = 300 \text{ A/m}^2$ est représentée sur la figure ci-après.

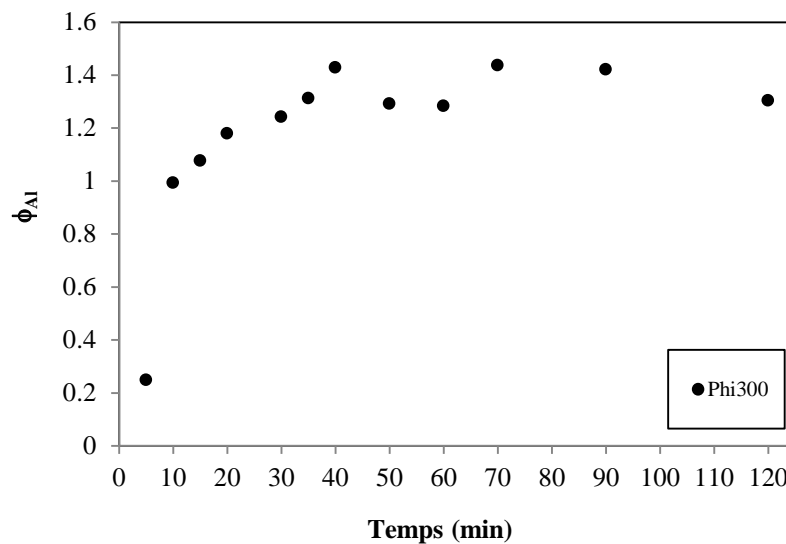
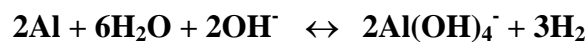


Figure III.11 : Evolution du rendement faradique au cours de l'EC (MP - 2 électrodes):

$$C_i = 50 \text{ mg/L}, j = 300 \text{ A/m}^2, Q = 15 \text{ L/h}, \kappa = 1306 \text{ }\mu\text{S/cm}$$

Le rendement faradique moyen est de 1,18 (118 %). Ce résultat pourrait s'expliquer par une oxydation anodique de l'Al qui conduisait simultanément à la formation d' Al^{3+} et Al^+ [33]. Similaire aux résultats rapportés dans d'autres travaux, 20% de la masse totale d'électrode dissoute est due à la dissolution chimique, et les 80% restants par dissolution électrochimique. Cette consommation peut également être due à l'hydrolyse chimique de la cathode selon l'équation suivante.



De plus, ce phénomène pourrait s'expliquer par le phénomène de corrosion et d'oxydation de la surface des électrodes. Le mécanisme de corrosion des électrodes suggérait une implication des ions chlorure. Ce mécanisme peut entraîner une plus grande production d'hydroxyde d'aluminium et de bulles d'hydrogène par rapport à la quantité qui devrait produire la réaction principale à l'anode [34].

La figure (III.12) confirme que la masse théorique est linéairement proportionnelle à la densité de courant (intensité appliquée). Pendant ce temps, la masse expérimentale varie proportionnellement à la densité de courant appliquée, mais elle est légèrement supérieure à la masse théorique. Cela a abouti à un rendement faradique supérieur à 100% après 10 min seulement.

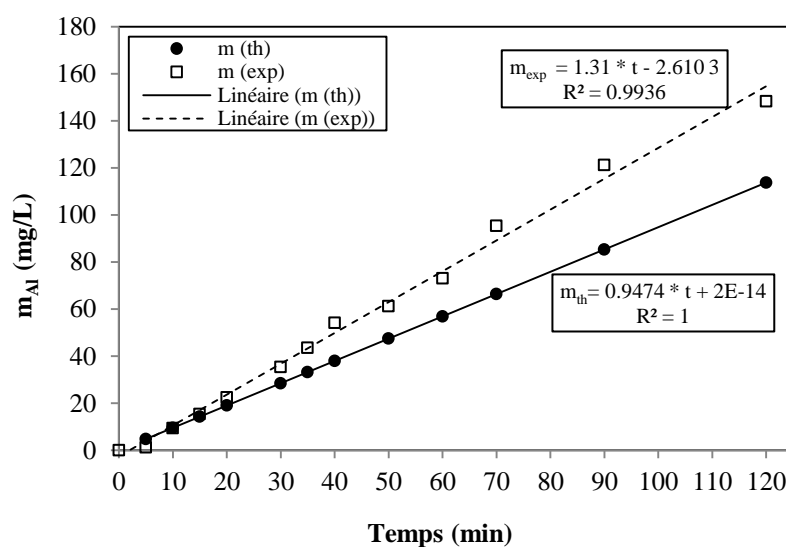


Figure III.12 : Concentration théorique et expérimentale d'Al au cours de l'EC: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 1306 \text{ }\mu\text{S/cm}$

III.10. Conclusion partielle

Une série d'expériences a été réalisée afin de trouver les effets des paramètres influençant l'EC pour l'élimination du colorant rouge nylosan.

Les résultats trouvés soulignent l'opportunité d'appliquer le procédé d'EC en continu pour une réduction efficace de la couleur en termes d'absorbance et de la turbidité pour tous les modes de connexions étudiés. Toutefois, la connexion monopolaire parallèle (MP-P) à 2 électrodes et à 4 électrodes est la plus efficace sur tous les plans y compris celui de la consommation énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La recherche bibliographique sur les techniques de traitement des effluents industriels liquides a montré que l'électrocoagulation (EC) est une technologie compacte, fiable et présente beaucoup d'avantages par rapport aux méthodes classiques. Ce procédé permet d'éliminer simultanément un large spectre de polluants organiques et minéraux, de colorants et de métaux lourds provenant des différents effluents réels ou synthétiques.

Malgré les nombreux travaux publiés sur cette technique, nous nous sommes efforcés de concentrer nos recherches sur des points spécifiques qui n'avaient été que peu ou pas étudiés.

Le premier point concerne l'étude de l'effet de différents paramètres de fonctionnement susceptibles d'influer le procédé, tels que, la densité de courant, le temps de traitement, le pH, le débit d'alimentation et la concentration initiale.

Le second point concerne l'effet du mode de connexion des électrodes (bipolaire BP, monopolaire en parallèle MP-P et monopolaire en série MP-S) et le nombre des électrodes.

Le troisième point est relatif au rendement faradique.

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'élimination du colorant rouge nylosan présent dans les effluents des industries de textile en utilisant un réacteur continu d'EC.

Les résultats expérimentaux ont montré que :

- La technique d'EC a été effectivement affectée par la densité de courant et le mode de connexion des électrodes.
- Le procédé d'EC a bien fonctionné pour tous les modes de connexion étudiés (de 90.42 à 97.39 % pour la turbidité, et de 92.39 à 98.63 % pour la couleur).
- Toutefois, la connexion monopolaire parallèle (MP-P) à 2 électrodes et à 4 électrodes est la plus efficace sur tous les plans y compris celui de la consommation énergétique.
- La tendance du pH final à se rapprocher de la neutralité et sans ajout d'aucun réactif chimique constitue un avantage considérable pour la technique d'EC.
- L'augmentation de la température engendrée par la connexion monopolaire en série avec 6 électrodes, n'a pas influencé le fonctionnement du procédé d'EC.
- Le rendement faradique moyen est supérieur à l'unité.

A titre de perspectives, plusieurs points sont à étudier :

- Couplage avec d'autres techniques de traitement, telles que, la coagulation-floculation et l'adsorption.
- Etude de l'influence de la position (horizontale et verticale) des électrodes et du matériau des électrodes.
- Etude et caractérisation des boues formées lors du traitement par EC pour une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation de la pollution.
- Etude des rendements faradiques en analysant l'Al par spectrométrie d'absorption atomique.
- Etude de l'effet des courants alternatif et pulsé.
- Etude d'élimination des métaux lourds par EC en continu.
- Intensification du procédé par ajout de coagulants naturels (*Figuier de Barbarie, Moringa Oleifera...*).
- Utilisation des énergies renouvelables (photovoltaïque) telle une source d'alimentation pour assurer l'autonomie énergétique du procédé.
- Etude approfondie de la variabilité des effluents réels.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] M. Bennajah, traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflottation en réacteur airlift. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, (2007).
- [2] M. Kobyas, E. Gengec, E. Demirbas, Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chem. Eng. Process.* 101 (2016), 87-100.
- [3] G.-P. Martineau, Maladies d'élevage des porcs. France agricole éditions, (1997).
- [4] J. Bensaid, Contribution à la dépollution des eaux usées par électrocoagulation et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université Mohammed 5 - Agdal, Maroc, (2009).
- [5] G.M. Gadd, Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84 (2009) 13–28.
- [6] W. Lemlikchi, Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de co-précipitation. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Tizi-Ouzou, (2012).
- [7] A. Reffas, Etude de l'adsorption de colorants organiques (rouge nylosan et bleu de méthylène) sur des charbons actifs préparés à partir du marc de café. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Constantine, (2010).
- [8] M.M. Nassar, M.S. El-Geundi, Comparative cost of colour removal from textile effluents using natural adsorbents. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, (1991).
- [9] L. Naidja, Elimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption. *Mémoire de Magister en Chimie*, Université de Constantine, (2010).
- [10] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant and P. Nigam, Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77 (2001) 247-255.
- [11] B. Merzouk, Etude expérimentale pour le traitement des eaux usées industrielles par électroflottation. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Bejaia, (2009).
- [12] N. Djerroud, Optimisation de traitement d'un rejet industriel par électrocoagulation-électroflottation et ajout d'un coagulant : Le mucilage de cladode d'*Opuntia ficus indica*. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Béjaia, (2020).
- [13] S. Zodi, B. Merzouk, O. Potier, F. Lapique, J.-P. Leclerc, Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor, *Sep. Purif. Technol.* 108 (2013) 215-222.
- [14] I. Zongo, J. Wéthé, B. Merzouk, A.H. Maiga, F. Lapique, J.-P. Leclerc, Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation. *European Journal of Scientific Research*, 62 (2) (2011) 216-235.
- [15] N. Adjeroud, Traitement des eaux usées par la technique d'électroflottation-électrocoagulation. Etude de l'extrait aqueux des raquettes de la plante: *Opuntia ficus indica*. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Bejaia, (2017).
- [16] D. Ghosh, C.R. Medhi, M.K. Purkait, Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. *Chemosphere*, 73 (2008) 1393–1400.
- [17] S. Zodi, Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation: application à l'industrie textile et papetière. *Thèse de Doctorat*, Université de Lorraine (France), (2012).

- [18] I. Zongo, Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. *Thèse de Doctorat*, Université de Nancy (France), (2009).
- [19] A. Amour, Etude de l'influence de la variabilité des rejets industriels liquides sur le traitement par électrocoagulation - électroflottation en réacteur continu. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Béjaïa, (2020).
- [20] A. Amour, B. Merzouk, J.-P. Leclerc, F. Lapicque, Removal of reactive textile dye from aqueous solutions by electrocoagulation in a continuous cell. *Desalination and Water Treatment*, 57 (2016) 22764–22773.
- [21] R. Boudjemaa, Etude de l'efficacité de l'élimination de la couleur par la technique d'électrocoagulation-électroflottation : Application au traitement des effluents industriels. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, (2013).
- [22] T. Tiaiba, Traitement d'un effluent simulé de l'industrie de textile par un réacteur continu d'électrocoagulation. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, (2015).
- [23] R. Zidelkhir, Application de la photovoltaïque pour le traitement d'un effluent industriel par électrocoagulation. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, (2016).
- [24] B. Merzouk, K. Madani, A. Sekki, Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique. *Desalination*, 228 (2008) 245-254.
- [25] M. Bayramoglu, M. Kobya, O.T. Can, M. Sozbir, Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37 (2004) 117-125.
- [26] B. Merzouk, B. Gourich, A. Sekki, K. Madani, Ch. Vial, M. Barkaoui, Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering Journal*, 149 (2009) 207-214.
- [27] B. Merzouk, K. Madani, A. Sekki, Using electrocoagulation–electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies. *Desalination*, 250 (2010) 573-577
- [28] M. Tiaiba, B. Merzouk, A. Amour, M. Mazour, J.-P. Leclerc & F. Lapicque, Influence of electrodes connection mode and type of current in electrocoagulation process on the removal of a textile dye. *Desalination and Water Treatment*, 73 (2017) 330–338.
- [29] A. Messaad et M. Abbas, Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, (2017).
- [30] F. Edeline, L'épuration physico-chimique des eaux, théorie et technologie. *Cebedoc Editeur Lavoisier, Tec. et Doc.* (1996).
- [31] N. Daneshvar, A.R. Khataee, A.R. Amani Ghadim, M.H. Rasoulifard, Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *Journal of Hazardous Materials*, 148 (2007) 566–572.
- [32] A. Attour, N.B. Grich, M.M. Tlili, M.B. Amor, F. Lapicque, J.-P. Leclerc, Intensification of phosphate removal using electrocoagulation treatment by continuous pH adjustment and optimal electrode connection mode. *Desalination and Water Treatment*, 57(28) (2016) 13255–13262.

- [33] T. Picard, G. Cathalifaud-Feuillade, M. Mazet, C. Vandensteendam, Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using aluminum electrodes. *Journal of Environmental Monitoring*, 2 (2000) 77–80.
- [34] M.S. Secula, I. Cretescu, S. Petrescu, Electrocoagulation treatment of sulfide wastewater in a batch reactor: Effect of electrode material on electrical operating costs. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11 (2012) 1485-1491.