

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 : HYDRAULIQUE URBAINE

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

Par: Abbas Meriem

et

Messaad Aicha

Intitulé

**Utilisation de l'électrocoagulation pour
l'élimination de colorants des eaux usées
de l'industrie textile**

Soutenu devant le jury composé de:

Berghout Ali

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Nebbar Mohamed Lakhdar

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Dédicace

*Je tiens à remercier chaleureusement Dr : Merzouk. B
qui présenter la mythologie de cette étude*



Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

+ Mes parents pour ces sacrifices afin d'atteindre mon but.



+ mes sœurs. Zahia et salima et Mes frères mokhtar



+ Toute ma famille.



+ Tous mes amis : mohamed tiaiba, hadjer chirin.



Remerciement



- ✚ *Au terme de cette étude, je tiens à exprimer mes vifs remerciements :*
- ✚ *Je tiens à remercier chaleureusement Dr : Merzouk. B qui présenter la mythologie de cette étude.*
- ✚ *Je tiens à remercier mon ami Mohamed tiaïba*
- ✚ *A tout le personnel des laboratoires d'hydraulique et de chimie de l'université de M'Sila.*
 - ✚ *A tout le corps enseignants et personnel de département d'hydraulique de l'université de M'Sila qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*
- ✚ *Aux membres de jury, dont j'espère qu'ils Trouveront en ce travail une réussite.*



✚ *Abbas meriem*
✚ *Aïcha messaad*

Dédicace

Je tiens à remercier chaleureusement **Dr : Merzouk. B**
qui présenter la mythologie de cette étude



Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

+ Mes parents pour ces sacrifices afin d'atteindre mon but.

+ mes sœurs. Katoum et fatima et noura

+ Toute ma famille.

+ Tous mes amis : mohamed tiaiba, hadjer tahi et samia, wahia , fatima, assia
amal. razika.



Remerciement



- ✚ *Au terme de cette étude, je tiens à exprimer mes vifs remerciements :*
- ✚ *Je tiens à remercier chaleureusement Dr : Merzouk. B qui présenter la mythologie de cette étude.*
- ✚ *Je tiens à remercier mon ami Mohamed tiaïba*
- ✚ *A tout le personnel des laboratoires d'hydraulique et de chimie de l'université de M'Sila.*
- ✚ *A tout le corps enseignants et personnel de département d'hydraulique de l'université de M'Sila qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*
- ✚ *Aux membres de jury, dont j'espère qu'ils Trouveront en ce travail une réussite.*



✚ *Abbas meriem*
✚ *Aïcha messaad*

SOMMAIRE

Introduction générale	1
 Chapitre I: Synthèse bibliographique	
I.1. Introduction.....	2
I.2. La pollution de l'eau	2
I.3. Généralités sur la pollution	2
I.3.1. Définition de la pollution	2
I.3.2. Résumé du concept de la pollution par le Comité scientifique de la Maison Blanche en 1965	2
I.3.3. Les sources de la pollution	3
I.3.3.1. La source urbaine.....	3
I.3.3.2. La source industrielle.....	3
I.3.3.3. La source agricole.....	4
I.3.3.4. La source naturelle.....	4
I.3.3.5. Source microbiologique.....	4
I.3.4. Les paramètres de pollution	4
I.3.4.1. Paramètres physiques	4
I.3.4.2. Paramètres chimique.....	5
I.3.4.3. Paramètres organoleptiques	6
I.3.4.4. Paramètres biologiques	7
I.3.5. Description succincte de l'industrie textile	7
I.3.6. Utilisation de l'eau dans l'industrie textile	8
I.3.7. Caractéristiques des effluents industriels textiles.....	9
I.3.8. Conséquences de la pollution	10
I.4. Généralités sur les colorants	11
I.4.1. Les colorants	11
I.4.2. Classification des colorants	12
I.4.3. Classification selon la constitution chimique.....	13
I.4.3.1. Les colorants azoïques.....	13
I.4.3.2. Les colorants anthraquinoniques	13
I.4.3.3. Les colorants indigoïdes	14
I.4.3.4. Les colorants xanthènes.....	14
I.4.3.5. Les phtalocyanines	14
I.4.3.6. Les colorants nitrés et nitrosés.....	14
I.4.3.7. Les colorants triphénylméthane	15
I.4.4. La coloration textile	15
I.4.5. Impacts des colorants sur l'environnement.....	16

I.4.6. Nécessité de traiter les effluents textiles	17
I.5. Le procédé d'électrocoagulation	17
I.5.1. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation (EC)	17
I.5.2. Principe du procédé.....	19
I.5.3. Paramètres influençant le procédé d'EC	22
I.5.4. Les différents modes de connexions électriques	22
I.5.5. Principales lois d'électrolyse.....	25
I.5.6. Rendement faradique (ϕ).....	25
I.5.7. Avantages et inconvénients du procédé d'EC.....	26
I.5.8. Principales applications d'EC	27
I.6. Conclusion sur la bibliographie	31

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.1. Introduction	32
II.2. Choix du procédé.....	32
II.3. Méthodologie.....	33
II.4. Caractéristiques du colorant Rouge Nylosan.....	34
II.4.1. Spectre d'absorption en UV-visible.....	35
II.5. Méthodes analytiques	36
II.5.1. Suivi des paramètres en ligne	36
II.5.2. L'analyse chimique.....	38
II.6. L'énergie consommée.....	39
II.7. Les électrodes utilisées	40

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction	42
III.2. Effet du mode de connexion des électrodes	42
III.2.1. Influence de la densité de courant	42
III.2.2. Energie consommée.....	46
III.2.3. Evolution du pH au cours de l'EC.....	48
III.2.4. Evolution de la tension entre les électrodes au cours de l'EC	49
III.3. Effet de la recirculation de l'effluent à traiter	50
III.4. Conclusion.....	52

Conclusion générale	53
----------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Liste des figures

N° de la figure	Titre	Page
Figure I.1	Synoptique des principales sources de pollution	08
Figure I.2	Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau	17
Figure I.3	Schéma de principe du procédé de l'électrocoagulation	19
Figure I.4	Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium	21
Figure I.5	Diagramme de Pourbaix de l'aluminium	22
Figure I.6	Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires	23
Figure I.7	Connexion en série d'électrodes monopolaires	24
Figure I.8	Connexion des électrodes bipolaires	24
Figure II.1	Schéma du dispositif expérimental d'EC-EF en régime continu	33
Figure II.2	Les trois modes de connexion d'électrodes étudiés	34
Figure II.3	Formule développée du Rouge Nylosan	35
Figure II.4	Spectre d'absorption UV-visible du colorant étudié	35
Figure II.5	Courbe d'étalonnage du colorant au maximum d'absorption	36
Figure II.6	Microprocesseur pH Mètre "Hanna pH 210"	37
Figure II.7	Conductimètre "Hanna, EC214 "	37
Figure II.8	Turbidimètre Hanna "HI88703"	38
Figure II.9	Dispositif représentant le spectrophotomètre utilisé	39
Figure II.10	Composition élémentaire du métal des électrodes utilisées par MEB	41
Figure III.1	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 100 \text{ A/m}^2$, pH initial = 7.79, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$	43
Figure III.2	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 100 \text{ A/m}^2$, pH initial = 7.79, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$	43
Figure III.3	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 200 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.90 \text{ mS/cm}$	44
Figure III.4	Figure III.3 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 200 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.90 \text{ mS/cm}$	44
Figure III.5	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	45
Figure III.6	Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	45
Figure III.7	Effet de la densité de courant j sur l'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, Conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$	47
Figure III.8	Effet de la densité de courant j sur consommation des électrodes (μ_{Al}) : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8, débit d'alimentation	47

Liste des figures

	$Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$	
Figure III.9	Effet de la densité de courant j sur l'énergie par m^3 d'eau traitée (E_{water}): $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, Conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$	48
Figure III.10	Evolution du pH au cours de l'EC: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	49
Figure III.11	Effet de la connexion électrique sur la tension entre les électrodes, $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	49
Figure III.12	Effet de la recirculation de l'effluent sur l'élimination de la turbidité (MP): $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	50
Figure III.13	Effet de la recirculation de l'effluent sur l'élimination de la turbidité (BP): $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q =$ 15 L/h , conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	51
Figure III.14	Effet de la recirculation de l'effluent sur l'élimination de la turbidité (BP): $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$	51

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité Croissante	13
Tableau I.2	Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants	16
Tableau I.3	Modes de connexion et valeurs des intensités et des tensions	25
Tableau I.4	Résumé des applications d'EC en continu	27 - 30

Introduction générale

La présence de matières colorantes dans les rejets textiles peut constituer une menace sérieuse pour l'environnement quand ils sont rejetés sans traitement préalable dans la biosphère. Ces rejets industriels engendrent des effets néfastes sur la flore et la faune aquatique, mais aussi sur les populations humaines et animales qui consomment les eaux non traitées. Un traitement sera donc indispensable pour éliminer ces matières néfastes à l'environnement.

De nombreux procédés sont mis en œuvre, tels que la coagulation-floculation, l'osmose inverse, l'oxydation ou la réduction chimique, la dégradation photocatalytique ... Cependant, du fait de la composition très variable de ces eaux et à cause de la complexité de la manipulation des produits chimiques, la plupart de ces méthodes conventionnelles commencent à s'avérer insuffisantes pour un traitement simple et efficace et nécessitant une consommation minimale en réactifs. L'électrocoagulation (EC) peut ainsi constituer une alternative. L'utilisation d'électrodes solubles comme l'aluminium permet de produire à l'anode des ions Al^{3+} qui réagiront par la suite en solution avec les ions OH^- pour former des hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$. Ces derniers réagissent comme un coagulant permettant la coagulation-floculation des polluants. 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 floccs ainsi formés.

Le manuscrit comporte trois chapitres:

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons donné une synthèse bibliographique qui rassemble des données essentielles sur les colorants de textile, et l'intérêt du développement d'une technique de dépollution adaptée aux effluents chargés en colorants, notamment par électrocoagulation (EC).

Le deuxième chapitre décrit le dispositif expérimental mis au point, l'effluent synthétique de textile étudié, les analyses effectuées et le détail des conditions opératoires choisies pour les expériences.

Le troisième chapitre est consacré à l'interprétation des principaux résultats obtenus.

Enfin nous avons terminé le manuscrit par une conclusion générale relatant les principaux résultats de cette étude, et les perspectives de dépollution pour d'autres travaux de recherche.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

L'homme a toujours eu comme souci de préserver et aussi accroître ses ressources en eau dont la pollution est fondamentalement causée par le développement considérable de ses activités humaines et industrielles. Ce problème ne se traite plus à l'échelle locale ou régionale mais il est devenu de dimension mondiale [1]. Par conséquent il est peut être utile de discuter, ne serait-ce brièvement, les différents types et sources de pollution de l'eau rencontrés assez fréquemment.

I.2. La pollution de l'eau

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie, à travers des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physicochimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Par exemple, la pollution aquatique est une altération de sa qualité et de sa nature qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner aussi bien les eaux superficielles que souterraines.

I.3. Généralités sur la pollution

1.3.1. Définition de la pollution

La pollution est une dégradation de l'environnement par l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de matières n'étant pas présentes naturellement dans le milieu. Elle entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement.

1.3.2. Résumé du concept de la pollution par le Comité scientifique de la Maison Blanche en 1965

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il

détient, les possibilités régénératrices du milieu ou encore en enlaidissant la nature. La pollution de l'eau est due essentiellement aux activités humaines ainsi qu'aux phénomènes naturels. Elle a des effets multiples qui touchent aussi bien la santé publique que les organismes aquatiques, ainsi que la flore et la faune terrestre.

1.3.3. Les sources de la pollution

L'eau dans la nature et à fortiori celle qui est employée à des usages industriels et domestiques n'est jamais pure, de par les impuretés qu'elle peut renfermer sous les 3 états : Solides, liquides ou gazeux et qui peuvent être caractérisées par la taille qu'elles prennent en milieux aqueux.

1.3.3.1. La source urbaine

L'origine des eaux résiduaires urbaines est principalement domestique où les populations génèrent les (3/4) des eaux usées. Ces effluents sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines telles que les urines, fèces, eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères). Les eaux usées urbaines peuvent aussi contenir des eaux résiduaires d'origine industrielle, mais normalement, ces dernières doivent avoir subi un prétraitement pour atteindre des caractéristiques comparables à celles des eaux usées domestiques pour permettre un traitement en commun [2].

1.3.3.2. La source industrielle

Elle constitue les déchets liquides obtenus lors de l'extraction et de la transformation de matières premières en produits industriels. Les eaux résiduaires proviennent principalement de l'eau consommée dans de nombreuses opérations de fabrication par voie humide, comme par exemple: la précipitation, le lavage, le nettoyage des appareils, les ateliers, les filtrations, les distillations, etc. [3].

Les effluents industriels peuvent causer des pollutions organiques (industries agroalimentaires, papeteries), chimiques (tanneries, usines textiles...) ou physiques (réchauffement par les centrales thermiques, matières en suspension des mines ou de la sidérurgie). Ils sont responsables de l'altération des conditions de clarté et d'oxygénation de l'eau, pouvant aussi causer l'accumulation de certains éléments dans la chaîne alimentaire (métaux, pesticide, radioactivité). La pollution peut aussi être due à l'infiltration de produits toxiques mal entreposés, à des fuites dans les réservoirs ou à des accidents lors du transport de matières dangereuses menant à des concentrations dans les eaux qui peuvent aisément atteindre 1g/L [4].

1.3.3.3. La source agricole

La pollution d'origine agricole provient surtout des engrais et pesticides épandus dans le sol sur de très grandes surfaces à proximité ou pas de cours d'eau [4]. Ce type de pollution s'est intensifié depuis que l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation assez avancé. La concentration des élevages entraîne un excédent de déjections animales qui finissent par enrichir les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés, encourageant ainsi une source de pollution bactériologique. L'utilisation massive des engrais chimiques (nitrates et phosphates) altèrent aussi la qualité des nappes souterraines vers lesquelles ils sont entraînés.

1.3.3.4. La source naturelle

Ce phénomène se retrouve pour toute eau en contact avec l'atmosphère car celle-ci contient du gaz carbonique CO_2 qui est soluble dans l'eau pour donner de l'acide carbonique de formule H_2CO_3 . On comprend ainsi qu'une concentration de CO_2 dans l'atmosphère conduit à une acidification de l'eau à son contact. Ainsi, même avant l'existence des pluies acides d'origine anthropique, les pluies naturelles étaient légèrement acides, ceci étant toujours le cas dans des zones protégées telles que les forêts amazoniennes [4].

1.3.3. 5. Source microbiologique

La qualité microbiologique de l'eau peut aussi être à l'origine de problèmes, qu'ils soient aigus ou chroniques. Des accidents peuvent avoir lieu lors d'une mauvaise désinfection des canalisations, donnant une eau de mauvaise qualité microbiologique qui peut être un facteur de risque de plusieurs pathologies, surtout digestives [5].

1.3.4. Les paramètres de pollution

Il existe plusieurs manières de classer la pollution. Selon le type de polluant, on peut classer la pollution en trois catégories : pollution physique, pollution chimique et pollution biologique.

1.3.4.1. Paramètres physiques

a. Turbidité

C'est un paramètre, qui varie en fonction des composés colloïdaux (argiles) ou aux acides humiques (dégradation des végétaux) mais aussi pollutions qui troublent l'eau. On mesure la résistance qu'elle oppose par l'eau au passage de la lumière pour lui donner une valeur. La turbidité se mesure à l'aide d'un turbidimètre, et l'unité principale est le NTU (Néphélométric Turbidity Unit).

b. MES (Matières en suspension)

On appelle matières en suspension les très fines particules en suspension (sable, argile, produits organiques, particules de produits polluants, micro-organismes,...) qui donnent un aspect trouble à l'eau.

c. Température

La température a un impact sur tous les processus physico-chimiques et biologiques dans la nature. Elle intervient aussi dans l'efficacité de certains traitements tels que la décantation, la coagulation-floculation et la désinfection.

d. MVS (Matières volatiles en suspension)

Les matières volatiles en suspension représentent la fraction organique dite volatile de MES parce qu'elle est calcinée à 550 °C. Le rapport MVS/MES indiquera l'organicité de l'effluent.

e. Conductivité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Elle est mesurée à l'aide d'un conductimètre, et l'unité utilisée est le milli-siemens/cm (mS/cm) ou le micro-siemens/cm (µS/cm).

I.3.4.2. Paramètres chimique**a) Potentiel d'hydrogène (pH)**

Ce paramètre donne le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau. L'eau des cours d'eaux avoisine en général la neutralité représentée par un pH de 7. Le pH doit être compris entre 6,5 et 8,5 pour permettre la vie aquatique.

b) Oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous est un paramètre utilisé pour mesurer la qualité du milieu marin. Sa concentration est liée aux paramètres physico-chimiques et à l'activité biologique. L'oxygène dissous provient :

- La diffusion de l'oxygène en surface.
- L'aération (mouvement de l'eau).
- La photosynthèse.

c) Salinité

La salinité, **S**, définie comme la concentration en sel, également exprimée en g/kg d'eau de mer ou ‰. La salinité moyenne de l'eau de mer est de 34,5 ‰.

d) La demande biologique en oxygène (DBO)

C'est un paramètre global qui exprime la quantité d'oxygène qu'une biomasse épuratrice va consommer pour décomposer les matières organiques contenues dans l'effluent avec le concours des microorganismes (bactéries) présents dans celui-ci. Elle est généralement mesurée en 5 jours (DBO₅) en mg/L d'oxygène consommé à 20 °C.

e) La demande chimique en oxygène (DCO)

Elle représente la quantité totale de pollution oxydable. Elle correspond à la quantité d'oxygène qu'il faut fournir grâce à des réactifs chimiques puissants pour oxyder les matières (biodégradables et non biodégradables) contenues dans l'effluent.

f) L'azote (N)

L'azote peut se trouver sous forme minérale (ammoniacal, nitrate) ou organique. On a :

- **Les Nitrates (NO₃⁻)** qui constituent le stade final de l'oxydation de l'azote.
- **Les Nitrites (NO₂⁻)** qui constituent une étape importante dans le cycle de l'azote, ils s'insèrent entre l'ammoniaque et les nitrates.
- **L'ammoniaque (NH₄⁺)** qui constitue la forme réduite de l'azote

g) Le phosphore (P)

Il se trouve sous forme minérale ou organique. 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.

h) 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-accumulables dans les chaînes alimentaires. Ils sont principalement d'origine industrielle.

1.3.4.3. Paramètres organoleptiques**a) La coloration**

La couleur de l'eau peut provenir de substances minérales comme le fer ou le manganèse et/ou de substances organiques colloïdales. Les substances organiques comprennent généralement des déchets végétaux et animaux.

b) Odeur - Saveur

Dans l'eau, diverses molécules sont responsables des odeurs. Elles proviennent des composés azotés ou soufrés : (amines, ammoniaque...). Mais la molécule qui pose le plus de problème est l'hydrogène sulfuré (H₂S), 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.

I.3.4.4. Paramètres biologiques

La pollution est liée au surdéveloppement de micro-organismes (bactéries, virus...) ou de végétaux micro ou macroscopiques (champignons) qui provoquent un déséquilibre du milieu environnant.

I.3.5. Description succincte 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. Elle présente l'avantage de représenter une filière complète qui va de la matière brute au produit fini livrable au consommateur.

Les fibres textiles sont des substances susceptibles d'être transformées en fil, puis en tissu, bonneterie, dentelle, corde et ficelle. Elles peuvent provenir du règne animal, végétal, minéral ou chimique. La figure (I.1) présente un aperçu synoptique des différentes matières textiles avec leur origine et leurs appellations [6].

L'industrie textile comprend essentiellement deux types d'activité: activité mécanique et activité d'ennoblissement [6].

1) L'activité mécanique

Elle regroupe les opérations de filature et de tissage. Ces opérations peuvent être définies comme suit :

Filature : on désigne sous le nom de filature, l'ensemble des opérations industrielles qui transforment la matière textile en fil.

Tissage : c'est l'opération qui consiste à entrecroiser les fibres perpendiculairement les unes aux autres pour en former des tissus.

2) La finition textile (ou ennoblissement)

Elle regroupe les opérations de blanchiment, de teinture, d'impression et d'apprêts :

- ***Le blanchiment*** : c'est une opération ou un ensemble d'opérations industrielles qui ont pour but de décolorer les fibres textiles.

- **La teinture** : elle est destinée à donner à une fibre, un fil ou un tissu dans toute sa longueur et dans toute son épaisseur, une teinte uniforme, différente de sa teinte habituelle. Elle s'obtient en fixant un colorant sur la fibre d'une manière durable.
- **L'impression** : a pour but d'obtenir des dessins blancs ou colorés à la surface des tissus.
- **Les apprêts** : on donne le nom d'apprêts aux divers traitements mécaniques ou chimiques que l'on fait subir aux fils et aux tissus avant ou après les opérations de blanchiment, teinture et impression.

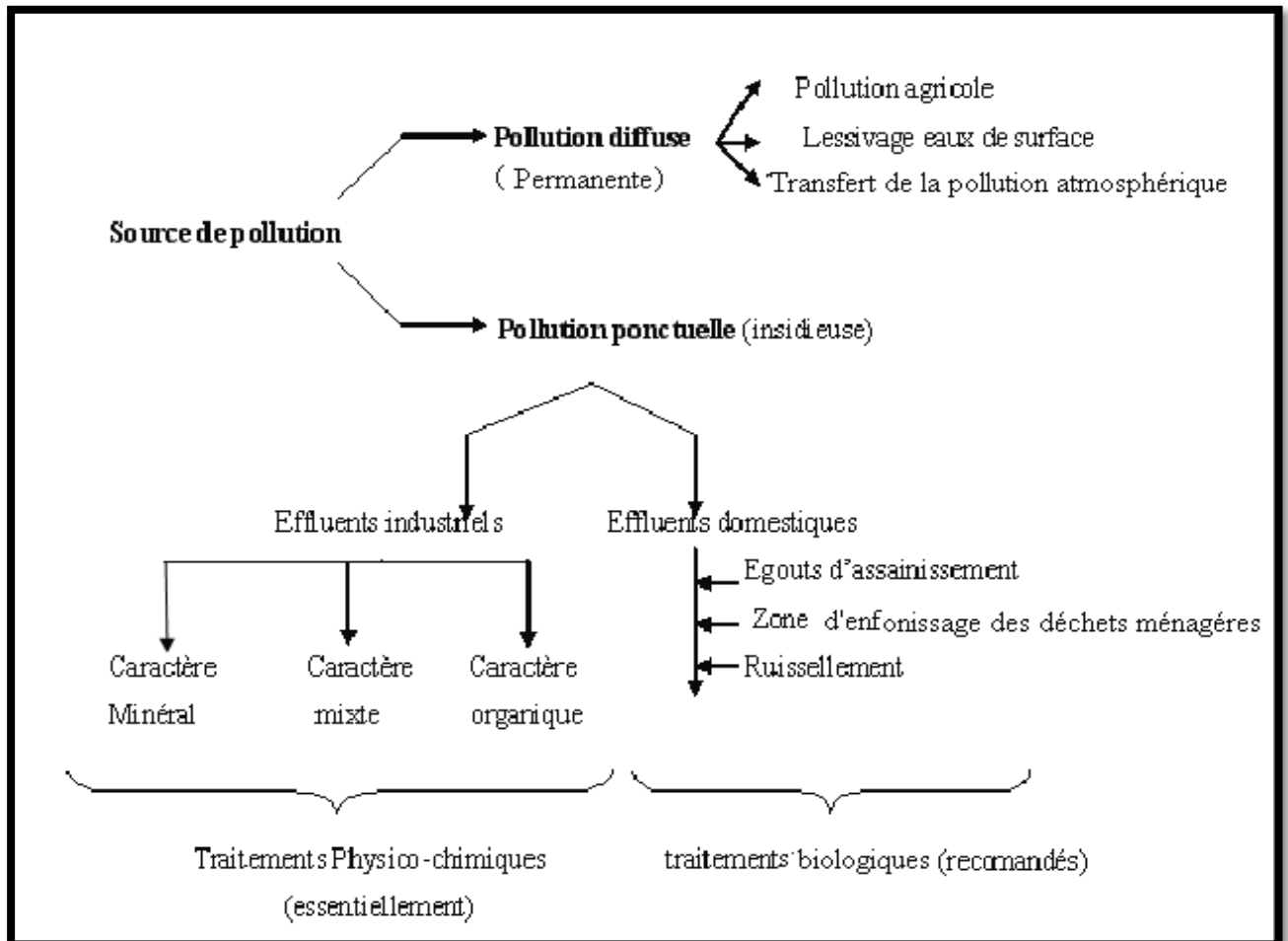


Figure I.1 : Synoptique des principales sources de pollution

I.3.6. Utilisation de l'eau dans l'industrie textile

Aux divers stades de la fabrication, ces industries demandent de grandes quantités d'eaux qui sont l'objet des traitements suivants:

- **Adoucissement** ou déminéralisation des eaux destinées à la préparation du fil, spécialement lorsqu'il s'agit de textile artificiel. (Adoucissement, souvent précédé de décarbonatation des eaux destinées au blanchiment et à la teinture des fibres).

- **Traitement** des eaux d'alimentation des chaudières, dont les volumes d'appoint sont souvent importants.
- **Déminéralisation** des eaux destinées au conditionnement de l'air des salles de filature ou de tissage (osmose inverse, échange d'ions)

1.3.7. Caractéristiques des effluents industriels textiles [6]

La grande diversité des industries textiles par les fibres à traiter (naturelles, artificielles...), les procédés de teinture (en bourre, en fils, en pièces, ...) et les produits utilisés (colorants en particulier) se répercute sur la nature et la masse de pollution rejetée.

L'activité mécanique n'engendre qu'une très faible pollution à l'exception de celle provenant des ateliers de peignage et de lavage des laines. Les pesticides sont parfois utilisés pour la préservation des fibres naturelles et ceux-ci sont transférés dans les rejets d'eau durant les opérations de lavage et de récupération.

La finition textile est généralement très polluante, elle peut se caractériser par les produits suivants:

- **AOX** : Tous les produits plus ou moins halogénés sont considérés comme dangereux. Ils peuvent donner des composés qui appartiennent à la classe des AOX. On parle d'halogènes adsorbables type trihalométhane. Ces AOX proviennent des produits auxiliaires de teinture, de certains colorants, des produits de blanchiment, surtout l'eau de javel (ou hypochlorite ClO^-) et à moindre titre du chlorite (ClO_2^-).
- **Urée** : Pour dissoudre de grandes quantités de colorants, (pour la teinture par foulardage ou pour les pâtes d'impression), l'ennoblisseur peut utiliser des produits hydrotropes comme l'urée et plus rarement la thiourée. Rejetés dans les cours d'eau, ces produits, comme les nitrates et phosphates, favorisent la prolifération des algues. Ces algues consomment énormément d'oxygène qu'elles puisent dans l'eau et ceci au détriment des espèces animales qui sont ainsi asphyxiées.
- **Réducteurs** : Rejetés dans les cours d'eau, les réducteurs, utilisés en teinture des colorants de cuve et au soufre, consomment l'oxygène du milieu.
- **Electrolytes** : Une salinité excessive des eaux peut perturber la vie aquatique. Pour mesurer la teneur en électrolytes, on mesure la conductivité de l'eau.
- **Colorants** : La couleur des rejets textiles est due aux colorants employés, Cette forte coloration des eaux participe aussi au phénomène d'eutrophisation.

I.3.8. Conséquences de la pollution [6]

Les conséquences d'une pollution peuvent être classées en cinq catégories principales : sanitaires, écologiques, esthétiques, agricoles, industrielles.

a- Conséquences sanitaires

Les conséquences sanitaires sont celles à prendre en compte en priorité. Elles peuvent être liées à l'ingestion d'eau, de poissons intoxiqués...etc., mais aussi, au simple contact avec le milieu aquatique (cas de nombreux parasites). On peut noter qu'il ne s'agit pas toujours de problèmes de toxicité immédiate, les conséquences sanitaires pouvant intervenir au travers de phénomènes complexes, que nous ne développerons pas ici.

La conséquence sanitaire d'une pollution est variable dans le temps en fonction de l'usage de l'eau : par exemple, la pollution d'une nappe non exploitée n'a aucune conséquence sanitaire immédiate, mais peut en avoir longtemps après, si on utilise cette eau pour l'alimentation en eau potable (A. E. P.).

b- Conséquences écologiques

Les conséquences écologiques se mesurent en comparant l'état du milieu pollué par rapport à ce qu'il aurait été sans pollution. Ceci n'a rien d'évident, la pollution se traduisant parfois uniquement par l'accentuation d'un phénomène naturel. D'une manière générale, les conséquences écologiques sont à considérer au travers de la réduction des potentialités d'exploitation du milieu (pêche, aquaculture, tourisme, ...).

c- Conséquences esthétiques

Il s'agit de pollutions n'ayant pas de conséquences sanitaires ou écologiques importantes, mais perturbant l'image d'un milieu (par exemple, par des bouteilles plastiques).

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. On peut également distinguer deux autres conséquences liées à l'utilisation de l'eau comme produit. Elles sont énoncées ci-dessous.

d- Conséquences agricoles

L'eau est, dans certaines régions, largement utilisée pour l'arrosage ou l'irrigation 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 toxiques (métaux lourds) être à l'origine de la pollution des sols, en cas d'épandage.

e- Conséquences industrielles

L'industrie est un gros consommateur d'eau : il faut par exemple 1 m³ d'eau pour produire 1kg d'aluminium. La qualité requise pour les utilisations industrielles est souvent très élevée, tant sur le plan chimique (pour limiter la minéralisation, corrosion, entartrage), que biologique (problème de *biofouling*, c'est-à-dire d'encrassement des canalisations par des organismes). Le développement industriel peut donc être stoppé ou retardé par la pollution.

Généralement, les différents types de pollution sont mélangés et agissent les uns sur les autres. En effet, un rejet n'est jamais une source unique et un égout rejette des déchets de différentes natures, en plus des déjections domestiques et animales.

L'organisation mondiale de la santé (OMS) considère que 80 % des maladies qui affectent la population mondiale sont directement véhiculées par l'eau : des dizaines, voire des centaines de millions de personnes sont atteintes en permanence de gastro-entérites, 160 millions de paludisme et 30 millions d'onchocercose. Malgré les apparences, la transmission des maladies par une eau polluée n'est pas l'apanage des pays en voie de développement et l'élaboration de normes sur les eaux de consommation vise à fournir aux consommateurs une eau qui ne constitue pas un risque pour la santé.

En définitive la pollution des eaux par les matières organiques est un problème mondial dont les aspects et la portée sont évidemment différents selon le niveau de développement des pays. Il importe que les concentrations des produits polluants soient les plus faibles possible.

La prévention est donc essentielle et repose sur les trois aspects suivants :

- L'aspect réglementaire qui consiste à fixer des normes ;
- L'aspect sanitaire qui comporte en particulier le contrôle technique des installations;
- Les aspects scientifiques et technologiques qui correspondent à l'amélioration des procédés de dépollution.
- A travers les paragraphes précédents, nous avons expliqué les différentes origines de pollution de l'eau et identifié les principaux paramètres responsables de cette pollution.

I.4. Généralités sur les colorants

I.4.1. Les colorants

Depuis le début de l'humanité, les colorants ont été appliqués dans pratiquement toutes les sphères de notre vie quotidienne pour la peinture et la teinture du papier, de la peau et des vêtements, etc. Jusqu'à la moitié du 19^{ème} siècle, les colorants appliqués étaient d'origine

naturelle. Des pigments inorganiques tels que l'oxyde de manganèse, l'hématite et l'ancre étaient utilisés. Par ailleurs, des colorants naturels organiques ont été appliqués, surtout dans l'industrie de textile. Ces colorants sont tous des composés aromatiques qui proviennent essentiellement des plantes, tel que l'alizarine et l'indigo [7]. On dénombre environ 8000 colorants synthétiques chimiquement différents, répertoriés dans le Colour Index [8] sous 40000 dénominations commerciales. Chaque colorant y est classé sous un nom de code indiquant sa classe, sa nuance ainsi qu'un numéro d'ordre (par exemple : CI Acid Orange 7) Un colorant doit posséder, outre sa couleur propre, la propriété de teindre, cette propriété résultant d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre est à l'origine des principales difficultés rencontrées lors des traitements. En effet, selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères afin de prolonger la durée de vie des produits textiles sur lesquels ils ont été appliqués : résistance à l'abrasion, stabilité photolytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment les détergents) et aux attaques microbiennes.

L'affinité du colorant pour la fibre est particulièrement développée pour les colorants qui possèdent un caractère acide ou basique accentué. Ces caractéristiques propres aux colorants organiques accroissent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu disposés à la biodégradation [9].

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à adsorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophores : la molécule colorante étant le chromogène ; plus la facilité du groupe chromophore à donner un électron est grande plus la couleur sera intense. D'autres groupes d'atomes du chromogène peuvent intensifier ou changer la couleur due au chromophore : ce sont les groupes auxochromes [10].

1.4.2. Classification des colorants

Tous les composés aromatiques absorbent l'énergie électromagnétique mais seulement ceux qui ont la capacité d'absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm) sont colorés. En outre, les colorants consistent en un assemblage de groupes chromophores (groupes aromatiques conjugués (liaison π), comportant des liaisons non liantes (électron n) ou des complexes de métaux de transition), auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène, etc.).

Lorsque le nombre de noyau aromatique augmente, la conjugaison des doubles liaisons s'accroît et le système conjugué s'élargit. L'énergie des liaisons π diminue tandis que l'activité des

électrons π ou n augmente et produit un déplacement vers les grandes longueurs d'onde. De même, lorsqu'un groupe auxochrome donneur d'électrons (amino, hydroxy, alkoxy,...) est placé sur un système aromatique conjugué, ce groupe se joint à la conjugaison du système p , la molécule absorbe dans les grandes longueurs d'onde et donne des couleurs plus foncées [11].

Les chromophores et auxochromes habituels sont résumés dans le tableau I.1 [12].

Tableau I.1: Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité Croissante

<i>Groupes chromophores</i>	<i>Groupes auxochromes</i>
Azo (-N=N-) Amino (-NH ₂)	Nitroso (-NO ou -N-OH)
Méthylamino (-NHCH ₃)	Carbonyl (=C=O)
Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)	Vinyl (-C=C-)
Hydroxyl (-HO)	Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)
Alkoxyl (-OR)	Sulfure (>C=S)
Groupes donneurs d'électrons	

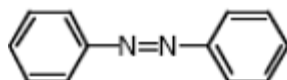
La classification des colorants peut être faite selon leur constitution chimique (colorants azoïques, anthraquinoniques, indigoïdes, etc.) ou selon le domaine d'application

1.4.3. Classification selon la constitution chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore [12].

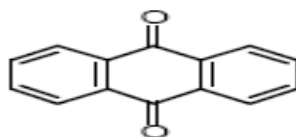
1.4.3.1. Les colorants azoïques

Les colorants "azoïques" sont caractérisés par le groupe fonctionnel azo (-N=N-) unissant deux groupements alkyles ou aryles identiques ou non (azoïque symétrique et dissymétrique). Ces structures qui reposent généralement sur le squelette de l'azobenzène, sont des systèmes aromatiques ou pseudo aromatiques liés par un groupe chromophoreaze.



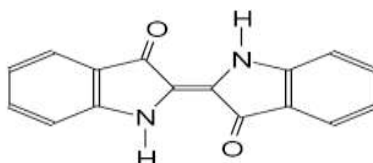
1.4.3.2. Les colorants anthraquinoniques

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.



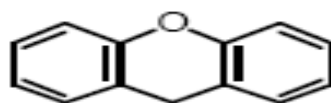
1.4.3.3. Les colorants indigoïdes

Ils tirent leur appellation de l'Indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues sélénié, soufré et oxygéné du Bleu Indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise.



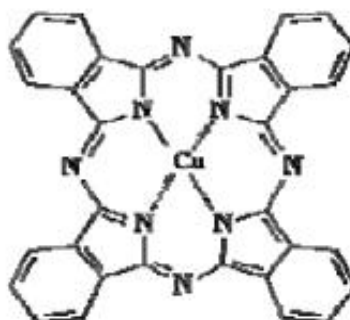
1.4.3.4. Les colorants xanthènes

Ces colorants sont dotés d'une intense fluorescence. Le composé le plus connu est la fluorescéine. Peu utilisé en tant que teinture, leur faculté de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie.



1.4.3.5. Les phthalocyanines

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

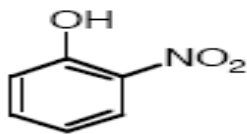


Phthalocyanine de cuivre

1.4.3.6. Les colorants nitrés et nitrosés

Ces colorants forment une classe très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure

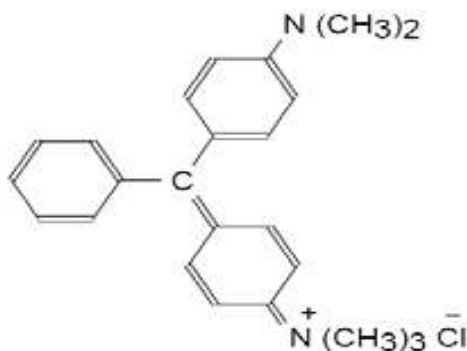
moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés).



1.4.3.7. Les colorants triphénylméthanés

Les triphénylméthanés sont des dérivés du méthane pour lesquels les atomes d'hydrogène sont remplacés par des groupes phényles substitués dont au moins un est porteur d'un atome d'oxygène ou d'azote en para vis-à-vis du carbone méthanique. Le triphénylméthane et ses homologues constituent les hydrocarbures fondamentaux d'où dérivent toute une série de matières colorantes.

Exemple: C.I. Basic Green 4



1.4.4. La coloration textile

a- Définition de 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.

b- 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.2: Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants [9]

Classe 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.2), 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.

1.4.5. Impacts des colorants sur l'environnement

Beaucoup de colorants sont visibles dans l'eau même à de très faibles concentrations (<1 mg/L). Ainsi, ils contribuent aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels [13]. Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source dramatique de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire. Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant aller jusqu'à centmille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau (illustration du phénomène de bioaccumulation de pesticides, figure I.2).

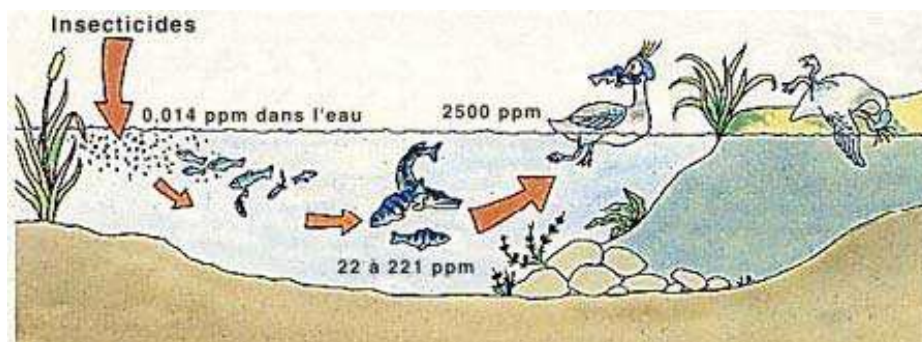


Figure I.2: Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau [14]

1.4.6. 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 (Tableau I-2). 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.

1.5. Le procédé d'électrocoagulation

1.5.1. 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 [15] 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 Electrochimique, 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 URSS*, 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[15].

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 apparues 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) [16]. La figure suivante présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

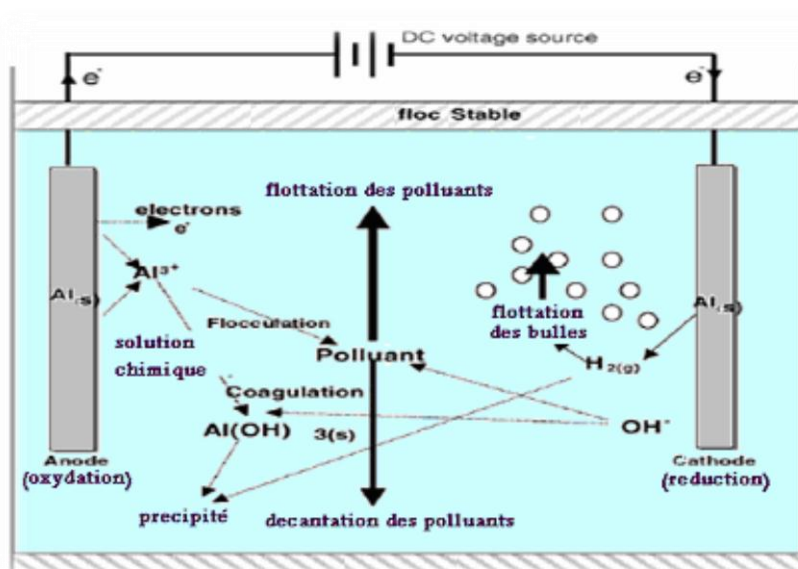


Figure I.3: Schéma de principe du procédé de l'électrocoagulation

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 [16].

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 [17].

On peut distinguer:

- Les mono complexes tels que : $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$
- Les poly complexes tels que : $\text{Al}_2(\text{OH})_4^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_6^+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$
- 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 sacrifiée.

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'agglomérées 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 [15-17].

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.4). 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 [17].

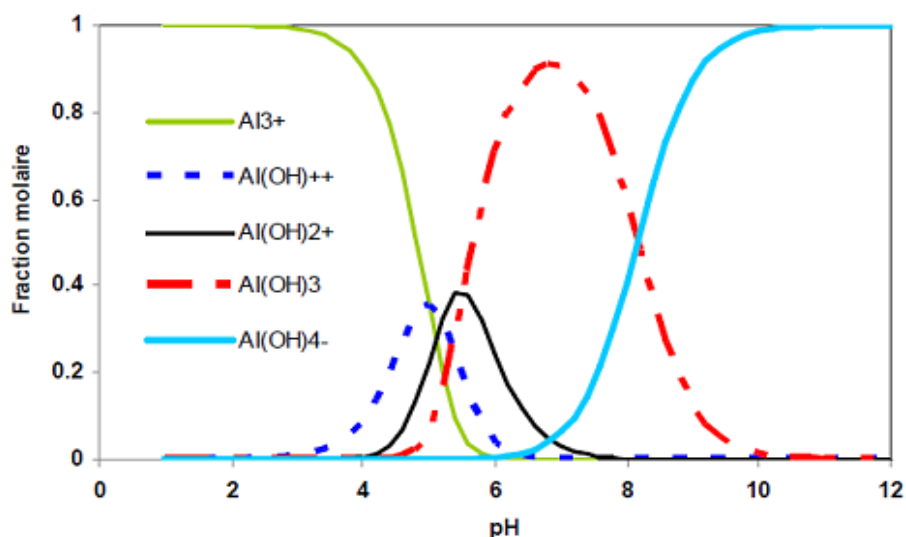


Figure I.4 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium (sans tenir compte des formes polymères de ces hydroxydes) [17]

Le diagramme potentiel-pH de Pourbaix représente les relations entre deux espèces en solution, une espèce en solution et une espèce solide, ou bien deux espèces solides. Pour l'aluminium, les espèces solides sont Al, Al₂O₃ hydraté, Al₂O₃ anhydre et Al(OH)₃, les espèces ioniques mettent en jeu Al³⁺ et AlO₂⁻ ainsi que les réactions d'oxydation de l'aluminium permettent d'établir le diagramme d'équilibre potentiel-pH. Ce diagramme est valable en absence des espèces formant avec l'aluminium des complexes solubles ou des sels insolubles (Fig. I.5). Le domaine de stabilité de l'aluminium est situé (zone III, Fig. I.5) en dessous de celui de l'eau (zone comprise entre les courbes a et b).

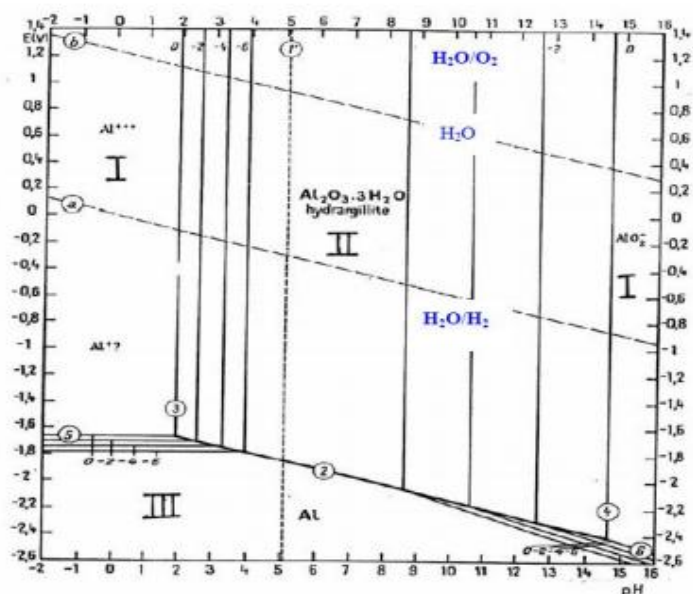


Figure I.5 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium [17]

I.5.3. Paramètres influençant le procédé d'EC

Plusieurs facteurs peuvent influencer la taille des bulles générées par l'EC-EF tel 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 [15].

I.5.4. 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 [18].

a) Connexion monopolaire en parallèle

La figure (I.6) montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle.

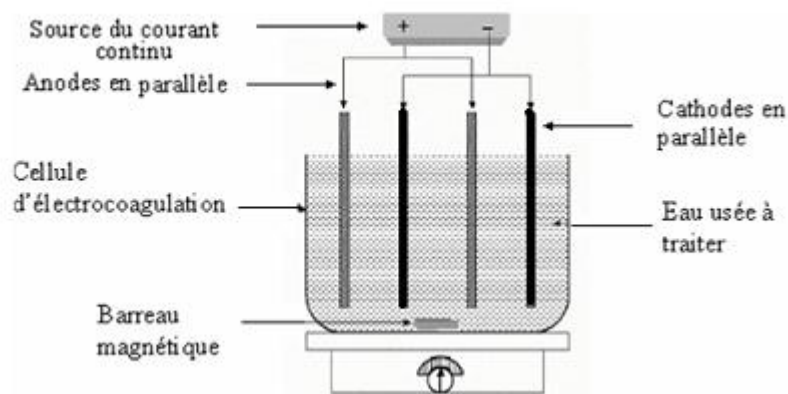


Figure I.6 : Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires

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 [18].

b) Connexion monopolaire en série

Comme le montre la figure (I.7), 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 EC 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 [18].

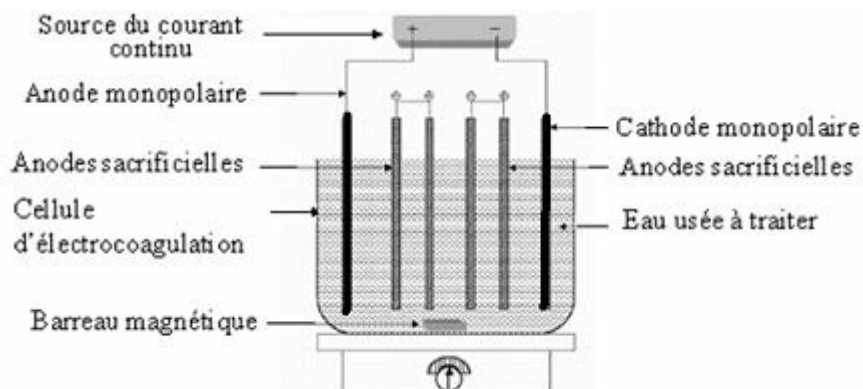


Figure I.7 : Connexion en série d'électrodes monopolaires

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 (I.8).

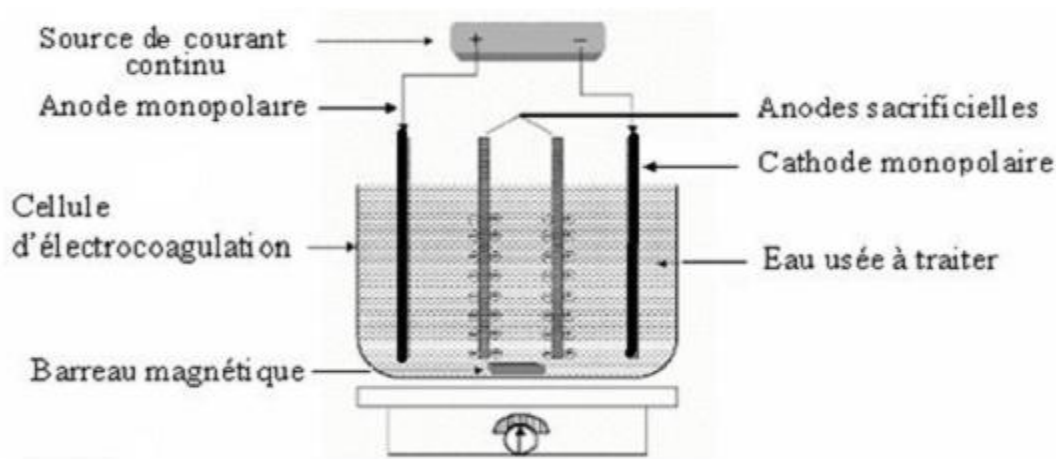


Figure I.8: Connexion des électrodes bipolaires

Cet arrangement permet une installation plus simple, qui facilite la maintenance lors de l'utilisation. Quand le courant électrique traverse les deux électrodes monopolaires, les faces non chargées des plaques conductrices seront transformées en faces chargées, qui auront alors une charge opposée par rapport au côté parallèle qui lui est adjacent ; les électrodes sacrificielles sont alors dites électrodes bipolaires [18].

Le tableau (I.3), nous donne les différentes valeurs des tensions (U) et des intensités (I) pour les trois modes, avec n est le nombre de cellules.

Tableau I.3. Modes de connexion et valeurs des intensités et des tensions [15]

Mode de connexions	Intensité par cellule	Tension par cellule
Monopolaire série	I	$\frac{U}{2n}$
Monopolaire parallèle	$\frac{I}{n - 1}$	U
Bipolaire	I	$\frac{U}{n - 1}$

I.5.5. Principales lois d'électrolyse

❖ 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 [15]:

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

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.

I.5.6. 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}).

$$\Phi = \frac{\Delta m_{\text{exp}}}{\Delta m_{\text{th}}} = \frac{3F}{3600 M_{\text{Al}} I t} \Delta m_{\text{exp}}$$

Le rendement faradique peut souvent être supérieur à l'unité (01) en raison de la dissolution chimique du métal [15-17].

1.5.7. Avantages et inconvénients du procédé d'EC

De nombreux auteurs ont comparé le procédé d'EC avec le procédé physico-chimique classique réalisé par l'addition de coagulants chimiques tels que le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique FeCl. Parmi les arguments en faveur de l'électrocoagulation on peut citer les suivants [15] :

- 1.** Pas d'ajout de substances chimiques : même s'il semble nécessaire d'augmenter légèrement la salinité de l'effluent à traiter pour accroître la conductivité électrique de l'effluent, plusieurs études ont montré l'efficacité de l'EC sans aucune variation de Conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval.
- 2.** Très bonne efficacité du procédé d'EC pour des polluants colloïdaux très fins. Avec d'autres procédés tel que la coagulation chimique, ces polluants imposent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées.
- 3.** Les boues obtenues après traitement par EC sont plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ce qui réduit le temps et les coûts de traitement des boues.
- 4.** L'importance du champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries. En utilisant des électrodes en titane, des auteurs ont confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore.
- 5.** L'EC offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
- 6.** La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée. Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisé à la faible salinité du milieu.
- 7.** L'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.

Les inconvénients majeurs de l'EC concernent principalement la conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes. En effet, la conductivité du rejet doit être suffisante pour permettre le passage du courant sans consommation excessive

d'électricité. Lorsque la conductivité de l'eau polluée est trop faible, un rajout du chlorure de sodium est généralement nécessaire. La présence de certains ions tels que les chlorures, permet d'éviter le phénomène de passivation des électrodes d'aluminium [19].

Par ailleurs, une présence importante d'ions calcium et hydrogénocarbonate provoque l'apparition d'un dépôt de tartre au niveau de la cathode, augmentant ainsi, la résistance de la cellule. Pour faire face à ce problème, la manière la plus simple est de réaliser une inversion périodique de la polarité [19].

Il est aussi important de prévoir un nettoyage mécanique périodique des électrodes à l'aide de solutions acides. La formation et le dépôt de tartre sur les électrodes représentent une part importante de la consommation électrique du procédé. Il existe même un procédé électrochimique dont le but est de réaliser un détartrage de l'eau potable par dépôt du tartre sur la cathode.

I.5.8. Principales applications d'EC

Le sommaire des études réalisées sur le traitement d'un effluent synthétique et réel de textile par le processus continu d'électrocoagulation est récapitulé dans le tableau suivant [20].

Tableau I.4. Résumé des applications d'EC en continu

Colorant et effluent (Dye and textile wastewater)	Conditionsexpérimentales*	Conditions optimum *	Réf.
Synthetic dye wastewater (a red dye:mixture of 2- naphthoic acid and 2naphtol)	N_e : two Al electrodes (used as anode and cathode), Connection mode: MP-P, $S_e = 192 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 25\text{-}200 \text{ mg/L}$ (625-5000 mg/L COD), $\text{pH}_i = 3.2\text{-}9.01$, $j = 20.8 - 62.5 \text{ mA/cm}^2$, $C_{\text{NaCl}} =$ 1500-5000 mg/L ($\kappa = 2.4\text{-}8 \text{ mS/cm}$), $d = 1 \text{ cm}$, $Q = 25.2\text{-}78 \text{ L/h}$	$R_{e,\text{COD}} = 95\text{-}85\%$; $R_{e,\text{dye}} = 95\text{-}$ 85%; $t = 14 \text{ min}$, $j = 31.25 \text{ mA/cm}^2$, $Q = 37.2$ L/h, $\kappa = 2.4 \text{ mS/cm}$, $ENC = 3.5\text{-}3.2 \text{ kWh/kg dye}$, $\text{pH}_i = 6.1$, $ELC = 0.155\text{-}0.180 \text{ kg Al/kg}$ dye, $OC = 0.52\text{-}0.56 \text{ \$/kg dye}$, $C_{\text{dye}} = 100\text{-}200 \text{ mg/L}$	[21,22]
Synthetic dye wastewater (Reactive Blue 49 (RB- 49), Reactive Yellow-84)	N_e : 4-7 pair as Al, Fe and stainless plate (SS)(as both anodes and cathodes),	$R_{e,\text{color}} = 99.5\%$ (DB-106), 98% (DY-54), 90% (RY-84) and 72% (RB-49)	[23]

(RY-84), Disperse Blue 106 (DB106), Disperse Yellow 54 (DY-54) and real textile wastewater	Connection mode: MP-P, $S_e = 640-1120 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 200-1000 \text{ mg/L}$, $C_{\text{COD}} = 870 \text{ mg/L}$ (wastewater), $\text{pH}_i = 4.12$, $C_{\text{NaCl}} = 0 - 2000 \text{ mg/L}$, $t = 6.5 \text{ min}$, $j = 1.01-4.5 \text{ mA/cm}^2$, $d = 0.5-3 \text{ cm}$, $Q = 50-200 \text{ mL/min}$,	$R_{e,\text{COD}} = 62\%$ (DB-106), 50% (DY-54), 60% (RB49) and 88% (RY-84), $R_{e,\text{wastewater}} = 51.4\%$ (COD) and 41.4% (color) $j = 4.45 \text{ mA/cm}^2$, $C_{\text{NaCl}} = 1000 \text{ mg/L}$, $d = 1 \text{ cm}$, $C_{\text{dye}} = 500 \text{ mg/L}$, $t = 13 \text{ min}$, $N_e = 7$ pairs Al anodes, $Q = 100 \text{ mL/min}$, The influence of the anode: Al > SS > Fe	
Synthetic textile wastewater (Direct Red 81)	N_e : six Al plate anodes and cathodes, Connection mode: BP-S, $S_e = 1200 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 50 \text{ mg/L}$, $C_{\text{COD}} = 120 \text{ mg/L}$, Turbidity = 380 NTU, $\text{pH}_i = 7.5$, $j = 100-200 \text{ A/m}^2$, $\kappa = 2575 \pm 25 \mu\text{S/cm}$, $d = 1 \text{ cm}$, $Q = 10-28 \text{ L/h}$, $t = 1.6-0.57 \text{ h}$	$R_{e,\text{dye}} = 71.5-90.2\%$, $R_{e,\text{COD}} = 52.3-76.1\%$ and $R_{e,\text{NTU}} = 99.9-95.6\%$, $t = 1.6 \text{ h}$, $j = 150 \text{ A/m}^2$, $Q = 10 \text{ L/h}$ (97.3% NTU, 69.4% COD and 80.5% dye), $ENC = 52-66 \text{ kWh/kg Al}$ (0.07 - 0.19 kWh/mg removed dye)	[24]
Synthetic textile wastewater (Remazol Red RB 133)	N_e : Al anode and two stainless plate cathodes, Connection mode: MP-P, $S_e = 235 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 250 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_i = 6$, $j = 5-17 \text{ mA/cm}^2$, $\kappa = 249 - 1966 \mu\text{S/cm}$ (NaCl), $d = 0.75 \text{ cm}$, $Q = 0.6 - 2 \text{ L/h}$, $t = 23-6.8 \text{ min}$	$R_{e,\text{dye}} = 99.3-93\%$ (optimum 96.9%), $t = 11.5 \text{ min}$, $j = 10 \text{ mA/cm}^2$, $Q = 1.2 \text{ L/h}$, $\kappa = 500 \mu\text{S/cm}$, $ELC = 1.3-0.4 \text{ kg Al/m}^3$ (theoretical)	[25]
Synthetic textile wastewater (Reactive Blue 21)	N_e : one Fe anode and one Fe cathode, Connection mode: MP-P, $S_e = 124.4 \text{ cm}^2$, $C_{\text{COD}} = 300 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_i = 9$, $j = 7.55-23 \text{ mA/cm}^2$, $\kappa = 4.7 \text{ mS/cm}$, $d = 4 \text{ cm}$, $Q = 75 \text{ mL/min}$, $t = 20 - 40 \text{ min}$	$R_{e,\text{dye}} = 95\%$ and $R_{e,\text{COD}} = 76\%$, $t = 20 \text{ min}$, $j = 14-17 \text{ mA/cm}^2$, $Q = 75 \text{ mL/min}$	[26]

Synthetic textile wastewater (Reactive Blue 140: RB 140; Reactive Red 23: RR 23)	N_e : 25 circularshape Fe electrodes (diameter : 12.2 cm), Connection mode: MP-P, $S_e = 5625 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 100 \text{ mg/L}$, $j = 30\text{-}40 \text{ A/m}^2$, $d = 0.8 \text{ cm}$, $\text{pH}_i = 9.6$, $\kappa = 875 \pm 25 \mu\text{S/cm}$ (NaCl), $Q = 0.07\text{-}1140 \text{ mL/min}$, $t = 5 - 10 \text{ min}$,	$R_{e,\text{dye}} = 96\%$ (RB 140), $R_{e,\text{dye}} = 98\%$ (RR 23) $j = 40 \text{ A/m}^2$, (RB 140), $j = 30 \text{ A/m}^2$, (RR 23), $Q = 884 \text{ mL/min}$, $t = 5 \text{ min}$, $ENC = 1.42 \text{ kWh/m}$ (RB 140), $ENC = 0.69 \text{ kWh/m}^3$ (RR 23), $OC = 0.152 \text{ \$/m}^3$	[27]
Synthetic textile wastewater (Orange II)	N_e : five Al plate electrodes, Connection mode: BPS, $S_e = 1254 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 10\text{-}50 \text{ mg/L}$, $j = 120\text{-}215 \text{ A/m}^2$, $\text{pH}_i = 2 - 12.6$, $\kappa = 3.9\text{-}14.07 \text{ mS/cm}$ (2-8 g/L NaCl), $d = 0.6 \text{ cm}$, $Q = 300 - 575 \text{ mL/min}$, $t = 4.2 - 7.4 \text{ min}$	$R_{e,\text{dye}} = 94.5\%$ $j = 120 \text{ A/m}^2$, $t = 7.4 \text{ min}$, $C_{\text{dye}} = 10 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_i = 6.5$, $\kappa = 7.1 \text{ mS/cm}$ (4 g/L NaCl), $Q = 350 \text{ mL/min}$	[28]
Synthetic textile wastewater (Acid Orange 6)	N_e : six Fe plate electrodes, Connection mode: BP-S, $S_e = 38.88 \text{ m}^2$, $C_{\text{dye}} = 50\text{-}200 \text{ mg/L}$, $j = 0.06\text{-}150 \text{ A/cm}^2$, $\text{pH}_i = 4\text{-}10$, $\kappa = 200 \mu\text{S/dm}$, $d = 0.5 \text{ cm}$, $Q = 0.3\text{-}0.9 \text{ L/min}$, $t = 2.7\text{-}0.9 \text{ min}$	$R_{e,\text{color}} = 98\%$, $R_{e,\text{TOC}} = 40\%$, $j = 68.3 \text{ A/dm}^2$, $C_{\text{dye}} = 50 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_i = 4$, $Q = 0.3\text{-}0.5 \text{ L/min}$, $t = 2.7\text{-}1.6 \text{ min}$	[29]
Synthetic textile wastewater (Orange II)	N_e : five carbon steel plate electrodes , Connection mode: BP-S, $S_e = 1254 \text{ cm}^2$, $C_{\text{dye}} = 10\text{-}50 \text{ mg/L}$, $j = 159.5\text{-}398.7 \text{ A/m}^2$, $\text{pH}_i = 4.7 - 11$, $\kappa = 3.76\text{-}10.53 \text{ mS/cm}$ (1.99-5.97 g/L NaCl), $d = 0.6 \text{ cm}$, $Q = 350 - 600 \text{ mL/min}$, $t = 0.75 - 1.32 \text{ min}$	$R_{e,\text{dye}} = 98.5\%$, $j = 319 \text{ A/m}^2$, $t = 1.32 \text{ min}$, $C_{\text{dye}} = 10 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_i = 7.3$, $\kappa = 3.81 \text{ mS/cm}$ (2.02 g/L NaCl), $Q = 350 \text{ mL/min}$	[30]
Real textile wastewater	Semi-continuous flow packed	$R_{e,\text{COD}} = 90.84\%$,	[31]

	bed electrochemical reactor, Cylindrical Fe cathode (height = 50 cm and diameter = 4.3 cm), Fe hexagonal wire netting sheet anode (height = 50 cm and diameter = 1.6 cm), $C_{\text{COD}} = 1953$ mg/L, pH = 9.01, $\kappa = 739$ $\mu\text{S/cm}$, $j = 20 - 50$ mA/cm ² , pH _i = 3-9.01, 0.05 M Na ₂ SO ₄ , $t_{\text{EC}} = 10-90$ min, $Q = 240-930$ mL/min	$R_{e,\text{color}} = 99\%$ $j = 20$ mA/cm ² , pH _i = 9.01, $t_{\text{EC}} = 60$ min, $Q = 540$ mL/min and $ENC = 69.1$ kWh/kg COD (for semi-continuous flow) $R_{e,\text{COD}} = 98.5\%$, $R_{e,\text{color}} = 93.8\%$, $j = 20$ mA/cm ² , pH _i = 9.01, $t_{\text{EC}} = 60$ min, $Q = 20$ mL/min, steady-state time = 30 min and $ENC = 51.8$ kWh/m ³ (for continuous flow)	
Real textile wastewater	N_e : eight cast Fe anodes and eight stainless steel cathodes, Connection mode: MP-P, $S_e = 3744$ cm ² , pH _i = 4 - 9.4, $j = 13.35-106.8$ mA/cm ² , $\kappa = 3300$ $\mu\text{S/cm}$, $C_{\text{COD}} = 1012$ mg/L, $Q = 0.5-2$ L/min, $t = 8.84 - 35.36$ min	$R_{e,\text{COD}} = 63\%$, pH _i = 7, $j = 53.4$ mA/cm ² , $Q = 1$ L/min, $t = 18$ min, $OC = 0.34$ $\$/\text{m}^3$	[32]
Synthetic textile wastewater (red nylosan dye)	two Al electrodes (used as anode and cathode), Connection mode: MP-P, $S_e = 48$ cm ² , $C_{\text{dye}} = 50-300$ mg/L, pH _i = 2.3- 8.8, $j = 100 - 400$ A/m ² , $\kappa = 2540$ $\mu\text{S/cm}$, $Q = 15 - 60$ L/h, $t_{\text{EC}} = 5 - 60$ min	$R_{e,\text{color}} = 97\%$ and $R_{e,\text{NTU}} = 98\%$ pH _i = 7.74, $j = 300$ A/m ² , $Q = 15$ L/h, $t = 35$ min, $ENC = 19.5$ kWh/kg dye,	[33]

* j : densité de courant, $R_{e,p}$: taux d'élimination d'un paramètre, Q : débit d'écoulement, t : temps de séjour dans le réacteur d'EC, S_e : surface effective des électrodes, N_e : nombre d'électrodes, κ : conductivité, ENC : Consommation d'énergie, OC : cout de l'opération, t_{EC} : temps d'EC, pH_i : pH initial, MP-P: monopolaire en parallèle, BP-S: bipolaire en série.

I.6. Conclusion sur la bibliographie

Suite à cette étude bibliographique, il s'avère que l'application de l'électrocoagulation monopolaire a connu des applications dans des domaines très divers (les industries des colorants, textile, traitement de surface, l'agroalimentaire ...), contribuant à l'élimination de plusieurs composés d'origines différentes mais qui s'unissent par leurs impacts négatifs sur l'environnement.

La production de boues, bien qu'inévitable, est beaucoup moins importante que celles produites par le processus classique de coagulation. Ceci confère un certain avantage au niveau de la fréquence de vidange des boues décantées dans le système d'assainissement autonome.

Ce chapitre nous a permis de déceler un certain nombre de points peu ou pas assez abordés dans la littérature et qui sont pourtant primordiaux. La majorité des travaux effectués en cas continu, les débits d'alimentation sont faibles (≤ 10 L/h) et sans recirculation pour avoir des rendements 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 : Matériels et méthodes

II.1. Introduction

Ce chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés pour réaliser l'étude du procédé d'électrocoagulation (EC) en continu. Le chapitre présentera aussi une description des méthodes d'analyses et des outils utilisés pour l'évaluation des performances du procédé.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les paramètres influençant le fonctionnement de l'EC, tels que, la densité de courant j , le temps de traitement t , le mode de connexion des électrodes et la recirculation du liquide en étudiant 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 [33-36].

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 connexions d'électrodes. Le dispositif d'électrocoagulation électroflotation (EC-EF) 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 d'eau traitée.

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).

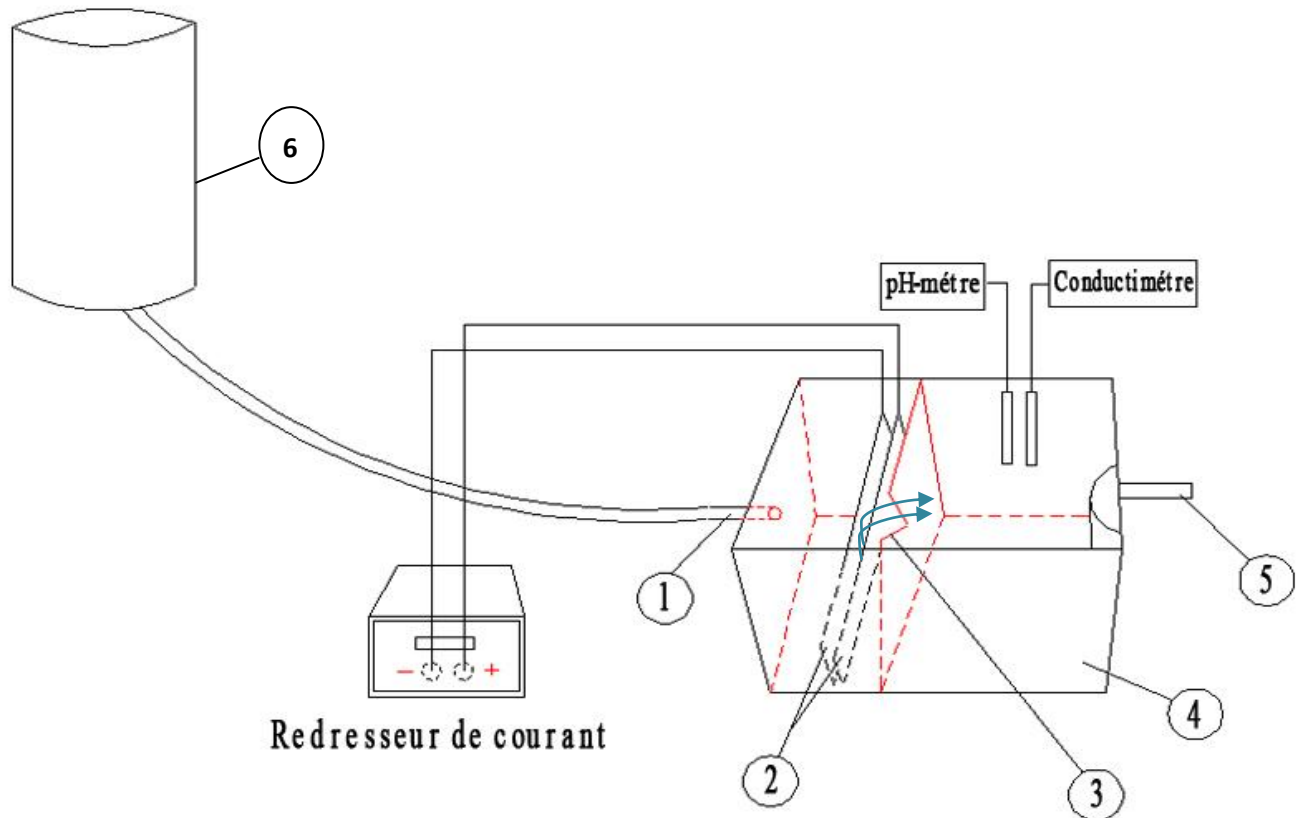


Fig. II.1 : Schéma du dispositif expérimental d'EC-EF en régime continu

(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 [37].

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) :

- Connexion bipolaire (BP)
- Connexion monopolaire en parallèle (MP-P)
- Connexion monopolaire en série (MP-S).

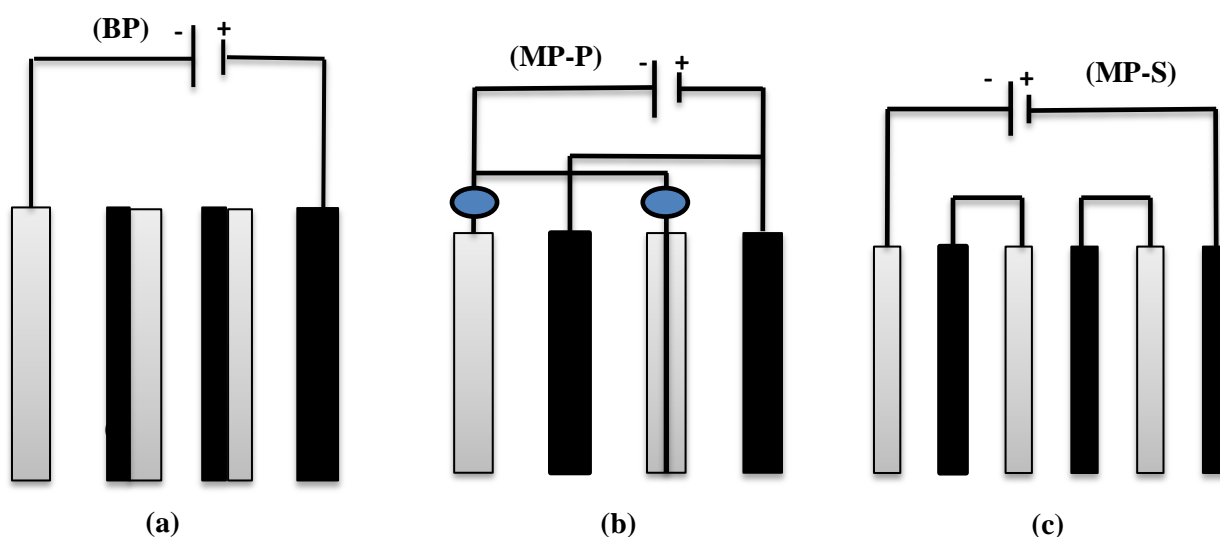


Fig. II.2 : Les trois modes de connexion d'électrodes étudiés

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 [33,35,36]. 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 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

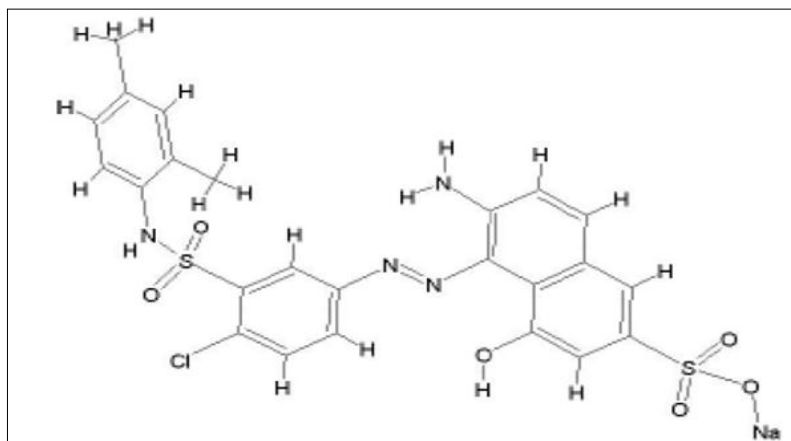


Fig. II.3 : Formule développée du Rouge Nylosan

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 ($\lambda_{\max} = 502 \text{ nm}$).

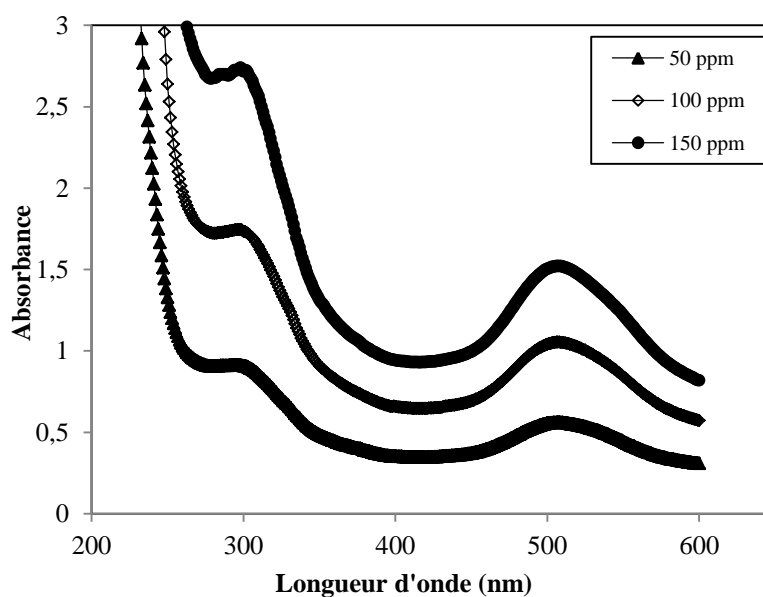


Fig. II.4 : Spectre d'absorption UV-visible du colorant étudié

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.

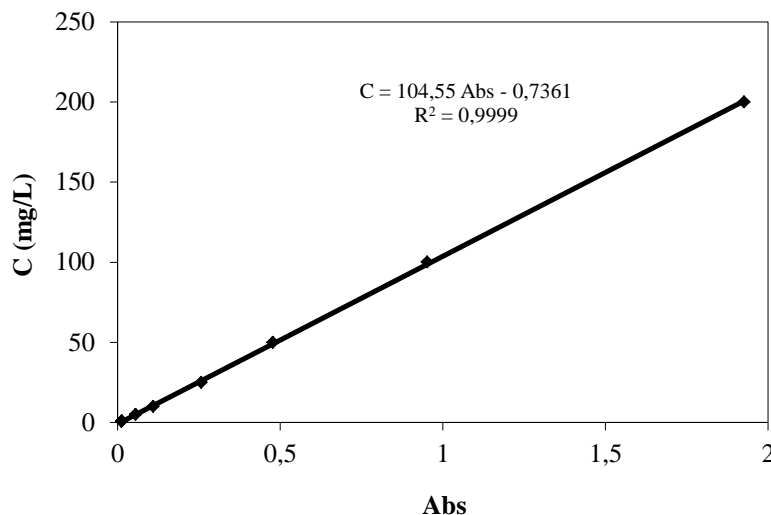


Fig. II.5. Courbe d'étalonnage du colorant au maximum d'absorption

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), et analysé la phase clarifiée après traitement. Ces analyses incluent les indicateurs de la dépollution (Turbidité, Absorbance).

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).



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

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



Fig. II.7 : Conductimètre "Hanna, EC214 "

II.5.2. L'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).



Fig. 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.



Fig. II.9 : Dispositif représentant le spectrophotomètre utilisé

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

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

Turb_i et Turb_f sont les turbidités de la solution avant et après traitement par EC-EF, en NTU.

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

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

Abs_i et Abs_f sont les absorbances de la solution avant et après traitement par EC-EF.

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 [33,35,36]:

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

$$\mu_{Al} \left(\frac{\text{kg Al}}{\text{kg dye}} \right) = \frac{3600 M_{Al} I \Phi_{Al}}{3F} \frac{1}{Q(C_i Y_{COL})}$$

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

La concentration initiale en colorant C_i est en kg/m^3 , 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 m^3/h , la masse molaire de l'aluminium M_{Al} (0.027 kg/mol), la constante de Faraday F (96487 C/mol) 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} :

$$\Phi_{Al} = \frac{\Delta m_{\text{exp}}}{\Delta m_{\text{th}}}$$

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 co-existence d'autres anions [33,38].

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) [15,33-36].

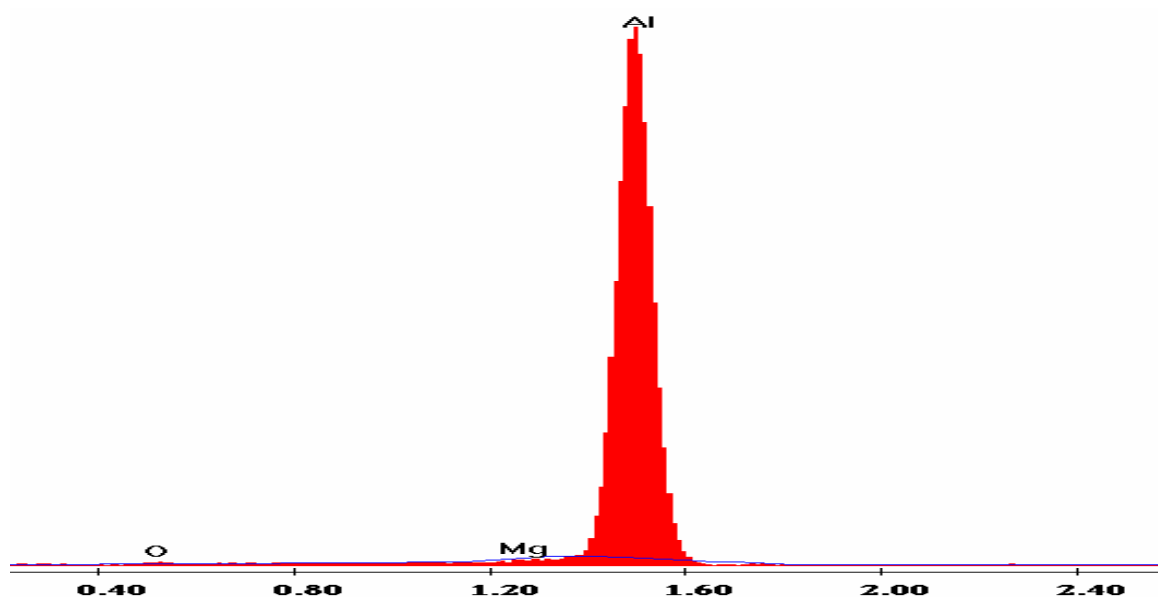


Fig. II.10 : Composition élémentaire du métal des électrodes utilisées par MEB

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des performances du procédé d'EC en continu, pour le traitement d'un effluent simulé de l'industrie de textile (rouge nylosan).

Les expériences ont été réalisées pour examiner 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 la recirculation du liquide sur l'efficacité d'élimination de la turbidité et de la couleur en terme d'absorbance.

III.2. Effet du mode de connexion des électrodes

III.2.1. Influence de la densité de courant

La densité de courant est jugée comme un paramètre essentiel en EC, spécifiquement pour la cinétique d'abattement de la DCO et celle de décoloration [22,24,33,37,38]. 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 augmente et leur taille diminue lorsque la densité de courant augmente. Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation.

L'effet de la densité de courant j sur l'élimination du colorant (absorbance et turbidité) a été évalué en variant diverses densités de courant (**100, 200 et 300 A/m²**) et pour les trois modes de connexion des électrodes (bipolaire *BP*, monopolaire en parallèle *MP-P* et monopolaire en série *MP-S*), à une concentration initiale fixe $C_i = 50 \text{ mg/L}$, **pH** initial aux alentours de **8** et un débit d'écoulement $Q = 15 \text{ L/h}$.

Les résultats trouvés sont représentés sur les figures suivantes.

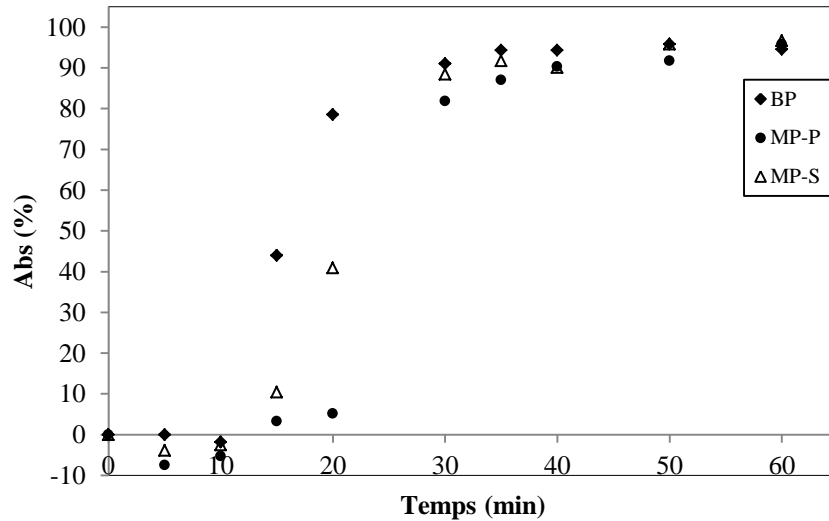


Figure III.1 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 100 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} = 7.79$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$

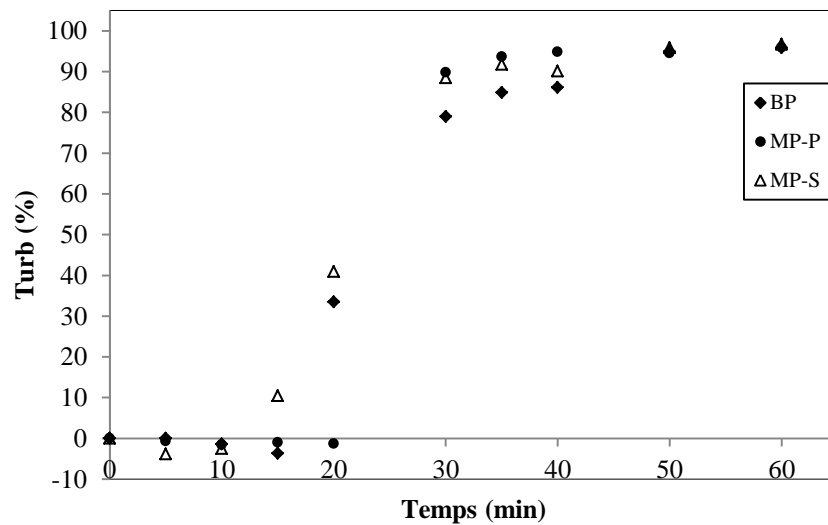


Figure III.2 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 100 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} = 7.79$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$

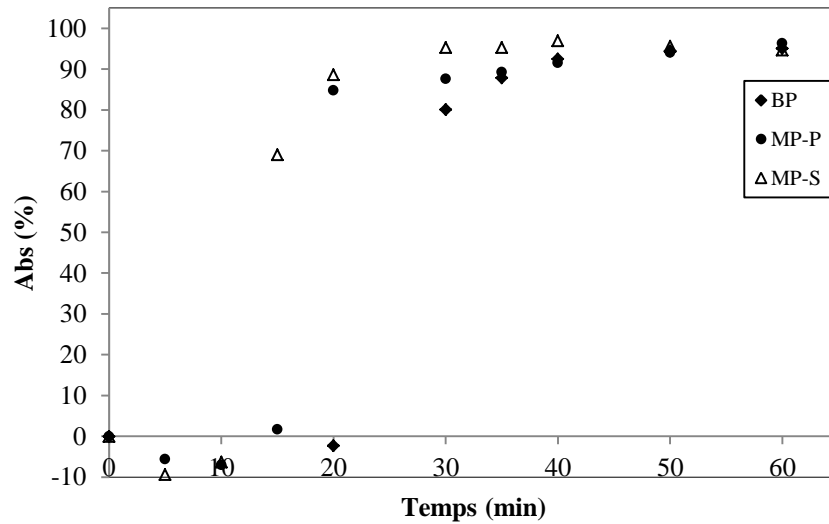


Figure III.3 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 200 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.90 \text{ mS/cm}$

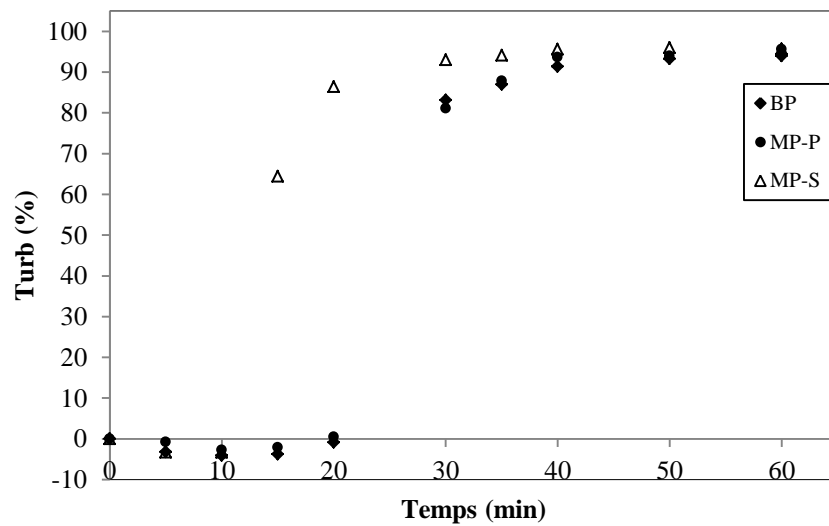


Figure III.4 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 200 \text{ A/m}^2$, pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.90 \text{ mS/cm}$

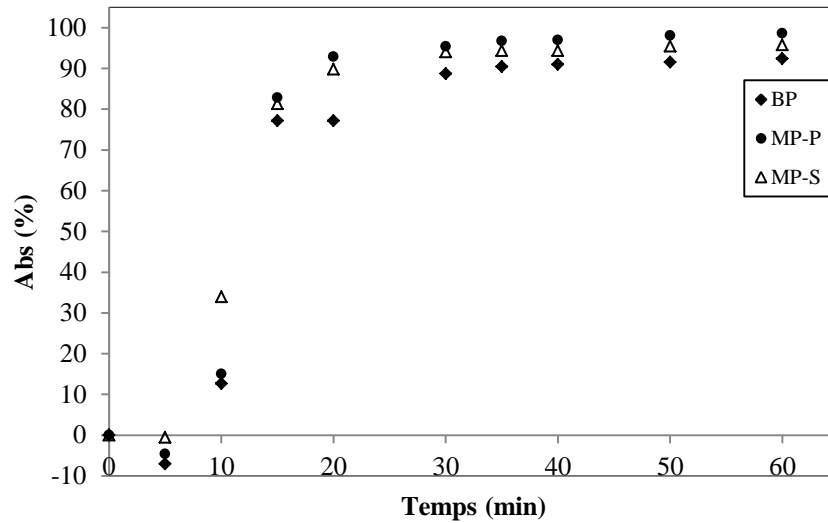


Figure III.5 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50$ mg/L, $j = 300$ A/m², pH initial = 8.06, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3.93$ mS/cm

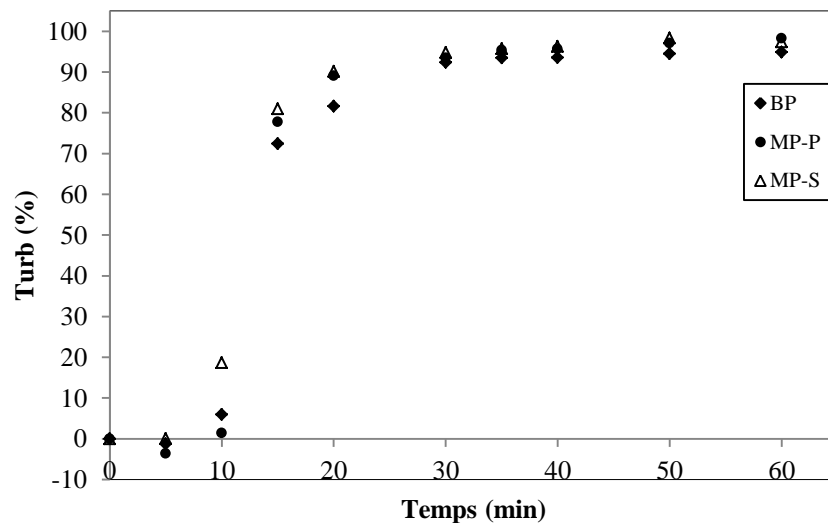


Figure III.6 : Effet du mode de connexion sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50$ mg/L, $j = 300$ A/m², pH initial = 8.03, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3.93$ mS/cm

Les figures (III.1 à III.6) montrent que le temps requis pour atteindre les valeurs optimales, correspondant aux valeurs sur le plateau, diminue lorsque j augmente de 100 à 300 A/m², et devient presque constant à environ 35 min, qui est le temps de séjour de l'effluent dans le réacteur. Une augmentation de densité de courant de 100 à 300 A/m² pour les trois modes de connexion a donné les résultats suivants.

Densité de courant $j(\text{A/m}^2)$	Connexion BP		Connexion MP-P		Connexion MP-S	
	Turb (%)	Abs (%)	Turb (%)	Abs (%)	Turb (%)	Abs (%)
100	86.08	86.90	89.31	83.27	92.06	91.75
200	87.87	87.90	95.67	93.58	94.16	95.33
300	93.52	90.42	95.37	96.72	95.75	94.33

On constate que le pourcentage d'abattement maximal est obtenu pour une densité de courant élevée (200 et 300 A/m²) avec les connexions monopolaire en parallèle (MP-P) et monopolaire en série (MP-S). En augmentant j , la quantité de cations d'Al³⁺ 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 significative pour $j= 100$ A/m².

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*[39] l'aluminium dissous se polymérise sous la forme d'hydroxyde d'aluminium et augmente ainsi la turbidité.

III.2.2. Energie consommée

Du point de vue efficacité, les deux modes de connexions (MP-P et MP-S) ont donné des résultats satisfaisants. Pour bien choisir le mode adéquat à notre système, le calcul énergétique s'impose. De nombreux travaux sur l'électrocoagulation ont porté sur la consommation énergétique en termes d'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) [33,40]. Cette énergie a souvent été étudiée en fonction des paramètres de l'EC d'une façon générale.

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_{eau}) sont calculées par les équations citées au chapitre II, section (II.6).

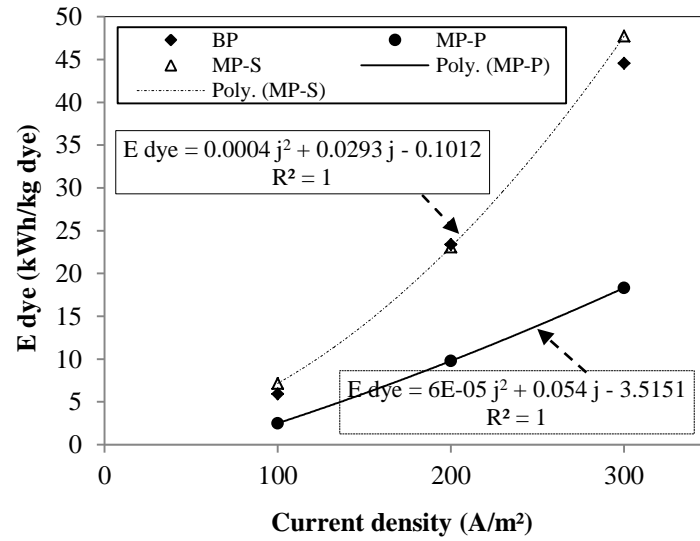


Figure III.7 : Effet de la densité de courant j sur l'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}):
 $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} = 8$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$,
 Conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$

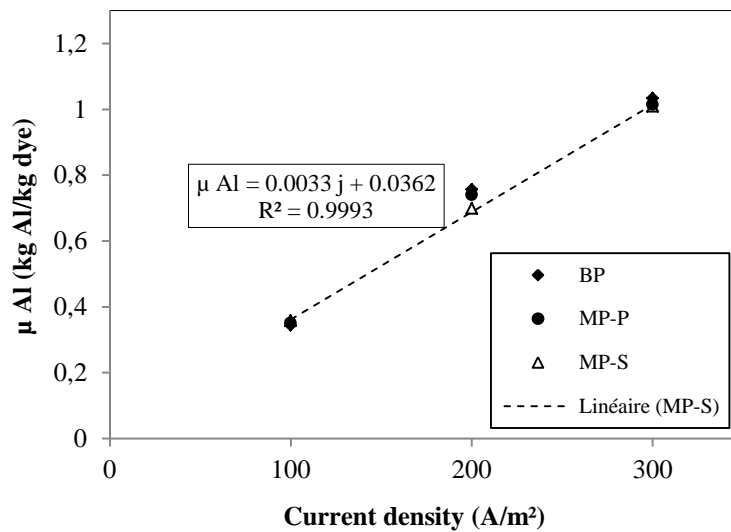


Figure III.8 : Effet de la densité de courant j sur consommation des électrodes (μ_{Al}): $C_i = 50 \text{ mg/L}$,
 $j = 300 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} = 8$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$,
 conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$

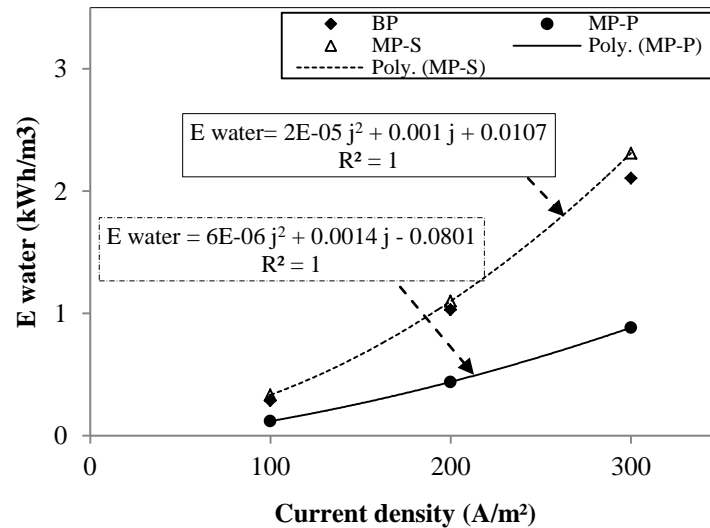


Figure III.9 : Effet de la densité de courant j sur l'énergie par m^3 d'eau traitée (E_{water}):
 $C_i = 50 \text{ mg/L}$, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $\text{pH initial} = 8$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$,
 Conductivité $\kappa = 2.9 \text{ mS/cm}$

Les figures (III.7 à III.9) montrent que E_{dye} , μ_{Al} et E_{water} augmentent d'une façon continue en fonction de la densité de courant j . 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. Cependant, E_{dye} ne représente qu'une fraction des coûts de l'opération d'électrocoagulation, entre 20 et 50 % [38]. D'après cet auteur, le coût principal est dû à la consommation du matériau des électrodes.

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.

De cela, on peut dire que la connexion monopolaire parallèle (MP-P) est plus efficace par rapport à la connexion monopolaire en série (MP-S) et à la connexion bipolaire (BP) en terme de la consommation d'énergie. Des résultats similaires en été obtenus par d'autres auteurs [41-43].

III.2.3. 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. Le procédé de l'EC montre 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' $\text{Al}(\text{OH})_3$ [15,22], qui empêche le changement élevé du pH de la neutralité, comme

le montre la figure (III.10). Ce rapprochement de la neutralité ($\text{pH} = 7$) constitue un avantage considérable pour la technique d'EC, tout en évitant l'ajout des acides ou des bases pour se situer dans la zone de la prédominance de la forme d'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui joue le rôle d'un coagulant (pH entre 5 à 9).

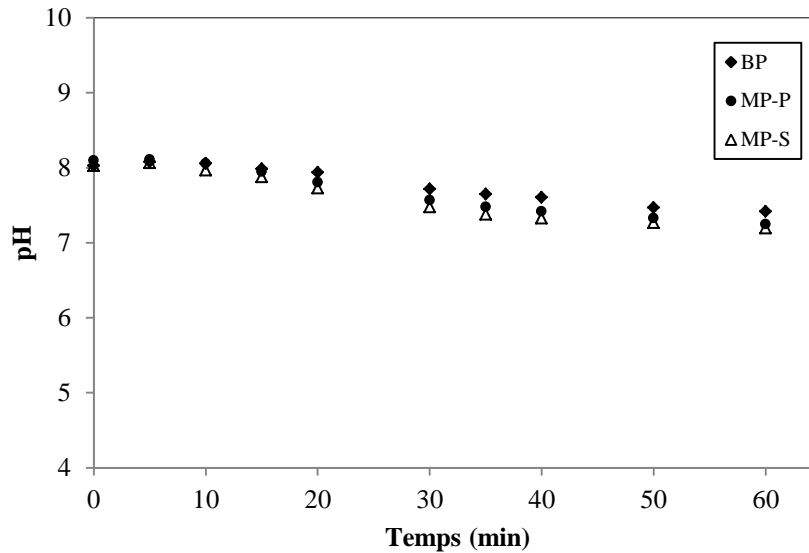


Figure III.10 : Evolution du pH au cours de l'EC: $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$

III.2.4. Evolution de la tension entre les électrodes au cours de l'EC

La figure (III.11) 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.

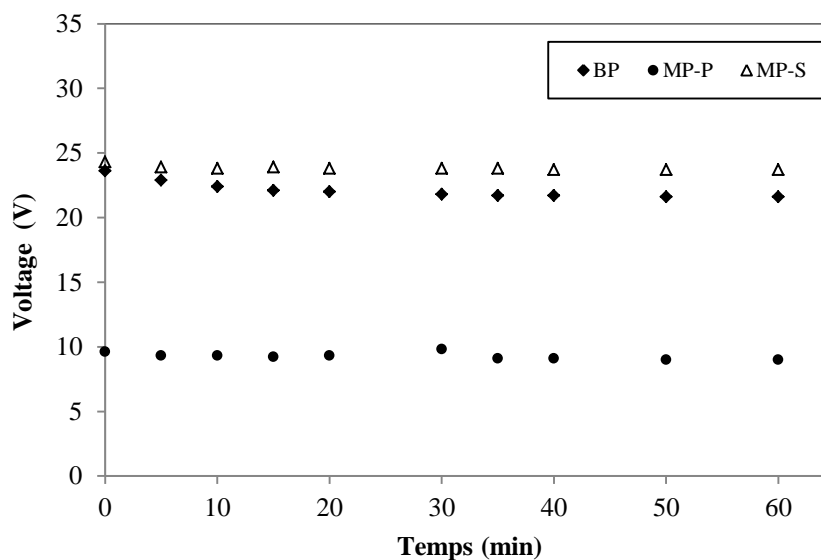


Figure III.11 : Effet de la connexion électrique sur la tension entre les électrodes, $C_i = 50 \text{ mg/L}$, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, conductivité $\kappa = 3.93 \text{ mS/cm}$

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[44].

Comme il a été déduit lors du calcul des différentes énergies, la connexion monopolaire parallèle (MP-P) 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 deux autres modes (BP et MP-S).

III.3. Effet de la recirculation de l'effluent à traiter

Pour voir l'influence de la recirculation de l'effluent sur l'abattement de la turbidité et de l'absorbance nous avons réalisé une série d'expériences de recirculation avec les différents modes de connexion des électrodes (MP à deux électrodes, BP à quatre électrodes et MP-P à quatre électrodes). Les résultats trouvés sont représentés sur les figures suivantes.

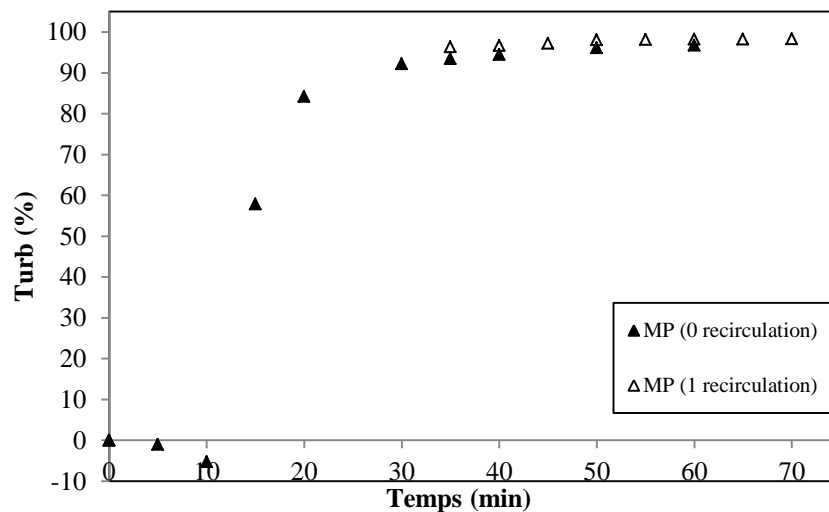


Figure III.12 : Effet de la recirculation de l'effluent sur l'élimination de la turbidité (MP): $C_i = 50$ mg/L, densité de courant $j = 300$ A/m², débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3.93$ mS/cm

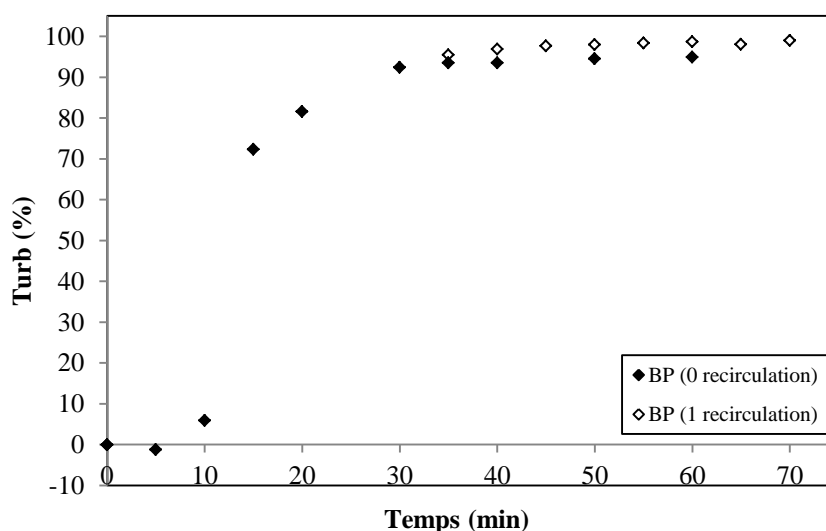


Figure III.13 : Effet de la recirculation de l'effluent sur l'élimination de la turbidité (BP): $C_i = 50$ mg/L, densité de courant $j = 300$ A/m², débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3.93$ mS/cm

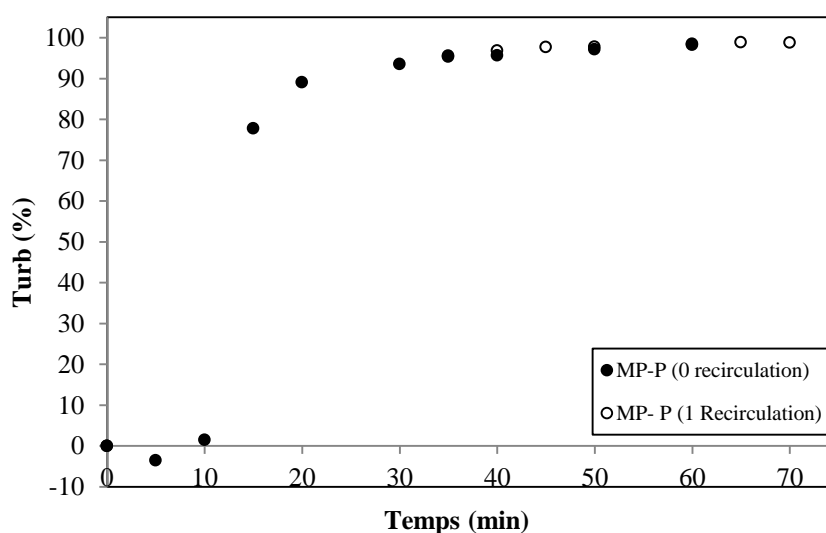


Figure III.14 : Effet de la recirculation de l'effluent sur l'élimination de la turbidité (MP-P): $C_i = 50$ mg/L, densité de courant $j = 300$ A/m², débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, conductivité $\kappa = 3.93$ mS/cm

D'après les résultats obtenus, malgré que les taux d'élimination de la couleur et de la turbidité soient tous supérieurs à 85 %, la recirculation (une fois) de l'effluent a augmenté considérablement ces taux d'abattement pour les deux modes (MP et BP). Pour la connexion monopolaire parallèle (MP-P), l'effet est légèrement supérieur.

III.4. Conclusion

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

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

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

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'élimination du colorant rouge nylosan présent dans les effluents des industries du textile par la technique d'électrocoagulation (EC) en continu.

La recherche bibliographique nous a permis de déceler un certain nombre de points peu ou pas assez abordés dans la littérature, notamment l'EC en continu, l'effet de la recirculation de l'effluent et le mode de connexion des électrodes. Ainsi, notre recherche comporte deux volets. Le premier s'est axé sur l'étude de l'effet du mode de connexion des électrodes (bipolaire BP, monopolaire en parallèle MP-P et monopolaire en série MP-S) et la densité de courant sur la décoloration et l'élimination de la turbidité. Tandis que, le deuxième, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de la recirculation de l'effluent sur les performances de la technique d'EC.

Les résultats expérimentaux ont prouvé que le procédé d'EC nous a permis:

- de conclure que le procédé a été effectivement affecté par la densité de courant, le mode de connexion des électrodes et de la recirculation de l'eau usée à traiter.
- de déduire que les taux les plus élevés de décoloration et de l'élimination de la turbidité sont obtenus avec des densités de courant (200 et 300 A/m²) et pour les trois modes de connexion étudiés (87.87 - 96.72).
- de réduire la consommation d'énergie, et donc du cout d'exploitation en utilisant la connexion monopolaire parallèle (MP-P).

A titre de **perspectives**, d'autres travaux peuvent être envisagés :

- Etude comparative avec d'autres techniques de traitement telles que, la coagulation floculation chimique, l'adsorption ...
- Etude de l'influence de la position (horizontale et verticale) des électrodes, matériau des électrodes.
- Etude et caractérisation de la boue formée lors du traitement par EC.
- Etude des rendements Faradiques en analysant l'aluminium par spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A).

Références Bibliographiques

- [1] Bensaid J, Contribution à la dépollution des eaux usées par électrocoagulation et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium, Thèse de Doctorat d'état (2009), Université Mohammed 5-Agdal, Maroc.
- [2] Bennajah M, traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflottation en réacteur airlift, Thèse de Doctorat d'état (2007), Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [3] Meinck F, Stooff H, Kohlschutter H, Les eaux résiduaires industrielles, 2^{ème} édition MASSON (1977).
- [4] Oubagha N, décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétique, Mémoire de magister(2011), Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- [5] Martineau G.-P, Maladies d'élevage des porcs, France agricole éditions, (1997).
- [6] WIKIPEDIA 2011, Industrie textile, valable sur le site Internet : <http://fr.wikipedia.org>
- [7] Zidane F, Rhazzar A, Blais J.-F, Ayoubi K, Bensaid J, El basri S, Kaba N, Fakhreddine Q, Lekhlif B, Contribution à la dépollution des eaux usées de textile par électrocoagulation et par adsorption sur des composés à base de fer et d'aluminium, Int. J. Biol. Chem. Sci. 5 (4) (2011) 1727-1745.
- [8] Nozet H, Textiles chimiques - Fibres modernes. Edition Eyrollès, Paris (1976).
- [9] DOS Santos A.B, Reactive decolourisation of deys by thermophilic anaerobic granular sludge. These Doctorat (2005), Wageningen University (Pay-Bas).
- [10] Flandrin-Bletty M. Technologie et Chimie des Textiles. Edition Cépaduès, 1976.
- [11] Capon M, Courilleu V, Valette C, Chimie des couleurs et des odeurs, Nantes, Culture et technique, (1999).
- [12] Zhenwang L, Zhenluc L, Jranjan L. The pt dye molecular structure and its chromophoriclumnescencesmechanism, 15th word conference on non-destructive testing 15-21 october 2000, Rome.
- [13] Cooper P, Colour in dyestuff effluent, the society of dyers and colourists, Oxford: Aden Press. (1995).
- [14]Reffas, A. 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 (2010), Université de Constantine.
- [15] Merzouk, B, Etude expérimentale pour le traitement des eaux usées industrielles par électroflottation. Thèse de Doctorat (2009), Université de Bejaia.
- [16] Zodi S, 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 (2012), Université de Lorraine.
- [17] Zongo I, 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 (2009), Université de Nancy.
- [18] Lemlikchi W, Elimination de la pollution des eaux industrielles par differentsprocedes d'oxydation et de co-precipitation, Thèse de Doctorat (2012), Université de Tizi-Ouzou.

- [19] Zongo, I. Wéthé, J. Merzouk, B. Maiga, A.H. Lapique, F. Leclerc, J.P, Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 62 N^o2 (2011) 216-235.
- [20] M. Kobya 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.
- [21] Merzouk B., Gourich B., Madani K., Vial Ch., Sekki A., Removal of a disperse red dye from synthetic wastewater by chemical coagulation and continuous electrocoagulation: A comparative study, *Desalination*, 272 (2011) 246-253.
- [22] Merzouk B., Gourich B., Sekki A., Madani K., Vial Ch., Barkaoui M., Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process, *Chem. Eng. J.* 149 (2009) 207-214.
- [23] Kim T.H., Park C., Shin E.B., Kim S., Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process, *Desalination*, 150 (2002) 165-175.
- [24] Zodi S., Merzouk B., Potier O., Lapique F., Leclerc J.P., Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor, *Sep. Purif. Technol.* 108 (2013) 215-222.
- [25] Valero D., Ortiz J.M., Exposito E., Montiel V., Aldaz A., Electrocoagulation of a synthetic textile effluent powered by photovoltaic energy without batteries: Direct connection behaviour, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 92 (2008) 291-297.
- [26] Tyagi N., Mathur S., Kumar D., Electrocoagulation process for textile wastewater treatment in continuous upflow reactor, *J. Sci. Ind. Res.* 73 (2014) 195-198.
- [27] Phalakornkule C., Sukkasem P., Mutchimsath C., Hydrogen recovery from the electrocoagulation treatment of dye-containing wastewater, *Inter. J. Hydrogen Energy*, 35 (2010) 10934-10943.
- [28] Mollah M.Y.A., Gomes J.A.G., Das K.K., Cocke D.L., Electrochemical treatment of Orange II dye solution-Use of aluminum sacrificial electrodes and floc characterization, *J. Hazard. Mater.* 174 (2010) 851-858.
- [29] Chang E.E., Hsing H.J., Ko C.S., Chiang P.C., Decolorization, mineralization, and toxicity reduction of acid orange 6 by iron-sacrificed plates in the electrocoagulation process, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 82 (2007) 488-495.
- [30] Mollah M.Y.A., Pathak S.R., Patil P.K., Vayuvegula M., Agrawal T.S., Gomes J.A.G., Kesmez M., Cocke D.L., Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes, *J. Hazard. Mater.* 109 (2004) 165-171.
- [31] Un U.T., Aytac E., Electrocoagulation in a packed bed reactor-complete treatment of color and COD from real textile wastewater, *J. Environ. Manage.* 123 (2013) 113-119.
- [32] Shin S.H., Kim Y.H., Jung S.K., Suh K.H., Kang S.G., Jeong S.K., Kim H.G., Combined performance of electrocoagulation and magnetic separation processes for treatment of dye wastewater, *Korean J. Chem. Eng.* 21 (2004) 806-810.
- [33] Amour A., Merzouk B., Leclerc J.-P., Lapique F., Removal of reactive textile dye from aqueous solutions by electrocoagulation in a continuous cell, *Desal. Water Treat.* 57 (2016) 22764-22773.
- [34] Boudjemaa R., 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 (2013), Université de M'sila.
- [35] Tiaiba M., Traitement d'un effluent simulé de l'industrie de textile par un réacteur continu d'électrocoagulation, Mémoire de fin d'études (2015), Université de M'sila.

- [36] Zidelkhir R, Application de la photovoltaïque pour le traitement d'un effluent industriel par électrocoagulation, Mémoire de fin d'études (2016), Université de M'sila.
- [37] Merzouk B, Madani K, Sekki A, Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique, *Desalination*, 228 (2008) 245-254.
- [38] Bayramoglu M, Kobya M, Can O.T, Sozbir M, Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Sep. Purif. Technol.* 37 (2004) 117-125.
- [39] Edeline F, L'épuration physico-chimique des eaux, théorie et technologie, Cebedoc Editeur Lavoisier Tec. et Doc. (1996).
- [40] Daneshvar N, Khataee A.R., AmaniGhadim A.R., Rasoulifard M.H, Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC), *J. Hazard. Mater.* 148 (2007) 566–572.
- [41] Ghosh D, Medhi C.R, Purkait M.K, Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections, *Chemosphere*, 73 (2008) 1393–1400.
- [42] Solak M, Kiliç M, Yazici H, Sencan A, Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: Comparison of electrode materials and electrode connection systems, *J. Hazard. Mater.* 172 ((2009) 345-352.
- [43] Attour A, Grich N.B, Tlili M.M, Amor M.B, Lapique F, Leclerc J.-P, Intensification of phosphate removal using electrocoagulation treatment by continuous pH adjustment and optimal electrode connection mode, *Desal. Water Treat.* 57(28) (2016) 13255–13262.
- [44] Hu C.Y, Lo S.L, Kuan, W.H, Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminium electrodes, *Water Res.* 37 (2003) 4513-4523.

Résumé

Au cours de ces dernières années des études réalisées sur les colorants textiles ont montré qu'ils sont parmi les éléments les plus toxiques, dont les effets de leur toxicité, et sont aussi généralement cancérogènes pour les êtres vivants. En effet, dans le but d'éviter ce fléau, on a cherché des technologies efficaces pour éliminer ces colorants ou au moins atteindre des concentrations très faibles dans les effluents industriels.

Dans ce travail, nous avons étudié expérimentalement l'élimination du colorant rouge nylosan présent dans les effluents des industries du textile par la technique d'électrocoagulation (EC) en continu. Dans une première partie, nous avons étudié l'effet de la densité de courant et du mode de connexion des électrodes (BP, MP-P et MP-S). Dans une deuxième, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de la recirculation de l'effluent sur les performances de la technique d'EC. Nous avons pu conclure que l'EC est un procédé efficace pour le traitement des eaux colorées dans nos conditions expérimentales surtout avec le mode MP-P.

Mots clés : Electrocoagulation (EC), Electrodes en aluminium, Turbidité, Couleur, Colorant Rouge Nylosan, Mode de connexion des électrodes.

Abstract

During recent years studies carried out on textile dyes have shown that they are among the most toxic elements, including the long term effects of their toxicity, since they are carcinogenic and also very harmful for living beings. Indeed, in order to avoid this problem, attempts have been made with using efficient technologies to remove these dyes, or at least reach very low concentrations in industrial effluents. In this work, we studied the in experiments the elimination of the red nylosan dye present in the textile wastewater using electrocoagulation (EC) technique in continuous mode. In the first part, we studied the effect of current density and the connection mode of the electrodes (BP, MP-P and MP-S).

In the second part of this work, we were interested to the study of the influence of the recirculation of the effluent on the performances of the EC technique. We could conclude that the EC method is an efficient removal process within our operating conditions, especially with the MP-P mode.

Keywords: Electrocoagulation (EC), Aluminum electrodes, Turbidity, Color, Red Nylosan dye, Connection mode, Electrode connection modes.