

**Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila



**Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique**

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

FILIERE : Hydraulique

Option : Hydraulique urbaine

THEME

**Utilisation de la photovoltaïque pour le Traitement d'un
effluent industriel par d'électrocoagulation**

**Dirigé par :
Dr. B. MERZOUK**

**Présenté par :
Zidelkhir Rabeh**

Promotion: 2015/2016

Remerciements

*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 tíaíba

*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.*

Zid elkhír Rabah

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Allah le tout miséricordieux qui par sa grâce, A rendu possible l'accomplissement de ce travail.

Mes très chers parents.

Toute ma famille.

Tous mes amis de groupe hydraulique urbain.

Tous mes amis de l'université.

Sans oublié bien sur le professeur Merzouk et le corps Enseignants et personnel de département D'hydraulique de l'université de M'sila.

Zidelkhir Rabeih

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : synthèse bibliographique

I.1. Introduction	2
I.2. Généralité surphotovoltaïque.....	2
I.2.1.Générateur photovoltaïque.....	3
I.2.2. Effet photovoltaïque.....	4
I.3.Généralités sur la pollution.....	5
I.3.1. Définitions.....	5
I.3.2. Les sources de la pollution.....	5
I.3.3. Les types de polluants.....	7
I.3.4. Paramètres de pollution des eaux.....	9
I.3.5. Les métaux lourds	10
I.3.6. La toxicité des métaux lourds	10
I.3.7. Sources d'émission	10
I.3.8.Les matières en suspension (MES).....	11
I.3.9.Les matières organiques (M.O).....	11
I.3.10.Les matières inhibitrices (MI).....	11
I.4. Généralité sur les colorants.....	12
I.4.1. Définition d'un colorant.....	12
I.4.2. Classification technique des colorants	13
I.4.3. Utilisation des colorants.....	14
I.4.4. La coloration textile	14
I.4.5. Problèmes environnementaux issus de l'industrie textile.....	15
I.4.6 .Normes de rejets	15
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.....	18
I.5.3. Les différents modes de connexions électriques.....	20
I.5.4.Principales lois d'électrolyse	22

I.5.5. Rendement faradique et rendement énergétique.....	23
I.5.6. Evaluation de la tension imposée aux bornes de la cellule d'électrolyse	24
I.5.7. Etapes de la réaction électrochimique.....	26
I.5.8. Les espèces en solution.....	28
I.6. Etapes de la coagulation	33
I.6.1. Diagramme de coagulation- floculation.....	34
I.6.2. Oxydation des électrodes: structure et transfert.....	34
I.7. Les colloïdes	36
I.7.1. Définition	36
I.7.2. Classement et formation des colloïdes.....	36
I.7.3 Propriétés électrostatiques : la charge de surface	37
I.7.4. Comparaison entre la coagulation-floculation chimique et l'électrocoagulation	39
I.8. Conclusion sur la bibliographie.....	39

Chapitre II : Matériaux et méthodes

II.1. Introduction	41
II.2. Choix du procédé	41
II.3. Traitement par EC à l'aide d'un réacteur continu	41
II.4. Caractéristiques des colorants utilisés.....	43
II.4.1. Rouge Nylosan	43
II.4.2. Spectre d'absorption en UV-visible	44
II.4.3. Rouge Congo	44
II.4.4. Spectre d'absorption en UV-visible	45
II.5. Méthodes analytiques.....	46
II.5.1. Suivi des paramètres en ligne	46
II.5.2. L'analyse chimique.....	47
II.6. L'énergie consommée	49
II.7. Les électrodes utilisées.....	49

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	51
III.2. Interprétation des résultats du courant continu	51
III.2.1. Influence de la densité de courantsur l'élimination du colorant Rouge Congo	51
III.2.2. Energie consommée	53
III.2.3. L'effet du mélange des deux colorants (Rouge Congo et Rouge Nylosan).....	55
III.2.4. Influence de la concentration initiale sur l'élimination du colorant Rouge Nylosan.....	56
III.3. Application de la photovoltaïque.....	57
III.3.1. Influence de la concentration initiale sur l'élimination du colorant Rouge Nylosan.....	57
III.3.2.Comparaison entre un générateur de courant électrique et un générateur photov.....	59
III.3.3. Comparaison de la densité de courant (j) entre les deux types de sources.....	60
III.3. Conclusion partielle	61

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

N° de tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Tableau I.1: Seuil de toxicité de polluants organiques	08
Tableau I.2	Tableau I.2: Seuil de toxicité des polluants minéraux en France	09
Tableau I.3	Tableau I.3 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants	15
Tableau I.4	Tableau I.4: Les valeurs limitent des paramètres de rejet industriel dans un milieu récepteur (Journal officiel de la république algérienne N° 26, 23 avril 2006)	16
Tableau I.5	Tableau I.5 : Modes de connexion et valeurs des intensités et des tensions	22
Tableau II.1	Tableau N° II.1 : Propriétés du Rouge Nylosan N-2RBL	43
Tableau II.2	Tableau N° II.2 : Propriétés du Rouge Congo	45
Tableau III.1	Tableau III.1. Comparaison des paramètres énergétiques entre les deux sources d'énergie	61

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

N ^o de la figure	Titre	Page
Figure I.1	Figure I.1: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque	03
Figure I.2	Figure I.2 : Conduction dans les matériaux semi-conducteurs	04
Figure I.3	Figure I-3: Schéma du principe de l'électrocoagulation	19
Figure I.4	Figure I.4 : Les différents modes de fonctionnement envisageables pour une cellule d'électrocoagulation et les circuits électriques associés	21
Figure I.5	Figure I.6 : Les différentes étapes d'une réaction électrochimique (Bard et Faulkner 1983).	27
Figure I.6	Figure I-6 : Formes d'aluminium pouvant exister lors de la dissolution d'une anode d'aluminium (Khemis, 2005)	28
Figure I.7	Figure I.7 : Diagramme potentiel-pH de l'aluminium dans les conditions standard	29
Figure I.8	Figure I.8: Influence du pH sur la dissolution de l'aluminium	30
Figure I.9	Figure I.9 : Répartition des espèces hydrolysées de l'aluminium en fonction du pH	31
Figure I.10	Figure I.10 : Mécanismes d'oxydation de l'aluminium selon Radovan	33
Figure I.11	Figure I-11 : Mécanisme de corrosion par les ions chlorures et hydroxydes par piqûre sur un alliage d'aluminium (Khemis, 2005).	36
Figure 1-12	Figure 1-12 : Structure et composition de la double couche sur une particule colloïdale	38
Figure II.1	Figure II.1 : Unité d'électrocoagulation-électroflottation en régime continu	42
Figure II.2	Figure II.2 : Le panneau photovoltaïque utilisé (ET-M 53685)	42
Figure II.3	Figure II.3 : Formule développée du Rouge Nylosan N-2RBL	44
Figure II.4	Figure II.4 : Spectre d'absorption UV-vis du colorant Rouge Nylosan N-2RBL dans l'eau	44
Figure II.5	Figure II.6 : Formule développée du Rouge Congo (Direct Red 28)	45
Figure II.6	Figure II.7 : Spectre d'absorption UV-vis du colorant Rouge Congo dans l'eau -Absorbance en fonction de la longueur d'onde	45
Figure II.7	Microprocessor pH Meter "HANNA pH 210"	46
Figure II.8	conductivity Meter "Hanna, EC214 "	47
Figure II.9	Turbidimeter Hanna "HI88703"	48
Figure II.10	Dispositif représentant le spectrophotomètre utilisé	48
Figure II.11	Composition élémentaire du métal des électrodes réalisée par MEB	50
Figure III.1	Figure III.1 : Effet de la densité de courant j sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, $Q = 15$ L/h	52
Figure III.2	Figure III.2 : Effet de la densité de courant j sur l'élimination de la turbidité: $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, $Q = 15$ L/h	52
Figure III.3	Figure III.3 : Effet de la densité de courant j sur l'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}), $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, débit d'alimentation, $Q = 15$ L/h.	54
Figure III.4	Figure III.4 : Effet de la densité de courant j sur la consommation des	54

	électrodes (μ_{Al}): $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, $Q = 15$ L/h.	
Figure III.5	Figure III.5 : Effet de la densité de courant j et de mélange des deux colorants sur l'élimination de la l'absorbance : $C_i = 50 + 50$ mg/L, pH initial = 10.8, débit d'alimentation, $Q = 15$ L/h	55
Figure III.6	Figure III.6 : Effet de la densité de courant j et de mélange des deux colorants sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 + 50$ mg/L, pH initial = 10.8, débit d'alimentation, $Q = 15$ L/h	55
Figure III.7	Figure III.7 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la couleur : pH initial = 7.41, densité de courant $j = 300$ A/m ² , débit d'alimentation, $Q = 15$ L/h,	56
Figure III.8	Figure III.8 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la turbidité : pH initial = 7.41, densité de courant $j = 300$ A/m ² , débit d'alimentation, $Q = 15$ L/h.	57
Figure III.9	Figure III.9 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la couleur :	58
Figure III.10	Figure III.10 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la turbidité : pH initial = 8.02, $Q = 15$ L/h.	58
Figure III.11	Figure III.11 : Effet de la concentration initiale C_i et de générateur de courant sur l'efficacité d'élimination de la couleur : $Q = 15$ L/h.	59
Figure III.12	Figure III.12 : Effet de la concentration initiale C_i et de générateur de courant sur l'efficacité d'élimination de la turbidité , $Q = 15$ L/h.	60

Résumé

Résumé

Ce travail avait pour objectif d'étudier expérimentalement le traitement d'un effluent industriel de textile par électrocoagulation (EC) en continu. Nous avons étudié les paramètres principaux (densité de courant, temps de traitement, concentration initiale...) influençant le procédé en utilisant un modèle d'eau usée simulée, constitué des colorants Rouge Nylosan, Rouge Congo et leur mélange dans l'eau. Une énergie électrique à courant continu et la photovoltaïque ont été utilisées.

L'application des paramètres optimisés a montré une réduction acceptable de la turbidité et de la couleur. Les résultats obtenus amènent à la conclusion que l'EC en continu et avec des électrodes en aluminium est une technique de choix pour la clarification des effluents de textile.

***Mots clés :** Electrocoagulation (EC), Electrodes en aluminium, Turbidité, Couleur, Colorant, Photovoltaïque.*

Abstract

The present work had a purpose to study experimentally the treatment of industrial textile wastewater using electrocoagulation (EC) technique in continuous mode. We studied the principal parameters (current density, residence time, initial concentration...) influencing the process by using simulated wastewater, consisted of the Red Nylosan dye, Red Congo dye and their mixture in water. An electric power with direct current (D.C) and the photovoltaic energy were used.

The application of the parameters optimized showed an acceptable reduction of turbidity and color. The results lead to the conclusion that the continuous EC with aluminum electrodes is a technique of choice for clarification of textile wastewater.

***Keywords:** Electrocoagulation (EC), Aluminum electrodes, Turbidity, Color, dye, Photovoltaic.*

Introduction générale

Introduction générale

Les effluents urbains ou industriels sont chargés de matières polluantes de différents types : organique, minérale, physique etc., ... Ceci confère à ces effluents un caractère agressif et nuisible pour le milieu récepteur. Pour s'affranchir de la pollution responsable de nombreux dégâts infligés à l'écosystème, et à la ressource en eau dont les utilisations sont multiples (alimentation en eau potable, pisciculture, besoins des industries en eau, agriculture, etc.), de nombreux procédés sont mis en œuvre. Parmi ceux-ci, les techniques d'épuration électrochimiques, telle que l'électrocoagulation (EC) qui prennent de plus en plus d'importance.

L'EC est une technique dérivée de la coagulation floculation classique. Elle permet d'éliminer les particules colloïdales et la pollution dissoute grâce à la production *in-situ* de floes d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles (Fe, Al) lors de passage de courant électrique. L'utilisation d'électrodes solubles d'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 $Al(OH)_3$. Les hydroxydes réagissent avec les matières en suspension ainsi qu'avec certains composés dissous et permettent leur coagulation et floculation de ces agglomérations de particules. 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 floes ainsi formés. En outre, l'EC requiert moins de réactifs et permet de réduire le volume de boues générées comparativement à la coagulation chimique qui nécessite des concentrations élevées de réactifs, entraînant ainsi une augmentation du volume de boues.

Afin d'apporter une contribution à ces problématiques, nous adoptons le plan suivant.

- Le **chapitre I** présente une étude bibliographique : généralité sur les générateurs photovoltaïques et un aperçu sur le traitement des effluents industriels par l'EC en mettant en évidence l'état de l'art de ce procédé et son histoire.
- Le **chapitre II** 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 **chapitre III** résume les principaux résultats obtenus.

Une conclusion générale et les perspectives pour de futures recherches viendront clore cette étude.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

La présence de nombreux colorants dans les rejets de l'industrie du textile à-vis des agents oxydants (rayons UV, oxydants chimiques), et leur faible biodégradabilité. Les procédés traditionnels de traitement de l'eau usée, tels que les procédés biologiques donnent des résultats non satisfaisants. Ainsi la principale contrainte d'utilisation de cette méthode provient de la difficulté d'accumuler des bactéries à certains effluents et leur inhibition par certaines composantes chimiques et aussi, la durée de traitement. Pour cette raison, des nouvelles recherches sur des nouvelles méthodes. Parmi lesquelles : l'électrocoagulation, mais cette dernière est très coûteuse et non régénérable ; d'où la nécessité de rechercher quelques solutions pour diminuer ces couts d'utilisation, telles que de nouvelles sources d'énergie (solaire, éolienne,...).

Le procédé d'électrocoagulation crée dans l'eau à épurer des complexes de type $Al_2(OH)^{5+}$, $Al(OH)_2^{4+}$ ou des hydroxydes $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, qui jouent le rôle de coagulant en formant des agrégats de particules qui sont décantées après pour avoir une eau claire [1].

I.2. Généralité sur photovoltaïque

La consommation d'énergie, durant le siècle dernier a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voir amplifier cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

La nécessité est la mère de l'invention. L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie a conduit à rechercher d'autres sources d'énergie, Et c'est ce qui rend le monde se dirige vers les énergies renouvelables.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables ,l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire .L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisation sen polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

En général, l'énergie solaire, l'une des sources les plus importantes d'énergies renouvelables, basée sur le principe de la conversion de l'énergie solaire "effet photovoltaïque".

L'énergie photovoltaïque est une de ces sources alternatives d'énergie et, malgré sa contribution jusqu'à maintenant modeste, elle est appelée à devenir une des sources majeures d'énergie du futur.

D'autre part, le développement technologique "dans le domaine d'énergie solaire" a conduit à une augmentation des rendements de l'énergie solaire, Mais cela reste un rendement relativement modeste [2].

1.2.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et, nulle la nuit [1].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [2].

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

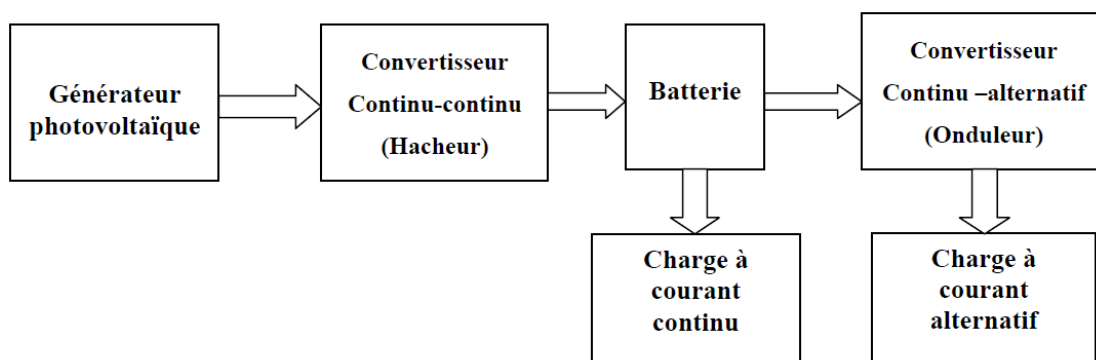


Figure I.1: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque[2]

I.2.2. Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [2].

I.2.3. Cellules photovoltaïques

L'utilisation des cellules solaires débute dans le domaine spatial. Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique de 1973 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du " bande gap ", E_g en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 (eV) pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 (eV) pour le silicium cristallin, et de 1.7 (eV) pour le silicium amorphe. La figure I.2 montre le phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs [3].

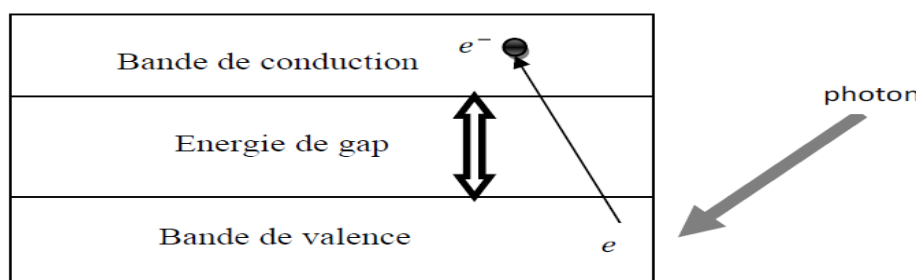


Figure I.2 : Conduction dans les matériaux semi-conducteurs

✓ Les avantages

- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins patiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

✓ Inconvénients

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.

Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.[3]

I.3.Généralités sur la pollution***I.3.1. Définitions***

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.3.2. Les sources de la pollution

L'eau dans la nature et a 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.

a) La Source urbaine

L'origine des eaux résiduaires urbaines est principalement domestique où les populations génèrent les $\frac{3}{4}$ 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 [4].

b) les 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. [5] 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 [6].

c) 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 [6]. 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.

d) 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 [6].

e) 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 [7].

1.3.3. Les types de polluants

Les eaux usées véhiculées par le réseau d'assainissement contiennent toutes sortes de résidus rejetés par les utilisateurs de l'eau courante, industriels, mais aussi de l'eau de pluie après ruissellement sur les chaussées, trottoirs et toitures de la ville.

Ces eaux résiduaires peuvent contenir des flottants, des matières en suspension et des matières dissoutes. La pollution chimique (minérale) libère dans ces derniers divers composés tels que les nitrates, les phosphates, des sels utilisés en agriculture ainsi que divers résidus rejetés par la métallurgie (Pb, Cd, Hg) et d'autres activités (hydrocarbures)

❖ Polluants organiques

Les polluants organiques sont les plus nombreux et les plus dangereux. Certaines de ces substances sont même cancérigènes ou mutagènes, d'où l'importance de les éliminer. Ils peuvent être classés en phénols, hydrocarbures, colorants, détergents et pesticides, formant de loin, la première cause de pollution des ressources en eaux. Ces matières organiques sont notamment issues des effluents domestiques (déjections animales et humaines, graisses, etc.) mais également des rejets industriels. Elles provoquent l'appauvrissement en oxygène des milieux aquatiques, avec des effets bien évidents sur la survie de la faune. Ce sont aussi tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre ou le lactosérum des industries agro-alimentaires. À l'inverse des matières en suspension (MES), elles constituent une nourriture de choix pour les microorganismes de l'eau et provoquent leur prolifération. Les matières organiques se mettent alors à vider le milieu de son oxygène, ce qui s'avère fatal pour la vie aquatique et les micro-organismes vont le chercher dans les sulfates dissous (SO_4^{2-}), qu'elles réduisent en sulfure, qui se dégage sous forme de sulfure d'hydrogène, engendrant une odeur d'œufs pourris [8]. Le seuil de toxicité de polluants organiques est présenté sur le tableau (I.1).

Tableau I.1: Seuil de toxicité de polluants organiques [8]

Polluants	Procédé aérobie	Nitrification	Procédé anaérobie
	(valeur limite en mg/L)		
Hydrocarbures	50	50	50
Phénol	50(1000) **	10	5
Dinitrophénol	5	(*)	5
Pentachlorophénol	5	(*)	10
Chloroforme	20	20	(*)
Chlorure é méthylène	50	(*)	(*)
Chlorure	15000	(*)	(*)
Nitrites	40	(*)	(*)
Sulfites	20	(*)	(*)
Ammoniac	1600	(*)	(*)

(*) : Résultats insuffisants

(**) : Après acclimations des bactéries.

❖ Polluants inorganiques

Les éléments sous forme de traces, présents à l'état solide dans les sols, sont mis en circulation par l'érosion qui les met en solution ou suspension. Le ruissellement sur les surfaces imperméables (sols, chaussée) ainsi que les sources anthropiques s'ajoutent à ces sources naturelles liées à l'érosion. Les métaux lourds sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces: mercure, plomb, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse. Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure. De nombreuses activités industrielles telles l'électronique, les traitements de surface, l'industrie chimique, utilisent des métaux d'où la possibilité de rejets dans l'environnement [9].

Généralement, l'implantation d'unités industrielles privilégie les sites à proximité des fleuves pour le transport de matières premières, pour l'alimentation en eau de Refroidissement des installations et aussi pour les possibilités de rejets des effluents industriels. En effet l'eau a longtemps été l'exutoire qui permettait d'évacuer ces déchets, sans respect des normes. A titre indicatif le tableau (1.2) suivant présente le seuil de toxicité des polluants minéraux en France [6].

Tableau I.2: Seuil de toxicité des polluants minéraux en France [8]

Polluants	Procédé aérobie	Nitrification	Procédé anaérobie
	(valeur limite en mg/L)		
Cuivre	2	1	1
Zinc	5	0,5	5
Plomb	1	0,5	5
Chrome	5	2	5
Cadmium	0,2	0,5	(*)
Nickel	1	0,5	5
Sulfures	20(50) **	(*)	100
Cyanures	1(50) **	(*)	100

(*) : Résultats insuffisants

(**) : Après acclimation des bactéries.

1.3.4. Paramètres de pollution des eaux

❖ Les sels minéraux

Les sels minéraux représentent des polluants majeurs de par les masses mises en jeu ainsi que par leurs effets biologiques. Ils affectent la potabilité des eaux superficielles, même pour usages industriels si leur concentration est assez importante [8].

❖ Les éléments nutritifs

L'agriculture n'est pas la seule responsable des rejets dans l'environnement d'azote, de phosphates et d'autres éléments nutritifs bien que dans les pays développés, elle joue un rôle majeur à cet égard et est d'environ les 2/3 des rejets d'azotes dans les masses superficielles d'eau douce et de mer et d'environ 1/3 de phosphore [9]. L'azote est déjà présent en abondance dans la nature comme résidu de la vie des végétaux (humus du sol), des animaux (lisiers) et des hommes (rejets d'eaux usées industrielles ou domestiques). Il peut aussi être apporté par des engrais minéraux de synthèse. Les nitrites sont rarement présents dans les eaux de surface (moins de 1mg/l), mais leur présence peut être suspecte car elle est souvent liée à une détérioration microbiologique de l'eau. En revanche, les nitrates (stade final de l'oxydation de l'azote) sont beaucoup plus abondants. Ils sont très solubles et peuvent s'infiltrer dans le sol et dans les eaux souterraines ou se déverser dans les cours d'eau par ruissellement. Les limites imposées en 2001 sont de 50 mg/L et de 0.1 à 0.5 mg/L pour les nitrates et nitrites, respectivement [10].

❖ Les micro-organismes

L'origine de la pollution microbiologique peut être au niveau de la ressource (eau brute, ouvrage de captage), mais elle peut être aussi dans le réseau ou dans les ouvrages de stockage. Aussi comme mentionné auparavant, au cours de son transport, l'eau peut subir des dégradations et notamment des contaminations microbiologiques. Ce sont, par exemple, les intrusions de pollutions extérieures par des retours d'eau ou des fuites, des phénomènes de corrosion ou de perméabilisations liés à la nature des matériaux [10]

I.3.5. Les métaux lourds

❖ Définition

On appelle métal lourd, l'élément naturel (métal ou métalloïde dans certains cas) caractérisé par une masse volumique assez élevée, supérieure à 5 g/cm³. Actuellement dans la nature, 41 métaux et 5 métalloïdes sont identifiés [2].

Les métaux lourds sont des micropolluants de nature à causer des problèmes même présents sous formes de traces de l'ordre du microgramme par litre [11].

I.3.6. La toxicité des métaux lourds

La toxicité des métaux lourds a conduit les pouvoirs publics à réglementer les émissions en fixant des teneurs limites. Cette réglementation n'est cependant d'aucun secours pour déterminer sans ambiguïté une liste de métaux à surveiller car la liste varie selon les milieux considérés: émissions atmosphériques rejets dans l'eau, règles sur l'épandage des boues ou la mise en décharge, etc. Le quart de la contamination par les métaux lourds est dû aux ordures ménagères (piles au cadmium, batteries au plomb, cuivre et zinc des pesticides, etc.). Le devenir des métaux lourds dépend de nombreux facteurs parmi lesquels la nature du sol et son acidité.

La toxicité des métaux lourds n'est plus à démontrer. Par exemple celle du mercure est connue depuis l'antiquité. Dans la majorité des cas les effets toxiques de ces métaux lourds se manifestent au niveau du système nerveux, le sang ou la moelle osseuse. Ils sont généralement cancérogènes [12].

I.3.7. Sources d'émission

a) Les sources agricoles

Les métaux traces sont présents dans deux types d'intrants agricoles: les engrais minéraux et, de façon plus localisée, dans certains amendements organiques. Ainsi l'engrais phosphatées obtenus à partir de minerais riches en potassium qui contiennent aussi du cadmium en concentrations variables selon les sources.

b) Les sources industrielles

De très nombreuses industries utilisent des métaux. Les poussières et fumées ainsi que les rejets de sites industriels, assez contrôlés actuellement, ont pu conduire par le passé, sur de longues périodes, à des contaminations notables [2].

1.3.8. Les matières en suspension (MES)

Elles désignent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Les MES confèrent à l'eau un aspect trouble au fur et à mesure que les sédiments se déposent au fond ; elles diminuent la luminosité dans l'eau, donc freinent la photosynthèse. Les espèces végétales se développent plus difficilement, l'oxygène qu'elles produisent diminue dans le milieu, et les espèces animales en souffrent. Elles peuvent rendre les eaux très opaques et provoquer aussi une eutrophisation.

1.3.9. Les matières organiques (M.O)

Ce sont tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre et le lactosérum des industries agroalimentaires ainsi que les hydrocarbures. A l'inverse des MES, ces matières constituent une nourriture de choix pour les micro-organismes (μO) de l'eau et provoquent leur prolifération. Les μO se mettent alors à vider le milieu de son oxygène, ce qui s'avère fatal pour la vie aquatique. Lorsque le milieu se retrouve totalement vidé de son oxygène, les μO vont le chercher dans les sulfates dissous, qu'elles réduisent en sulfure, qui se dégage sous forme de sulfure d'hydrogène en engendrant une odeur d'œufs pourris. Cette odeur nauséabonde est caractéristique d'une eau très polluée

1.3.10. Les matières inhibitrices (MI)

Elles s'avèrent toxiques pour les daphnies (zooplancton). On y trouve des métaux ou métalloïdes (mercure, plomb), des pesticides, notamment les organochlorés (lindane), certaines huiles minérales et certains hydrocarbures. Les MI présentent des risques d'effets toxiques immédiats ou différés par accumulation dans les chaînes alimentaires et des risques d'effets cancérogènes.

❖ Les déchets solides divers

Ce sont des objets divers d'origines variées, qui posent des problèmes d'esthétique (rejet sur les rives et les plages) et de gêne (avarie à des engins de pêche) et peuvent, en se déposant sur les fonds, causer préjudice à la faune et à la flore aquatique.

❖ Les détergents synthétiques

Ils comprennent un groupe de produits qui sont à la fois émulsionnants et moussants. Ils ont plusieurs inconvénients tels que la formation de mousse sur les rivières qui apparaît à partir de

0.3 à 1 mg/L. Leur dégradation par les bactéries peut aboutir à des molécules non moussantes mais non biodégradables qui peuvent s'accumuler dans les organismes. De même, en AEP, le goût de savon peut apparaître à des doses très faibles (quelques $\mu\text{g/L}$).

❖ Les matières colorantes

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

❖ La pollution thermique

Elle est due au rejet des eaux utilisées pour le refroidissement d'installations industrielles diverses. Cet échauffement engendre de nombreux inconvénients tels que appauvrissement des eaux en oxygène, l'action stimulante sur la vitesse de multiplication d'algues, croissance de l'activité bactérienne...etc.

Tous ces types de pollution peuvent se rencontrer simultanément.

I.4. Généralité sur les colorants

I.4.1. Définition d'un colorant

Un colorant est une matière colorée par elle-même, capable de se fixer sur un support .La coloration plus ou moins intense des différentes substances est liée à leur constitution chimique. En fait, un colorant est un corps susceptible d'absorber certaines radiations lumineuses et de réfléchir alors les couleurs complémentaires. Ce sont des composés organiques comportant dans leurs molécules trois groupes essentiels : le chromophore, l'auxochrome et la matrice. Le site actif du colorant est le chromophore, il peut se résumer à la localisation spatiale des atomes absorbant l'énergie lumineuse. Le chromophore est constitué de groupes d'atomes dont les plus classiques sont le nitro ($-\text{NO}_2$), le diazo ($-\text{N}=\text{N}-$), le nitroso ($-\text{N}=\text{O}$), le thiocarbonyl ($-\text{C}=\text{S}$), le carbonyl ($-\text{C}=\text{O}$), ainsi que les alcènes ($-\text{C}=\text{C}-$). L'absorption des ondes électromagnétiques par le chromophore est due à l'excitation des électrons d'une molécule. La molécule qui les contient devient chromogène. La molécule chromogène n'a des possibilités tinctoriales que par l'adjonction d'autres groupements d'atomes appelés «auxochrome». Ces groupes auxochrome permettent la fixation des colorants et peuvent modifier la couleur du colorant. Ils peuvent être acides (COOH , SO_3 , OH) ou basiques (NH_2 , NHR , NR_2). Le reste des atomes de la molécule correspond à la matrice, la troisième partie du colorant [13].

1.4.2. Classification technique des colorants

Les colorants utilisés dans l'industrie textile contiennent habituellement des groupes acides sulfoniques qui leur confèrent une hydro solubilité appropriée et qui permettent à la molécule du colorant de se lier ioniquement aux sites chargés du réseau polymérique du tissu [14].

On peut classer les colorants organiques en deux catégories suivant leur synthèse :

- ❖ Colorants naturels
- ❖ Colorants synthétiques.

a- Colorants naturels

Ils sont très répandus, surtout dans les plantes (bois, racines, graines, fleurs et fruits) et même dans les micro-organismes et le corps des animaux. On les trouve à l'état libre ou liés à des glucides ou des protéines, exemple : garance, cochenille, indigo, pourpre. Aujourd'hui, l'importance économique des colorants organiques naturels a beaucoup diminué. Du fait de leur cherté, on ne les utilise dans l'industrie textile, du cuir et du papier que pour des traitements spéciaux. Ils restent, en revanche très utilisés dans les produits alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques soumis à des réglementaires plus strictes.

b- Les colorants synthétiques

Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché surtout que leurs propriétés peuvent être précisément adaptées à leur utilisation. Tous ces colorants sont synthétisés principalement à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphthalène, xylène et anthracène). Ils sont de plus en plus utilisés dans les industries de coloration et des textiles grâce à leur synthèse assez facile, à leur production rapide et à la variété de leurs couleurs comparées aux colorants naturels. La dénomination des colorants commerciaux est loin de présenter la rigueur de celle des composés chimiques parce que, d'une part ce ne sont généralement pas des produits purs et que, d'autre part, les fabricants préfèrent très souvent ne pas en divulguer la composition exacte. Cela a conduit, sous une inspiration poétique, à baptiser les premiers colorants de noms de plantes (mauvéine, fushine, garance, etc.) puis de noms de minerais (vert malachite, auramine, etc.). Par la suite, ils furent désignés selon la constitution chimique du composé de base (bleu de méthylène, noir d'aniline, vert naphthalène, etc.). Actuellement, les fabricants de matières colorantes déposent des marques protégées qui ne donnent aucune indication sur la structure, mais caractérisent la nuance et les procédés d'application. Ainsi, chaque colorant est désigné par sa couleur, sa marque commerciale et un code qui permet d'insister sur une nuance (par exemple : R = red ; Y = yellow ou G = green;

B = bleu ; 2B = more bleu, etc.) Ou une qualité (L = résistant à la lumière). La production totale mondiale de colorants est estimée à 800millions tonnes/an [15].

I.4.3. Utilisation des colorants

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

- ❖ pigments (industrie des matières plastiques) ;
- ❖ encre, papier (imprimerie) ;
- ❖ colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire) ;
- ❖ pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment) ;
- ❖ colorants capillaires (industrie des cosmétiques) ;
- ❖ colorants capillaires (industrie des cosmétiques) ;
- ❖ carburants et huiles (industrie automobile,...) ;
- ❖ colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport, colorants textiles à usage médical,... [16].

I.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 .Elles sont classées en trois grandes catégories :
 - Les fibres naturelles d'origine végétale (coton, lin, chanvre).
 - Les fibres artificielles obtenues par transformation de matières première naturelle(viscose).
 - Les fibres synthétiques, obtenues par synthèse chimique, le plus souvent à partir de dérivés du pétrole (nylon, polyamide, polyester ...).

Tableau I.3 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants [17]

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
Soufre	60-70	Cellulose

D'après le tableau (I.3), nous voyons que le taux de fixation n'atteint pas toujours les 100%. Les colorants qui ont un taux de fixation élevés sont les colorants dispersés (80-92%) et basiques (97-98%), ce sont les plus utilisés dans l'industrie textile.

1.4.5. Problèmes environnementaux issus de l'industrie textile

Le principal problème environnemental qui se pose dans l'industrie textile est celui des quantités d'eau rejetées et de leur charge chimique. Les autres questions importantes sont la consommation énergétique, les émissions dans l'atmosphère, les déchets solides et les odeurs qui peuvent représenter des nuisances significatives dans certains traitements.

Les émissions dans l'atmosphère sont habituellement captées à la source. Comme elles sont contrôlées depuis longtemps dans différents pays. On dispose de bonnes données historiques sur les rejets atmosphériques pour chaque procédé spécifique. Ce n'est pas le cas pour les émissions dans l'eau. En effet, les flux provenant des différents procédés sont mélangés et donnent un effluent final dont les caractéristiques résultent d'une combinaison complexe de facteurs, tels que les types de fibres et les présentations de matières traitées, les techniques mises en œuvre et les types de produits chimiques et d'adjuvants utilisés [18].

1.4.6. Normes de rejets

Les normes de rejets prévoient des seuils stricts à ne pas dépasser pour chaque métal, ainsi qu'une valeur maximale cumulant l'ensemble des concentrations des métaux lourds présents. Avant qu'elles ne soient rejetées dans le milieu naturel et ne le dégradent, elles doivent impérativement obéir à des normes établies pour protéger les milieux récepteurs contre la pollution [12]. Le tableau (I.4) indique les normes algériennes de quelques rejets liquides industriels.

Tableau I.4: Les valeurs limites des paramètres de rejet industriel dans un milieu récepteur (Journal officiel de la république algérienne N° 26, 23 avril 2006)

Industrie de ciment, plâtre et chaux			
Paramètres	Unité	Valeurs limites	Tolérance aux valeurs limites (Anciennes installations)
Température	°C	30	30
pH	/	5.5 – 8.5	5.5 – 8.5
DCO	mg/L	80	120
Matière décantable	"	0.5	1
Plomb	"	0.5	1
Cadmium	"	0.07	0.2
Chrome	"	0.1	0.1
Cobalt	"	0.1	0.1
Cuivre	"	0.1	0.3
Nickel	"	0.1	0.5
Zinc	"	2	5
Industrie de textile			
Température	°C	30	30
pH	/	5.5 – 8.5	5.5 – 8.5
DBO ₅	mg/L	150	200
DCO	"	250	300
Matière décantable	"	0.4	0.5
Matière non dissoute	"	30	40
Oxydabilité	"	100	120
Permanganate	"	20	25
Industrie de transformation des métaux			
Cuivre	mg/L	1.5	2
Nickel	"	2	2.5
Chrome	"	1.5	2
Fer	"	5	7.5
Aluminium	"	5	7.5
Industrie de tannerie			
DBO ₅	mg/L	350	400
DCO	"	850	1000
MES	"	400	500
Chrome total	"	3	4
Industrie de minerais non métallique (Céramique)			
Température	°C	30	30
pH	/	5.5 – 8.5	5.5 – 8.5
DCO	mg/L	80	120
Matière décantable	"	0.5	1
Plomb	"	0.5	1
Cadmium	"	0.07	0.2

I.5. Le procédé d'électrocoagulation

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

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster [19] 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 États-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique. En 1946, Stuart étudie plus précisément le procédé avec un réacteur équipé d'électrodes en aluminium. Comparant le procédé de coagulation physico-chimique et le procédé électrochimique, il observe que le phénomène de coagulation semble plus rapide avec la méthode électrochimique. *Bollina (1947)*, se base sur les résultats de Stuart et réalise une comparaison économique des deux procédés. Il estime que pour les installations de petites tailles, l'électrocoagulation peut s'avérer plus compétitive que les procédés classiques. Les recherches se sont poursuivies sur les effluents de caractéristiques très différentes :

Holden (1956) s'intéresse à la possibilité de traiter les eaux de surface pour la production d'eau potable alors que *Sadek (1970)* propose un traitement des eaux usées en éliminant les phosphates par EC. *Back et coll. (1974)* emploient le procédé pour le traitement des effluents issus des industries agro-alimentaires. En 1975, *Strokachen 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 [19].

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 suivants:

- DCO : Demande chimique en oxygène,
- DBO : Demande biologique en oxygène,
- COT : Carbone organique total,
- MES : Matières en suspensions,
- TDS : Taux de solides dissous,
- TAC : Taux alcalimétrique complet,
- Les métaux lourds,
- ABS : Coloration liée à l'absorbance de l'effluent.

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 floes qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration) [20]. La figure suivante présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

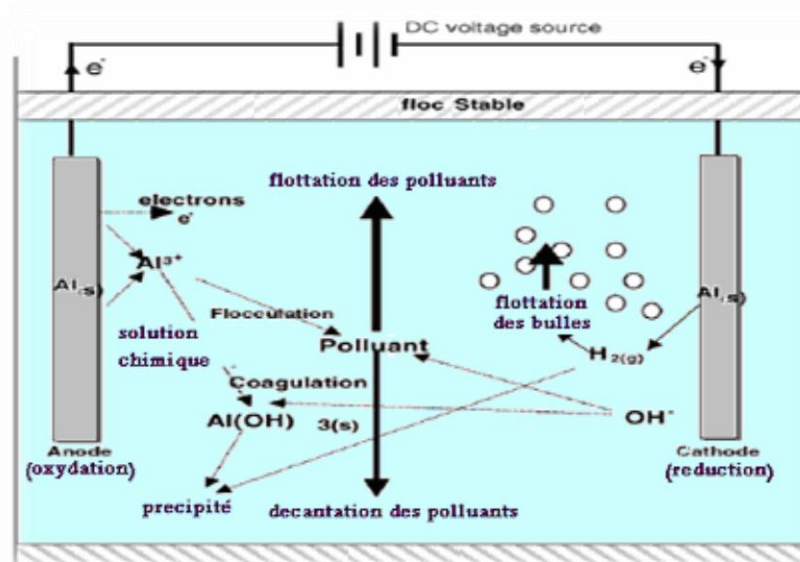


Figure I-3: Schéma du principe de l'électrocoagulation

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 [20].

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+} . [22] 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+} [23].

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 [24].

On peut distinguer:

- Les mono complexes tels que : $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$
- Les poly complexes tels que : $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$

➤ Les espèces amorphes et très peu solubles telles que : $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3

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

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

Au voisinage de la cathode, la réduction du solvant (eau) provoque la formation du gaz hydrogène. Ce dégagement de gaz se présente sous formes de bulles, estimées à un diamètre d'environ 10 à 100 μm d'après *Essadki et coll. (2007)*, 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.

Les données bibliographiques présentées jusqu'à nos jours, ne s'intéressent pas aux bulles d'hydrogène formées au cours de l'EC. Leur rôle semble limité à une légère contribution dans l'agitation et dans la flottation, lorsqu'elle a lieu (*Peter et coll., 2006*).

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. [25]

1.5.3. Les différents modes de connexions électriques

On distingue trois modes de connexion électrique peuvent être utilisées dans les cellules électrochimiques. Les électrodes peuvent être :

➤ Monopolaire branchées en série ou en parallèle.

➤ Bipolaires branchées en série.

Ces trois modes de connexions diffèrent par leurs expressions de tension électrique et d'intensité de courant dans la cellule d'électrolyse.

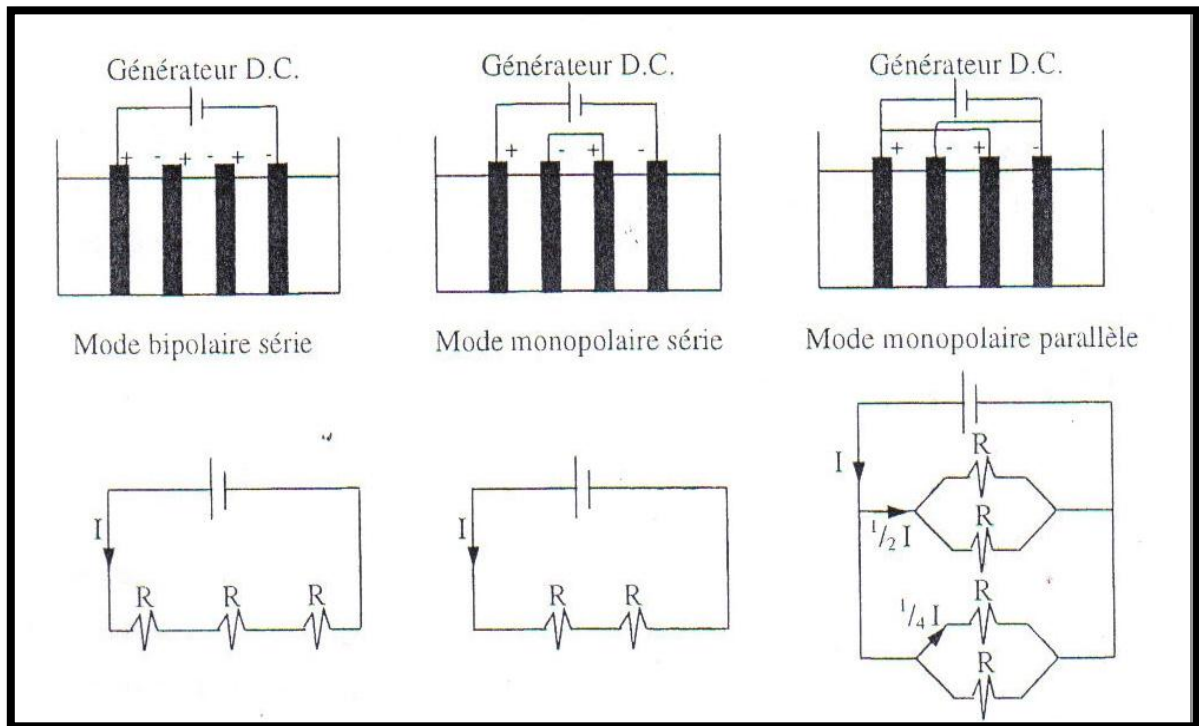


Figure I.4 : Les différents modes de fonctionnement envisageables pour une cellule d'électrocoagulation et les circuits électriques associés

Si l'on compare les circuits électriques associés aux divers modes de connexions, on constate que, pour une intensité donnée, la tension nécessaire sera plus importante pour le mode en série que pour le mode en parallèle puisque les résistances s'additionnent. En mode en série, l'intensité qui parcourt chacune des électrodes est identique alors qu'en mode parallèle, elle dépend de la résistance de chaque cellule individuelle (composée de deux électrodes). Pour travailler en mode parallèle, il faudrait disposer d'un générateur permettant de délivrer un courant élevé, sous une faible tension alors qu'en mode en série, il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevées.

Selon Pretorius et coll. (1991) et Rajeswhar et Ibanez (1997), il est économiquement plus rentable de transformer un courant alternatif en courant continu de faible intensité et forte tension, que de le transformer en courant continu de forte intensité et de faible tension. Pour ces raisons, Golder et coll. (2006) et Ayhan et coll. (2007), estiment que l'utilisation du mode en série est plus judicieux et conseillent, en outre, le fonctionnement bipolaire car celui-ci ne nécessite le branchement que de deux connexions (quel que soit le nombre d'électrodes), il en résulte donc une moindre consommation électrique [26].

Dans le tableau I.5, figurent les différentes valeurs des tensions et des intensités pour les trois modes. On a considéré n électrodes connectées à un générateur fournissant un courant I et une tension U .

Tableau I.5 : Modes de connexion et valeurs des intensités et des tensions [27]

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.5.4.Principales lois d'électrolyse

❖ Loi de Faraday

Si l'on considère que les seules réactions chimiques qui se déroulent dans le réacteur D'électrocoagulation 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 et d'hydrogène formé pendant une durée t d'électrolyse à un courant I , en utilisant la loi de Faraday :

$$m = \frac{I.t.M}{n.F}$$

Avec : m : masse du métal dissous ou de 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.

Si le modèle d'électrolyse comprend p électrodes, et est alimenté par un liquide ayant un débit

$$Q_e, \text{ alors : } C = \frac{m(p-1)}{Q_e}$$

Avec :

C : débit massique de métal dissous (kg.h/m^3).

Q_e : débit d'alimentation de la cellule (m^3/h).

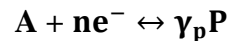
p : nombre d'électrodes.

m : quantité théorique du métal dissous (kg).

Si d'autres réactions électrochimiques se déroulent simultanément, le courant d'électrolyse n'est pas entièrement utilisé par la réaction d'oxydation.

I.5.5. Rendement faradique et rendement énergétique

Soit la réaction électrochimique :



Avec :

A : espèce oxydante.

P : espèce réductrice

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

γ_p : nombre de moles de P produites.

Si cette réaction est la seule à se produire, la loi de Faraday indique que la production de γ_p moles de **P** nécessite le passage de $\gamma_p n$ moles d'électrons, c'est-à-dire, la quantité d'électricité Q_0 telle que :

$$Q_0 = n \cdot N \cdot e_0 = n \cdot F$$

Avec :

N : nombre d'Avogadro ($6022.1023 \text{ mol}^{-1}$).

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

e_0 : La charge élémentaire ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

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

Le courant d'électrolyse est alors entièrement utilisé par cette réaction. Dans le cas où plusieurs réactions électrochimiques se produisent en même temps, on évalue le rendement faradique par rapport à la réaction.

Différentes expressions du rendement peuvent être utilisées (*Pouet, 1994*) :

➤ **Le rendement en courant ou rendement faradique ϕ_c**

Quantité d'électricité réellement consommée pendant l'électrolyse.

Quantité d'électricité nécessaire pour produire

$$\phi_c = \frac{\text{Quantité d'électricité nécessaire pour produire } \gamma_p \text{ moles de P}}{\text{Quantité d'électricité réellement consommée pendant l'électrolyse.}}$$

Soit

$$\phi_c = \frac{I_{\text{théorique}} \cdot t}{I_{\text{consommée}} \cdot t}$$

➤ **Le rendement énergétique R_E défini par :**

$$R_E = \frac{\text{Energie minimale nécessaire pour produire moles de P}}{\text{Energie réellement consommée pendant l'électrolyse}}$$

Soit :

$$R_E = \frac{I_{\text{théorique}} \cdot E_{\text{Eq}}}{I_{\text{consommée}} \cdot E_{\text{App}}}$$

Avec :

E_{Eq} : potentiel d'équilibre ($E_{\text{Eq}} = E_{\text{O}}(\text{anode}) - E_{\text{O}}(\text{cathode})$)

où E_{O} sont les potentiels d'abandon des électrodes ($i=0$).

E_{App} : tension mesurée aux bornes de l'électrolyseur.

Le rapport ($E_{\text{Eq}}/ E_{\text{App}}$) représentant le rendement des tensions R_T , on peut aussi écrire le rendement énergétique comme $R_E = \phi_c \cdot R_T$

1.5.6. Evaluation de la tension imposée aux bornes de la cellule d'électrolyse

Lors d'une électrolyse en mode potentiostatique, la tension qu'il faut imposer entre les électrodes est reliée au courant engendré dans celle-ci par la relation suivante [30], décrite par de nombreux auteurs dont *Vik, Bard et al, Sakho, Brett et al. Pouet et al.* et plus récemment *Picard* :

$$E_{\text{app}} = E_{\text{eq}} + \sum \eta + IR$$

Dans cette relation $E_{\text{app}}(V)$ est la tension à imposer aux bornes de l'électrolyseur en fonction de $E_{\text{eq}}(V)$, qui est la différence entre les potentiels d'abandon pris par l'anode et la cathode à courant nul. C'est la différence de potentiel, théoriquement nécessaire pour que les réactions d'oxydoréduction puissent avoir lieu, sans tenir compte d'autres paramètres comme la surtension. $\sum \eta(V)$ est la somme des surtensions de transfert η , de diffusion η_d et de concentration η_c .

La surtension $\sum \eta$, due au fait que les réactions d'électrodes comme tout processus réel n'est pas thermodynamiquement réversibles doit en réalité être prise en compte. Il est nécessaire d'accroître la puissance motrice de la réaction, c'est à dire la prédominance de la tension électrique externe sur la tension chimique, afin de vaincre les tensions électriques des deux électrodes. En créant ainsi une surtension déterminée permettant le passage du courant, la réaction d'électrolyse peut avoir lieu. Elle est alors adaptée aux forces qui la nécessitent, exprimant les contraintes cinétiques des réactions aux électrodes. Les polarisations η_c et η_a (cathodique et anodique) composant $\sum \eta$ tirent leurs origines des interfaces électrode solution respectives. Il faut aussi tenir compte de la surtension de résistance $IR(V)$ qui correspond à une chute de potentiel répartie dans la phase conductrice caractéristique de la composition de la solution électrolytique et non de la réaction électrochimique. Ce n'est pas une vraie surtension mais une chute ohmique due au courant traversant une cellule de résistance R . Elle est donc proportionnelle à la conductivité du milieu, k (en S/cm), à l'intensité $I(A)$ à la surface active de l'électrode A (cm^2) et à la distance d (cm) entre les électrodes, elle s'écrit :

$$IR = \frac{I \cdot d}{S \cdot k}$$

Pour une intensité donnée, la chute ohmique peut être réduite et par voie de conséquence E_{app} , en diminuant la distance entre les électrodes, en utilisant une surface active plus grande ou en augmentant la conductivité de la solution. Lorsqu'elles sont soumises à une intensité donnée le potentiel E_A de l'anode et E_C de la cathode sont différents de leur potentiel à l'abandon.

$$E_A > E_O \text{ (anode)}$$

$$E_C > E_O \text{ (cathode)}$$

❖ **AVANTAGES ET INCONVENIENT DU PROCÉDE 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 :

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. Les travaux *d'Essadki et coll. (2007) et, Damien (1992)* ont confirmé cet avantage.

2. *Kannan et coll. (2006) et Persin et Rumeau, (1989)* ont prouvé l'efficacité du procédé d'électrocoagulation 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. *Larue et Vorobiev (2003)* ont obtenu des boues plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ces travaux ont montré une réduction du temps et des coûts de traitement des boues.

4. *Persin et Rumeau (1989)* mentionnent l'importance du champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries. En utilisant des électrodes en titane, *Patermarakis et coll. (1990)* ont confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore.

5. L'électrocoagulation offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.

6. La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée (*Persin et Rumeau, 1989*). Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisé à la faible salinité du milieu.

7. *Cenkin et Belevtsev (1985)* ont montré que l'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.

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 [27]. 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 [28].

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 [29].

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.5.7. Etapes de la réaction électrochimique

Pour qu'une réaction soit thermodynamiquement possible, il faut :

- Dans le cas d'une oxydation, que le potentiel E_A soit supérieur à $E_{A(Eq)}$, potentiel d'équilibre électrochimique du couple redox considéré.
- Dans le cas d'une réduction, que le potentiel E_c soit inférieur à $E_{c(Eq)}$, potentiel d'équilibre électrochimique du couple redox considéré.

Cependant, si ces conditions sont nécessaires, elles ne sont pas suffisantes puisque les valeurs des potentiels n'apportent aucune indication concernant, en particulier, les cinétiques des réactions. Pour rendre compte de ces vitesses de réactions, il faut considérer les différentes étapes qui interviennent lors d'une réaction électrochimique et qui sont présentées dans La vitesse d'une réaction électrochimique est principalement fonction des processus de transfert de matière, de transfert électronique à la surface de l'électrode, des réactions chimiques qui précèdent ou suivent le transfert électronique et des autres réactions telles que l'adsorption et la désorption à la surface de l'électrode [30] .

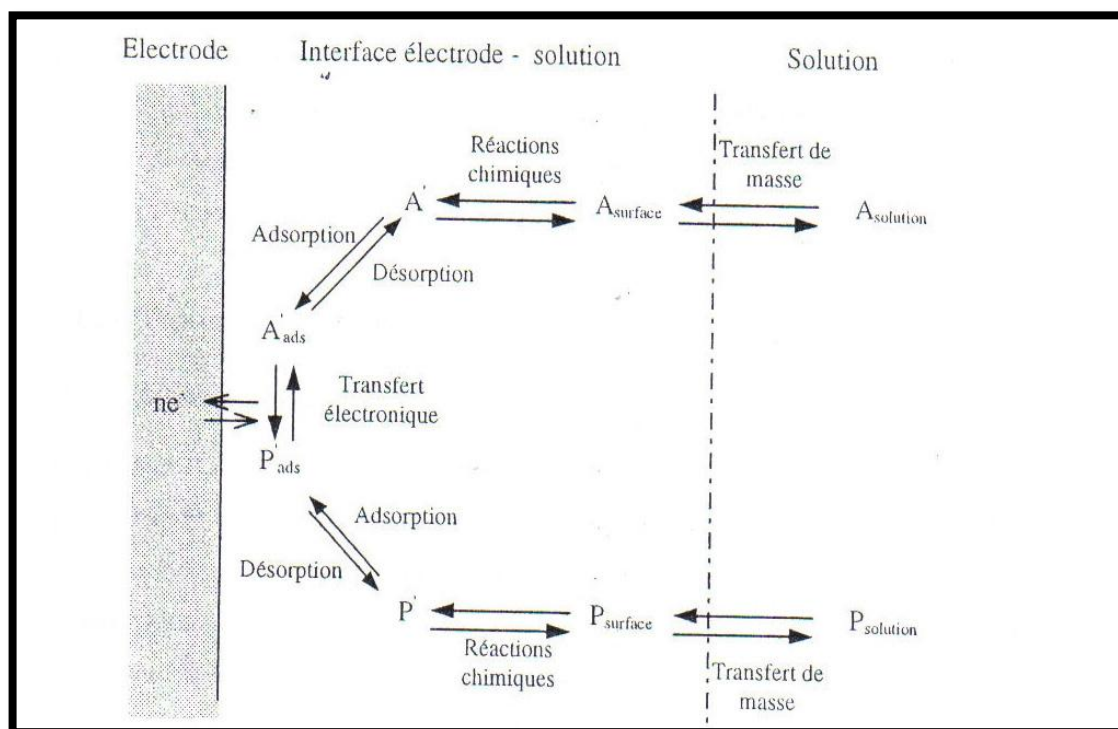


Figure I.5 : Les différentes étapes d'une réaction électrochimique (Bard et Faulkner 1983).

Cela implique, bien entendu, que la vitesse globale d'une réaction électrochimique est dépendante des cinétiques des réactions et des processus les plus lents, ces étapes étant alors qualifiées de cinétiquement limitées. Comme nous l'avons vu précédemment, à chacune des étapes est associée, une surtension ; la somme des surtensions correspondant alors à la réaction électrochimique globale.

Les différentes relations indiquées dans la littérature sont issues des travaux de Faraday. La relation de proportionnalité entre le courant Faradique et la vitesse d'électrolyse est :

$$v = \frac{I}{nFA} = \frac{i}{nF}$$

Avec :

v : vitesse d'oxydation ou de réduction ($\text{mol.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$).

F : constante de Faraday.

n : nombre d'électrons dans la réaction considérée.

A : surface active de l'électrode (cm^2).

I : intensité de courant (A).

i : densité de courant ($\text{A}.\text{cm}^{-2}$).

A partir de cette équation, de nombreux modèles ont été établis en fonction des étapes déterminantes de la vitesse de la réaction globale.

On peut ainsi établir des modèles concernant les vitesses de réactions lorsque le transfert de matière est l'étape limitant ou, au contraire, lorsque c'est une réaction chimique qui détermine la vitesse de la réaction électrochimique globale.

I.5.8. Les espèces en solution

❖ La forme de l'aluminium dans l'eau

L'aluminium peut exister sous différentes formes lors de sa mise en solution. Ces formes sont en équilibre entre elles. Chaque espèce peut subir des modifications suivant une certaine séquence. Le diagramme (Figure 1-6) rassemble les différentes formes de l'aluminium qui peuvent exister lors de la dissolution de l'anode.

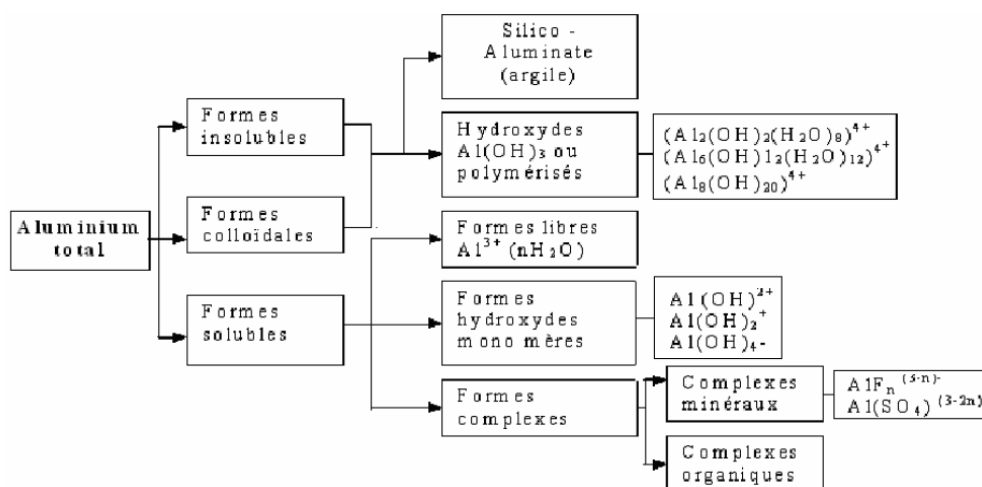


Figure I-6 : Formes d'aluminium pouvant exister lors de la dissolution d'une anode d'aluminium (Khemis, 2005)

L'aluminium dans le procédé d'électrocoagulation

a- Diagramme potentiel pH de l'aluminium

Landolt a établi le diagramme potentiel- pH de l'aluminium (figure I.7), en considérant que la forme Al(OH)_3 correspond à l'hydrargylite ou gibbsite dans l'eau pure à 25°C. Il a assimilé les concentrations aux activités. Les espèces Al^{3+} et Al(OH)_4^- ont des concentrations égales à 10^{-6} mole/l.

On peut remarquer d'après le diagramme de la figure I.8 que l'aluminium dont le potentiel est de 1,67 V/ESH (électrode standard à hydrogène) est situé en dessous du domaine de stabilité de l'eau et donc est un métal très oxydable. Son comportement passif le rend néanmoins très stable. En effet, l'aluminium peut se couvrir d'une couche d'oxyde continue et uniforme de formule Al_2O_3 , se formant spontanément dans des milieux oxydants (eau, air). En dehors de ce domaine de stabilité l'aluminium subit une corrosion ou oxydation dans l'eau [31].

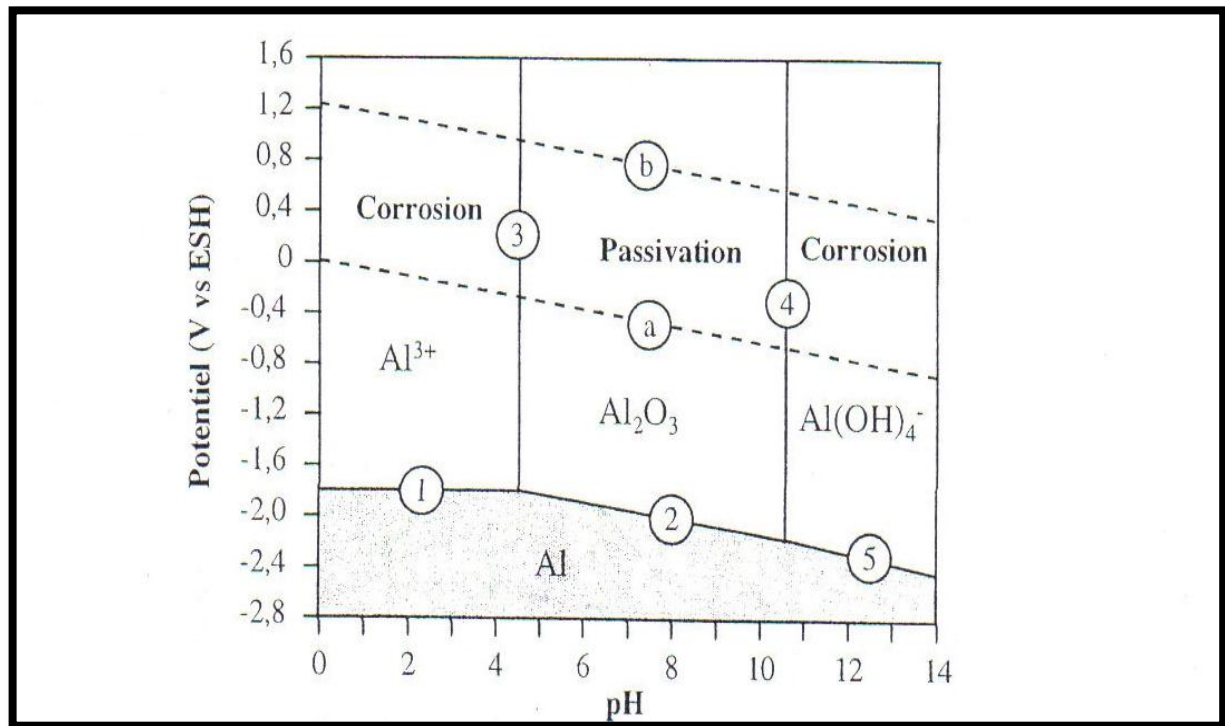


Figure I.7 : Diagramme potentiel-pH de l'aluminium dans les conditions standard [32]

En milieu acide on peut observer les réactions suivantes :

Oxydation de l'aluminium $2\text{Al} \leftrightarrow 2\text{Al}^{3+} + 6\text{e}^-$

Réduction d' H^+ $6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{H}_2$

Donnant $2\text{Al} + 6\text{H}^+ \leftrightarrow 2\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2$

En milieu neutre ou basique il y a :

Oxydation de l'aluminium $2\text{Al} \leftrightarrow 2\text{Al}^{3+} + 6\text{e}^-$

Réduction de l'oxygène dissous $3\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{O}_2 + 6\text{e}^- \leftrightarrow 6\text{OH}^-$

Soit globalement $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{Al(OH)}_3$

Ou $2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}_2$

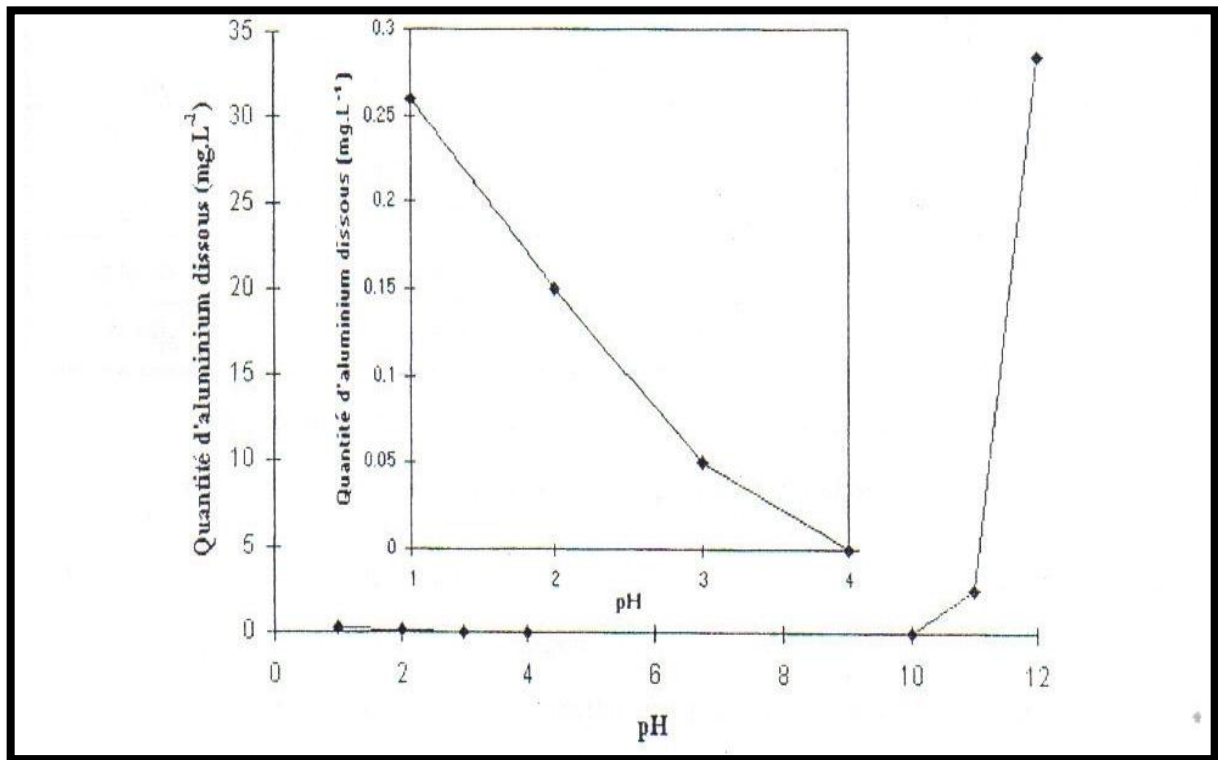


Figure I.8: Influence du pH sur la dissolution de l'aluminium [32]

Chatalov a montré qu'en milieu tamponné, l'aluminium se dissout beaucoup plus vite à pH basique qu'à pH acide. *Kolics et al.* ont estimé que dans une solution déci-molaire à pH = 12, la quantité d'aluminium est 200 fois plus importante que dans une solution à pH = 2. Ce résultat est dû d'après eux aux comportements de la couche d'aluminium, différents dans les solutions acides ou basiques. *Pourbaix* a défini quatre zones pour le diagramme de l'aluminium, une zone d'immunité où l'aluminium n'est pas attaqué, une zone de passivité où il est protégé par une couche d'alumine et deux zones de corrosion. Cependant ce diagramme est tracé pour une température de 25°C, dans l'eau pure et pour le métal pur et non un alliage [1].

b- Espèces prédominantes en fonction du pH

Comme nous l'avons vu précédemment, les formes ioniques et moléculaires de l'aluminium dépendent essentiellement du pH du milieu. Un diagramme a pu être tracé (figure I.10), représentant la répartition des espèces monomères de l'aluminium en fonction du pH et du pourcentage de chacune d'elles.

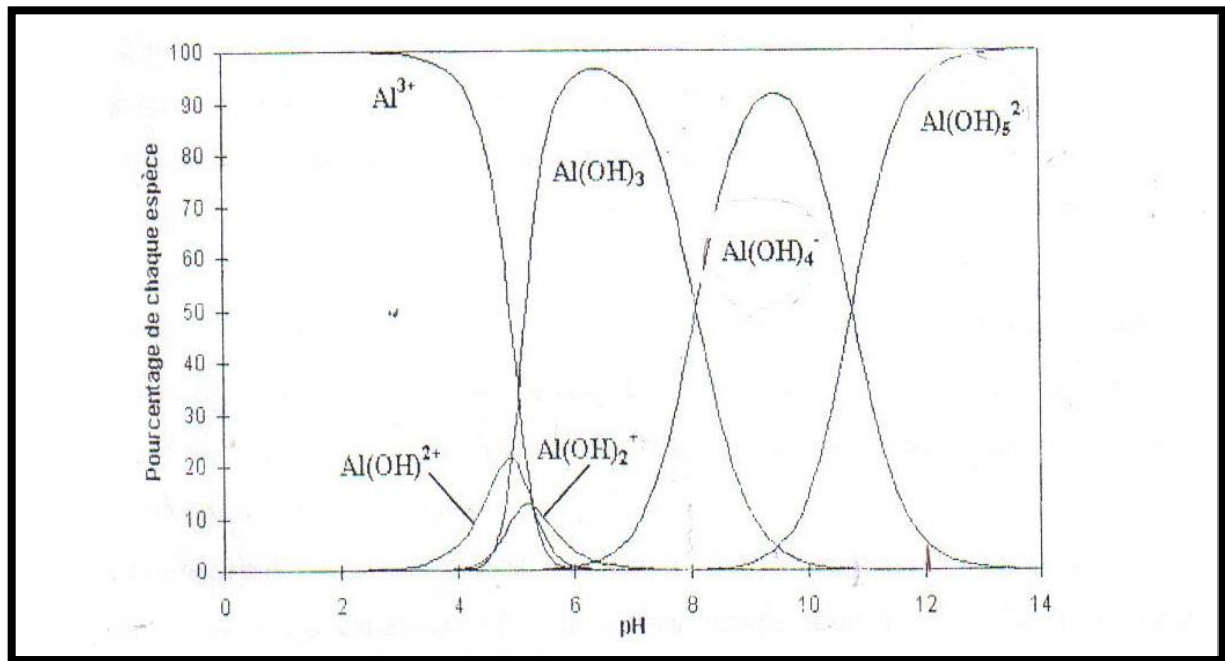


Figure I.9 : Répartition des espèces hydrolysées de l'aluminium en fonction du pH

Il existe par ailleurs de nombreuses espèces polymères en solution aqueuse suivant le pH du milieu. Le phénomène hydrolyse- polymérisation- précipitation des espèces peut être caractérisé par un rapport d'hydroxylation appelé r donné par *Hsu* [34] de la façon suivante :

$$r = \frac{[\text{OH}^-]}{[\text{Al}]_{\text{Tot}}}$$

$[\text{OH}^-]$: Concentration de la base utilisée par la polymérisation

$[\text{Al}]_{\text{Tot}}$: Concentration totale en aluminium

Il a été montré que pour :

- Des solutions diluées de $[\text{Al}]_{\text{Tot}}$ inférieure à 10^{-4} mole/l et de pH compris entre 4 et 9,5, que les principaux produits d'hydrolyse de l'ion Al^{3+} sont des espèces monomères, leur cinétique de formation serait de 10^{-1} s.
- Des solutions concentrées de $[\text{Al}]_{\text{Tot}}$ supérieure à 10^{-4} mole/l et à pH acide ou neutre, et pour un rapport r plus élevé, ce sont les espèces polymères de diverses tailles qui dominent. Ce processus de formation est plus long que le précédent allant de quelques mn à quelques heures. On a pu détecter aux R.X ou par RMN des espèces comme $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{13}]^{7+}$, $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$. *Bersillon et al.* ont proposé des modèles tels que $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{4+}$ et $[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}]^{3+}$ pour expliquer certains phénomènes expérimentaux.

Baes et Mesmer décrivent la chimie de l'aluminium en utilisant :

- Cinq monomères : Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$
- Trois monomères : $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$, $[\text{Al}_3(\text{OH})_4]^{5+}$, $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{13}]^{7+}$

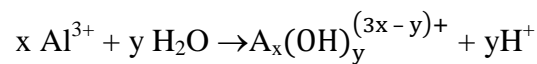
➤ Un précipité : $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s)

Rebhun et al. estiment que d'autres polymères tels que $[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}]^{3+}$, $[\text{Al}_7(\text{OH})_{17}]^{4+}$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{4+}$, $[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{24}]^+$ sont susceptibles d'exister.

De nombreuses études sont entreprises actuellement pour mettre en évidence d'autres polymères en solution, ainsi que leurs cinétiques de formation.

c- Comportement de l'aluminium comme anode lors du procédé d'électrocoagulation

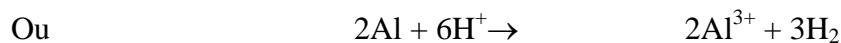
Lorsque l'aluminium se comporte comme anode sous l'action d'un courant continu, le potentiel qui lui est imposé est supérieur à son potentiel d'abandon. L'électrode d'aluminium est oxydée en donnant des ions Al^{3+} dissous, ceux-ci réagissent avec l'eau pour donner des espèces polymères ou monomères [29] selon la réaction suivante :



Les ions H^+ produits à l'anode créent un milieu acide à la surface. *Dobolyi* montre que le pH peut devenir inférieur à 4,5 dans ces conditions.

Les auteurs travaillant sur le procédé d'électrocoagulation notent que la masse d'aluminium dissoute expérimentalement est supérieure à celle calculée par la loi de Faraday, ce qui correspond à un rendement supérieur à 1. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène. *Bersert et al.* ont utilisé les travaux de Brouillet et al et ont supposé que la valence des ions d'Aluminium fournies serait de 2 au lieu de 3, ce qui influe directement sur le calcul de la masse théorique dissoute. *Antropov* quant à lui, interprète le rendement supérieur à un par le fait qu'une autre réaction chimique se déroule simultanément à l'anode.

Picard rapporte que la masse dissoute supplémentaire serait due à l'une des réactions suivantes :



Ces hypothèses n'ont par ailleurs pas été validées par ces auteurs.

Damien, Szyнварczuk et al., Mameri et al. Estiment que le comportement de l'aluminium serait dû à la présence d'ions chlorure en grande quantité, qui induirait une corrosion par piqûre et la formation de AlCl_4^- qui activerait la réaction d'oxydation.

Radovan et al., bien avant eux constatent que lors de l'oxydation anodique de l'aluminium de petits morceaux d'aluminium (Chunck Effect) (figure I.11) se détachent et interviennent dans la masse dissoute expérimentale.

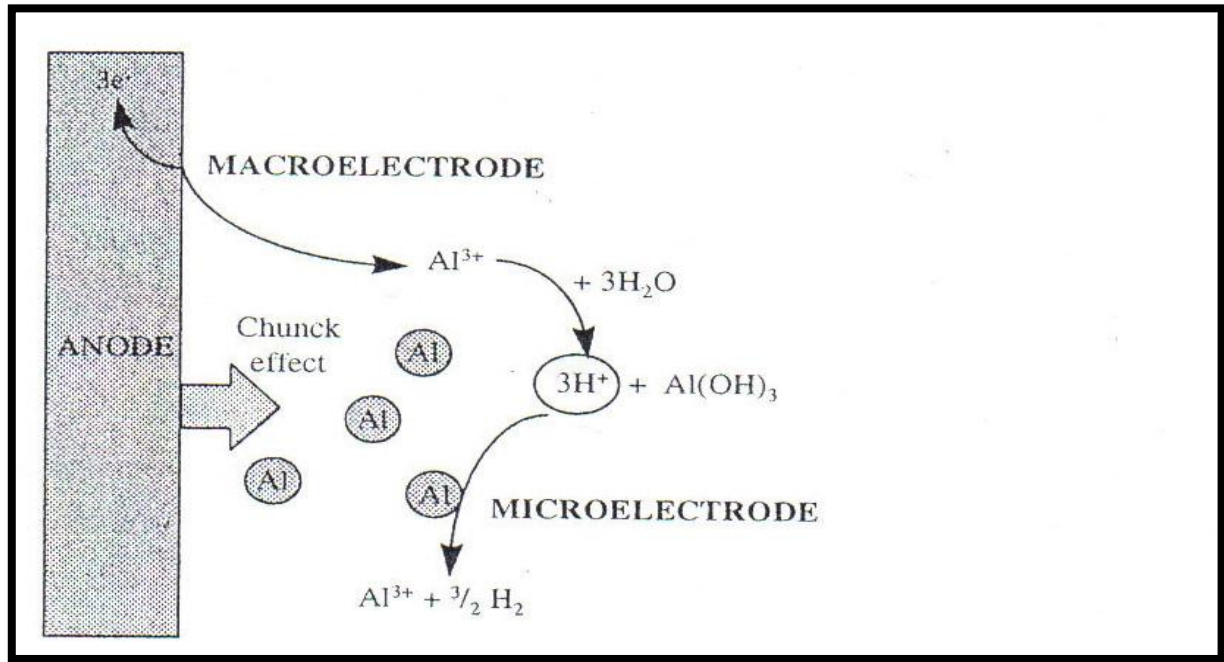
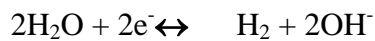


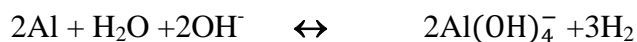
Figure I.10 : Mécanismes d'oxydation de l'aluminium selon Radovan

d- Comportement de l'électrode d'aluminium en tant que cathode

Lorsque l'aluminium se comporte en cathode, son potentiel E_c est inférieur au potentiel d'abandon [25]. Ce potentiel se situe en dessous du domaine de stabilité du solvant et donc la principale réaction ayant lieu est la réaction de l'eau :



On remarque donc une libération d'ions hydroxyle et un pH basique à la surface de l'électrode ($\text{pH} > 12$). Dans ce cas une réaction chimique secondaire due aux ions hydroxyle est envisageable :



Picard et al ont montré que seul l' H_2 se dégagait à la cathode et que son volume était en réalité supérieur au volume théorique calculable par la loi de Faraday. La perte de masse à la cathode dépend de la température et des ions hydroxydes générés par la réduction de l'eau.

I.6. Etapes de la coagulation

La coagulation est définie comme étant l'étape de déstabilisation des substances colloïdales de nature minérale et organique. Elle est réalisée en plusieurs étapes :

1. Neutralisation des charges électrostatiques à la surface des particules de polluant par adsorption des ions. Cette étape est importante du fait qu'elle diminue le potentiel Zêta des particules.

2. En deuxième étape, les hydroxydes d'aluminium s'adsorbent à leur tour à la surface des particules. Les colloïdes s'agglomèrent en micro-flocs et la taille des particules augmente.

1.6.1. Diagramme de coagulation-floculation

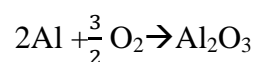
Amirtharajah et Mill., (1988) ont établi un diagramme de coagulation-floculation des matières organiques avec le sulfate représentant la superposition de deux diagrammes : le premier est le graphique de la dissolution de l'aluminium dans l'eau et le second représente les différentes zones de floculation en fonction du pH. Ce diagramme indique également les différents types de réactions qui se produisent entre l'aluminium (coagulant) et les colloïdes minéraux ou organiques.

On peut distinguer trois zones de coagulation:

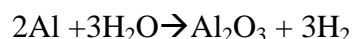
- Une zone de coagulation par neutralisation des charges par la forme cationique de l'aluminium Al^{3+} se produisant dans une plage de pH acide (<4.5). Cette neutralisation conduit à l'annulation du potentiel Zêta ce qui provoque la déstabilisation de l'émulsion.
- Une zone de pH intermédiaire où la coagulation est régie par deux mécanismes:
 1. La neutralisation de potentiel Zêta par les cations Al^{3+} (moins important à $pH > 5$).
 2. L'adsorption de l'hydroxyde d'aluminium sur les particules qui se recouvrent de cet hydroxyde et s'agglomèrent en formant ainsi des micro flocs.
- Une troisième zone où le pH favorise la formation de l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$, un solide amorphe qui est majoritaire dans cette plage de pH. La coagulation se fait par adsorption des particules sur l'hydroxyde d'aluminium.

1.6.2. Oxydation des électrodes: structure et transfert

L'aluminium réagit spontanément en présence de l'oxygène pour former une couche d'oxyde(alumine) selon la réaction:



En présence d'eau, l'aluminium s'oxyde selon la réaction :



Les énergies libres, ΔG , des deux réactions sont respectivement -1675 kJ/mole et -864.6 kJ/mole [34]

Plusieurs travaux ont montré que cette couche d'oxyde, d'une épaisseur comprise entre 4 et 10nm, est composée, en réalité, de deux sous-couches superposées:

- Une couche compacte et amorphe appelée couche barrière, située juste au contact du métal. *Vargel (1999)* a montré que la vitesse de formation de cette couche est de l'ordre de quelques millisecondes.

- Une deuxième couche à l'extérieur de la couche barrière et qui croît par hydratation à partir de celle-ci, en milieu neutre et faiblement basique avec un pH entre 7 et 8. Cette couche est moins compacte et plus poreuse, et c'est elle qui réagit avec le milieu extérieur.

La croissance de ces couches peut conduire à la formation de plusieurs types d'alumines. Le profil de potentiel varie très fortement au passage de l'interface aluminium-oxyde, dans l'oxyde et à travers l'interface oxyde- électrolyte.

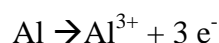
Les différentes étapes de transfert des atomes d'aluminium, depuis la phase métallique vers l'électrolyte, peuvent être décrites comme suit:

- Le transfert d'un atome d'aluminium entre la surface du métal et la couche d'oxyde se produit en deux étapes : formation de l'aluminium monovalent Al^+ qui s'oxyde en aluminium trivalent Al^{3+} .
- Le transfert des cations métalliques Al^{3+} à travers la couche d'oxyde, se fait par migration sous l'effet d'un champ électrique, et par diffusion sous l'effet d'un gradient de concentration entre les deux surfaces de la couche d'oxyde.
- Le transfert à travers l'interface oxyde-électrolyte est généralement assuré par la diffusion due au gradient de concentration, mais aussi par des réactions chimiques avec des anions contenus dans l'électrolyte.

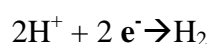
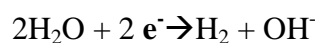
La stabilité de la couche d'oxyde dépend, pour une grande part, de la concentration en Halogénures dans la solution. Les chlorures diffusent à travers la couche d'oxyde pour Atteindre la surface du métal et engendrent des corrosions ponctuelles dites en piqûres: ces réactions sont étudiées par *Blackwood et Chong (1998)* et *Vargel (1999)*, qui ont distingué deux phases dans la corrosion par piqûre :

- L'initiation ou amorçage: cette phase commence par l'adsorption des ions chlorures dans la zone de diffusion et dans le film d'oxyde, et conduit à la formation des microfissures. Cette adsorption est favorisée par la faible épaisseur de cette couche ainsi que son degré de porosités d'hydratation.
- Une phase de propagation ou de croissance commence pour certaines piqûres déjà initiées. La piqûre présente deux pôles:

- a) Un pôle positif au fond de la piqûre (anode) où se produit l'oxydation de l'aluminium :



- b) Un pôle négatif à la surface de la piqûre, lieu d'une réduction de l'eau ou des protons H^+ en milieu acide:



Globalement, on assiste dans une piqûre, à la formation de l'oxyde d'aluminium par réaction des ions Al^{3+} et OH^- . D'autres ions tels que les fluorures, les bromures et les iodures activent aussi la corrosion de l'aluminium [35].

Les travaux de *Chen et coll.*, (2003) ont montré que la vitesse de dissolution par piqûre est plus importante pour les ions chlorures que pour d'autres types d'ions, à cause de leur taille et leur facilité d'adsorption sur la couche d'oxyde.

En revanche, les anions nitrates et phosphates ne provoquent pas cette réaction de corrosion.

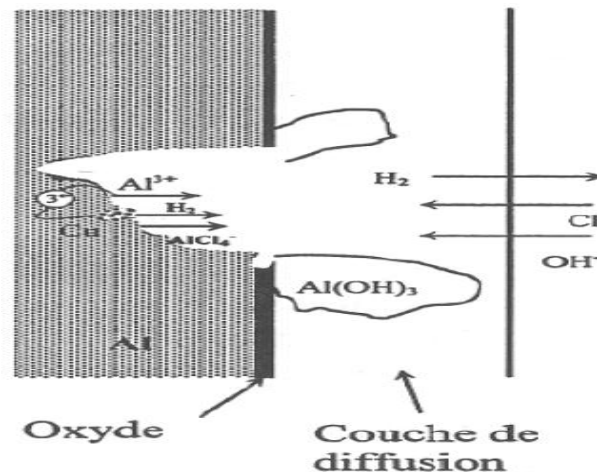


Figure I-11 : Mécanisme de corrosion par les ions chlorures et hydroxydes par piqûre sur un alliage d'aluminium (Khemis, 2005). [35]

La teneur en cuivre et fer des alliages aluminium intervient dans le mode de corrosion par piqûre. La Figure 1-12 schématise le mécanisme de corrosion.

I.7. Les colloïdes

I.7.1. Définition

Les colloïdes sont des particules organiques ou minérales dont la taille est comprise entre quelques nanomètres et un micromètre environ. Dans les effluents liquides, ils sont notamment, responsables de la couleur et de la turbidité de l'eau de surface.

I.7.2. Classement et formation des colloïdes

Il existe deux types de particules colloïdales hydrophiles ou hydrophobes :

- Les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourées de molécules d'eau qui empêchent le contact entre ces particules.

- Les particules hydrophobes ne sont pas entourées de molécules d'eau: leur dispersion dans l'eau n'étant pas spontanée, on peut la faciliter à l'aide de moyens chimiques (stabilisant) ou physiques (agitation).

Peu de particules sont exclusivement hydrophobes ou hydrophiles. On retrouve plutôt des particules hydratées à différents degrés. Des substances chimiques permettent d'améliorer la stabilité des colloïdes, elles fournissent des ions qui seront adsorbés par les particules en suspension. Pour obtenir une solution de colloïdes hydrophiles, on peut utiliser comme particules insolubles:

- Des macromolécules (polymères).
- Des molécules formées d'une partie non polaire et d'une partie polaire compatible avec l'eau et pouvant être anioniques, cationiques ou non ioniques.
- Des particules très fines d'argile, de silice, d'hydroxydes de fer ou d'autres produits minéraux
Parmi les exemples de **solutions colloïdales hydrophobes**, on trouve:
- Les émulsions d'huile dans l'eau : L'ajout d'un stabilisateur permet d'éviter la formation par coalescence d'une interphase huile-eau.
- Des solutions d'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), formé espar hydrolyse d'un sel d'aluminium ou par dissolution anodique de l'aluminium. Selon les conditions, les ions Al^{3+} ou OH^- jouent le rôle de stabilisateur.
- Des suspensions d'hydroxyde de fer, ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) et d'oxyde de fer, (Fe_2O_3), formées par l'hydrolyse d'un sel de fer. Selon certaines conditions de pH et de température, les ions Fe^{3+} ou OH^- jouent le rôle de stabilisateur.
- La suspension d'halogénure d'argent, obtenue en mélangeant du nitrate d'argent et un halogénure alcalin. La stabilisation est assurée par un excès d'ions Ag^+ ou d'halogénure.

Plusieurs méthodes permettent de **préparer des solutions colloïdales**:

- Les méthodes de dispersion basées sur la fragmentation et le broyage des particules permettent d'obtenir des éléments de petites tailles.
- Les méthodes de condensation reposent sur la précipitation des particules non solubles de petites dimensions [35].

1.7.3 Propriétés électrostatiques : la charge de surface

La plupart des particules colloïdales portent des charges électriques surfaciques. Cela est dû à la dissociation des molécules à la surface et à l'adsorption préférentielle des ions présents dans le milieu. Ces charges électriques jouent un rôle très important dans la stabilisation des dispersions et dans la caractérisation des particules. Généralement, dans l'eau, les surfaces des particules

colloïdales sont chargées négativement. Ces charges, dites primaires, attirent les ions positifs en solution dans l'eau, qui s'adsorbent sur la particule et attirent à leur tour des ions négatifs accompagnés d'une faible quantité d'ions positifs (Figure 1-13).

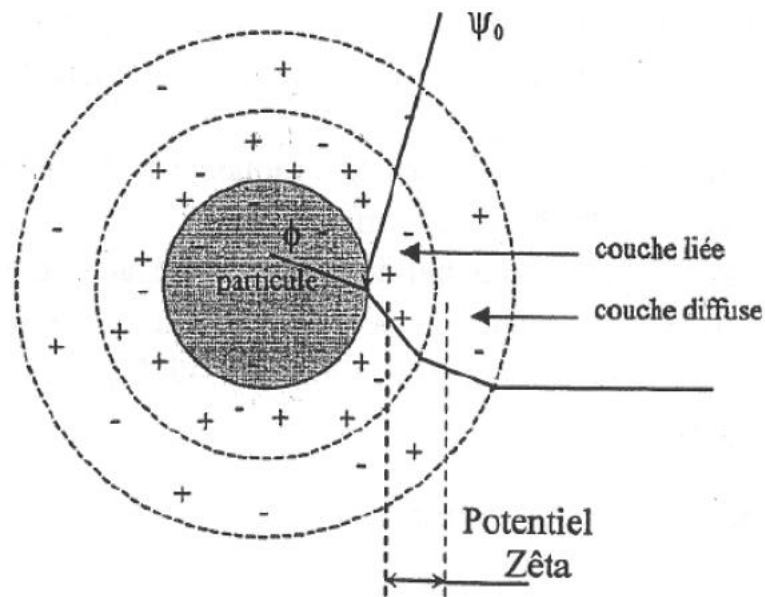


Figure 1-12 : Structure et composition de la double couche sur une particule colloïdale [35]

Les ions qui adhèrent fortement à la particule forment la couche liée, et ceux qui ne sont pas liés constituent la couche diffuse.

➤ **La couche liée ou couche de Stern :**

Elle a une épaisseur de quelques angströms. La charge de cette couche est proportionnelle à la surface des particules et à la conductivité du milieu. Elle influe sur l'épaisseur de la couche diffuse par son effet d'attraction électrostatique. D'après *Caprio et coll. (2004)*, cette couche a des effets minimes sur les comportements électrocinétiques des particules. Elle ne produit pas directement des effets de répulsion mais intervient dans des effets plus complexes de la couche diffuse.

➤ **La couche diffuse ou couche de Gouy-Chapman**

Les limites de la couche diffuse ne sont pas bien définies. L'épaisseur de cette couche varie entre 10 Å et une fraction de micromètres et possède, entre autre, une distribution inégale des charges électriques libres (*Hamaker 1973*). La couche diffuse joue un rôle très important dans les phénomènes de stabilisation des émulsions colloïdales. En effet, lorsque deux particules se rapprochent, leurs couches diffuses interagissent et créent des forces de répulsions qui maintiennent les deux particules éloignées et rendent la suspension stable. Elle intervient également dans les phénomènes électrocinétiques, électro-osmotiques et dans la conductivité électrique.

Ces deux couches forment une sorte de condensateur électrique qui maintient une charge Q reliée directement aux ions sur la surface et au voisinage de la particule. Il existe deux types d'ions libres dans une solution ionique, qui conduisent à la distribution inégale des charges dans la double couche :

- Les ions déterminant le potentiel électrique au voisinage de la surface des particules, tel que les ions argent dans une solution d' AgNO_3 et les ions chlorure Cl^- pour une solution de NaCl .
- Les ions spécifiquement adsorbés dans la double couche, tels que les ions iodures dans une solution de AgI et les ions d'aluminium et de fer

1.7.4. Comparaison entre la coagulation-floculation chimique et l'électrocoagulation

La coagulation chimique ou la floculation/coagulation chimique a souvent été opposée à l'électrocoagulation pour justifier le choix de l'une ou de l'autre.

Toute coagulation est l'agrégation des particules colloïdales résultant d'une diminution de la charge statique surfacique ou d'une liaison inter particules, conduisant ainsi à un pontage des particules. Quand cela se fait par l'ajout de produits chimiques, on parle de coagulation chimique. L'électrocoagulation se base sur une production in situ de cations métalliques par la dissolution d'électrodes sous l'effet d'un courant électrique. Ces agrégats peuvent être ensuite éliminés par décantation, filtration ou sédimentation. Malgré leur ressemblance, le procédé d'électrocoagulation et la coagulation chimique diffèrent tant sur la mise en œuvre pratique que sur les processus mis en jeu.

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. De plus, la présence du champ électrique dans le cas de l'électrocoagulation, facilite la migration des espèces chargées et leur adsorption sur les particules polluantes. 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, pour dissoudre l'anode sacrificielle, dans le dégagement d'hydrogène et par effet Joule dans la solution [1].

1.8. Conclusion sur la bibliographie

L'historique de l'EC peut être divisé en deux périodes. Une période pendant laquelle son efficacité n'avait pas été optimisée pour intéresser les industriels et les scientifiques (avant 1990); et une deuxième période correspondant à la renaissance de l'EC (après 1990), avec un très grand nombre d'articles.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le procédé d'électrocoagulation (EC) comme procédé de traitement des eaux par dissolution *in-situ* des électrodes sous l'effet d'un courant électrique.

Les domaines d'application de ce procédé sont très larges, allant du traitement global jusqu'au traitement très ciblé avec des effluents organiques ou minéraux pour lesquels, la séparation des matières polluantes est difficile à effectuer de manière classique. Les premiers concernés sont : les industries des colorants, textile, traitement de surface et de l'agroalimentaire.

En fin du chapitre, nous avons présenté les principaux résultats des effluents traités par l'EC, un rappel sur la coagulation-floculation chimique et la comparaison entre les deux techniques.

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 (≤ 20 L/h) pour avoir des rendements supérieurs à 80 %. La seule source d'énergie utilisée dans la littérature est l'énergie électrique. 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 la photovoltaïque et de l'énergie électrique.

Chapitre II

Matériels et méthodes

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.1.Introduction

Ce chapitre présente les matériels et les méthodes utilisés pour réaliser l'étude du procédé d'électrocoagulation (EC) en continu avec un générateur de courant continu et un panneau photovoltaïque .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'optimiser les paramètres opérationnels tels que, la densité de courant j , le temps de traitement t , le pH initial, le débit d'alimentation Q et la concentration initiale C_i , en étudiant la réduction de deux colorants utilisés dans l'industrie de textile (Rouge Nylosan et Rouge Congo) par EC en régime continu.

II.2.Choix du procédé

Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographie, assez peu d'études ont été réalisées en réacteur continu. Le réacteur d'électrocoagulation(EC)en régime continu 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). Le schéma de principe de ce réacteur est représenté sur la figure (II.1).

II.3. Traitement par EC à l'aide d'un réacteur continu

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 deux plaques d'aluminium (pureté de Al était 98 %) utilisées comme électrodes (dimension 245*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.

➤ **1^{ère}Série des essais** :avec un générateur d'alimentation électrique **continu** (GPS3303_{3CH}) fournissant une tension entre 00 et 30 V et un courant dans la gamme de 00 à 10A.

Les plaques utilisées pendant le traitement par électrocoagulation sont en aluminium avec une connexion monopolaire.

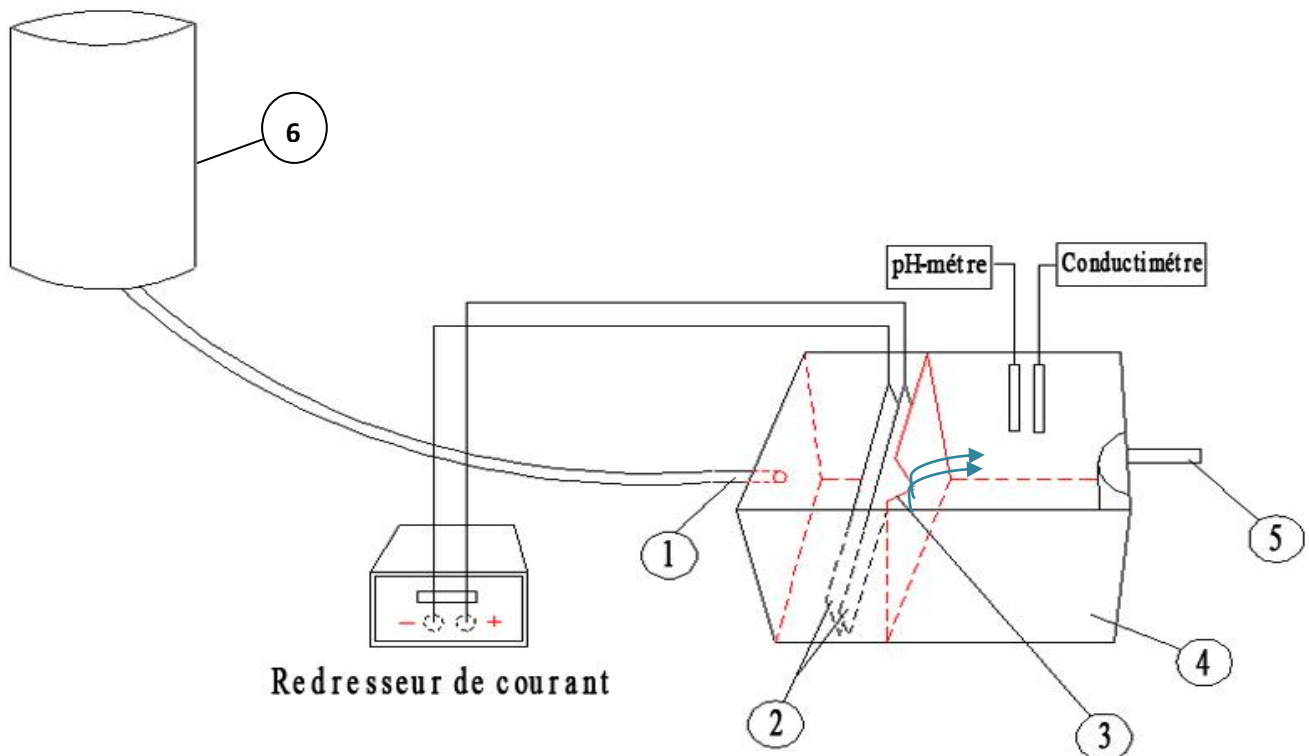


Figure II.1 : Unité d'électrocoagulation en régime continu

(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).

- **2^{ème} Série des essais :** avec un générateur photovoltaïque Model (ET-M 53685) qui a les caractéristiques suivantes : - Max power (P_{max}) 85 Wp - Open circuit voltage (v_{oc}) 21.96 V - Short circuit current (I_{sc}) 5.11A - Rated voltage (V_{mpp}) 18.29V - Rated current (I_{mpp}) 4.65A - Maximum system voltage 1000V.



Figure II.2 : Le panneau photovoltaïque utilisé (ET-M 53685)

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)

II.4. Caractéristiques des colorants utilisés

II.4.1. Rouge Nylosan

Le colorant Rouge Nylosan N-2RBL (AcidRed 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 [31]. Son nom selon la nomenclature est sodium 6-amino-5-[[4-chloro-3-[[2,4-dimethylphenyl) amino] sulphonyl] phenyl]azo]-4-hydroxynaphthalene-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 2 et ses caractéristiques sont regroupées dans le Tableau 1.

Le Rouge Nylosan N-2RBL nous a été fourni par la société TINDAL (Toiles Industrielles Algériennes) de M'sila. Ses caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant.

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

Index de Couleur : C.I.	AcidRed 336
Formule chimique	$\text{C}_{24}\text{H}_{21}\text{ClN}_4\text{O}_6\text{S}_2,\text{Na}$
Poids moléculaire ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	587.97
λ_{max} (nm)	502

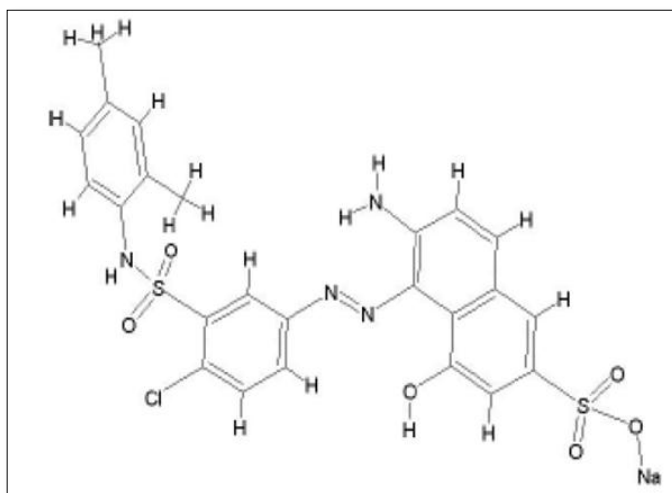


Figure II.3 : Formule développée du Rouge Nylosan N-2RBL

II.4.2. Spectre d'absorption en UV-visible

Le spectre d'absorption en UV-visible (Fig. II.4) du colorant Rouge Nylosan N-2RBL (AcidRed 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 NylosanN-2RBL ($\lambda_{\max} = 502 \text{ nm}$).

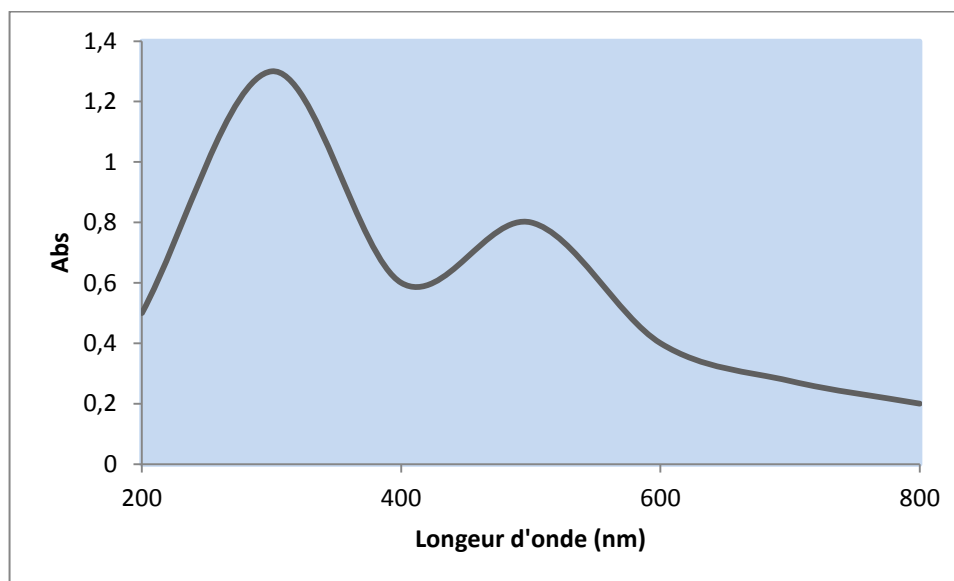


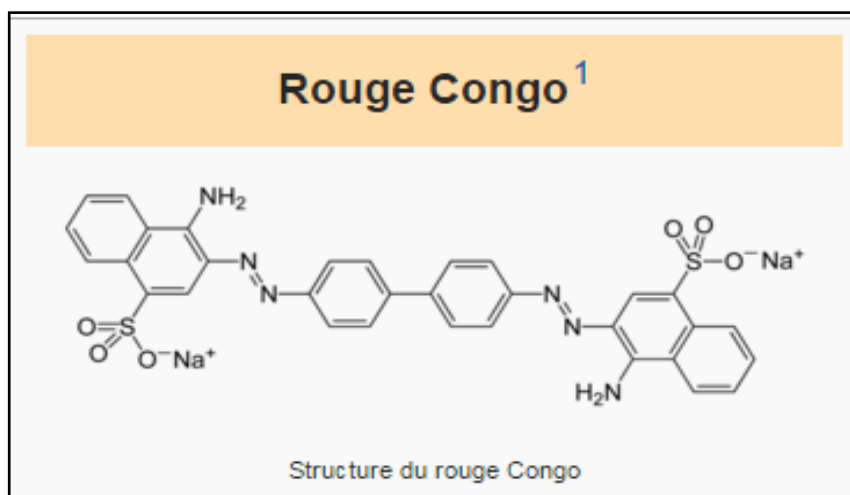
Figure II.4 : Spectre d'absorption UV-vis du colorant Rouge Nylosan N-2RBL dans l'eau

II.4.3. Rouge Congo

Le rouge Congo est une molécule diazoïque, c'est-à-dire qui possède deux fois la structure de l'azobenzène. Le rouge Congo est à la fois un colorant organique – qui n'est plus beaucoup utilisé, en raison de sa toxicité – et un indicateur de pH.

Tableau N° II.2 : Propriétés du Rouge Congo

Index de Couleur : C.I.	Direct Red 28
Formule chimique	$C_{32}H_{22}Na_2O_6S_2$
Poids moléculaire ($g \cdot mol^{-1}$)	696,663
λ_{max} (nm)	497



II.5 : Formule développée du Rouge Congo (Direct Red 28)

II.4.4. Spectre d'absorption en UV-visible

Le spectre d'absorption en UV-visible (Fig. II.4) du colorant Rouge Congo (Direct Red 28) a été obtenu par un balayage spectral, entre 200 et 800 nm, d'une solution de colorant à 50 mg/L. La longueur d'onde du maximum d'absorption de Rouge Congo est $\lambda_{max} = 497 \text{ nm}$.

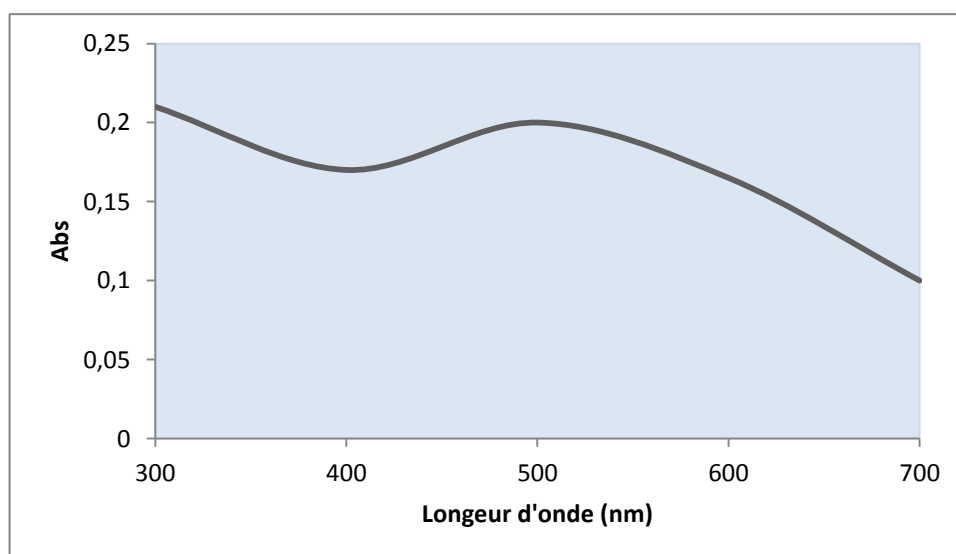


Figure II.6 : Spectre d'absorption UV-vis du colorant Rouge Congo dans l'eau

II.5.Méthodes analytiques

Les expériences concernant le rejet de textile simulé ont été réalisées avec des solutions synthétiques préparées à base d'un colorant en poudre rouge Nylosan N-2RBL (AcidRed 336) et Rouge Congo (Direct Red 28). Pour suivre le traitement des effluents, on a mesuré en ligne des caractéristiques des effluents (pH, conductivité, Température), et analysé la phase clarifiée (surnageant) après décantation de 24 h. Ces analyses incluent les indicateurs de la dépollution (Turbidité, Absorbance).

II.5.1.Suivi des paramètres en ligne

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

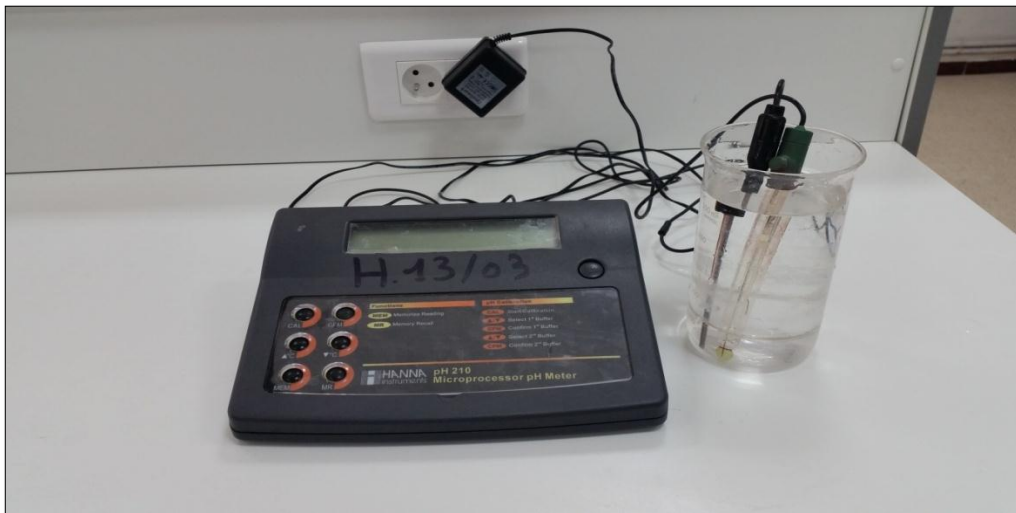


Figure II.7 : Microprocesseur pH Mètre "Hanna pH 210"

Les mesures de conductivité sont effectuées à l'aide d'un conductimètre "Hanna, EC214conductimètre".



Figure II.8 : Conductimètre "Hanna, EC214 "

II.5.2.L'analyse chimique

Les mesures des indicateurs de la dépollution (turbidité, couleur en termes d'absorbance) sont effectuées sur les échantillons prélevés.

a. Mesure de la turbidité

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).

b. Mesure de l'absorbance

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.10). L'absorbance permet d'estimer la coloration des effluents de façon indirecte [36].



Figure II.9 : Turbidimètre Hanna "HI88703"



Figure II.10 : Dispositif représentant le spectrophotomètre utilisé

Le rendement d'élimination de la turbidité (Y_{Turb}) est déterminé par la relation suivante :

$$Y_{\text{Turb}} = \frac{\text{Turb}_i - \text{Turb}_f}{\text{Turb}_i} \cdot 100$$

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

L'efficacité d'élimination de la couleur (\mathbf{Y}_{Col}) est exprimée comme suit:

$$\mathbf{Y}_{Col} = \frac{\mathbf{Abs}_i - \mathbf{Abs}_f}{\mathbf{Abs}_i} \cdot 100$$

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

II.6. L'énergie consommée

La consommation d'énergie spécifique par kg de colorant éliminé (\mathbf{E}_{dye}) et la consommation spécifique des électrodes par kg de colorant (μ_{Al}) sont calculées par les équations suivantes :

$$\mathbf{E}_{dye} \left(\frac{\mathbf{kWh}}{\mathbf{kgdye}} \right) = \frac{\mathbf{UI}}{1000 \mathbf{Q} (\mathbf{C}_i \mathbf{Y}_{COL})}$$

$$\mu_{Al} \left(\frac{\mathbf{kgAl}}{\mathbf{kgdye}} \right) = \frac{3600 \mathbf{M}_{Al} \mathbf{I} \Phi_{Al}}{3\mathbf{F}} \frac{1}{\mathbf{Q} (\mathbf{C}_i \mathbf{Y}_{COL})}$$

La concentration initiale en colorant \mathbf{C}_i est en kg/m^3 , l'intensité de courant \mathbf{I} est en ampère (A), la tension \mathbf{U} entre les électrodes est en volt (V), le débit d'alimentation \mathbf{Q} en m^3/h , la masse molaire de l'aluminium \mathbf{M}_{Al} (0.027 kg/mol), la constante de Faraday \mathbf{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 $\Delta \mathbf{m}_{exp}$ à la masse théorique d'aluminium libérée à l'anode $\Delta \mathbf{m}_{th}$:

$$\Phi_{Al} = \frac{\Delta \mathbf{m}_{exp}}{\Delta \mathbf{m}_{th}}$$

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 [37].

II.7. Les électrodes utilisées

Les électrodes utilisées sont en aluminium d'une pureté d'environ 98 % (Fig. II.11). Leur conductivité électrique est de l'ordre de $38,2 \cdot 10^6 \text{ mS/cm}$. 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.11) représente la composition élémentaire du métal des électrodes réalisée par microscope électronique à balayage (MEB).

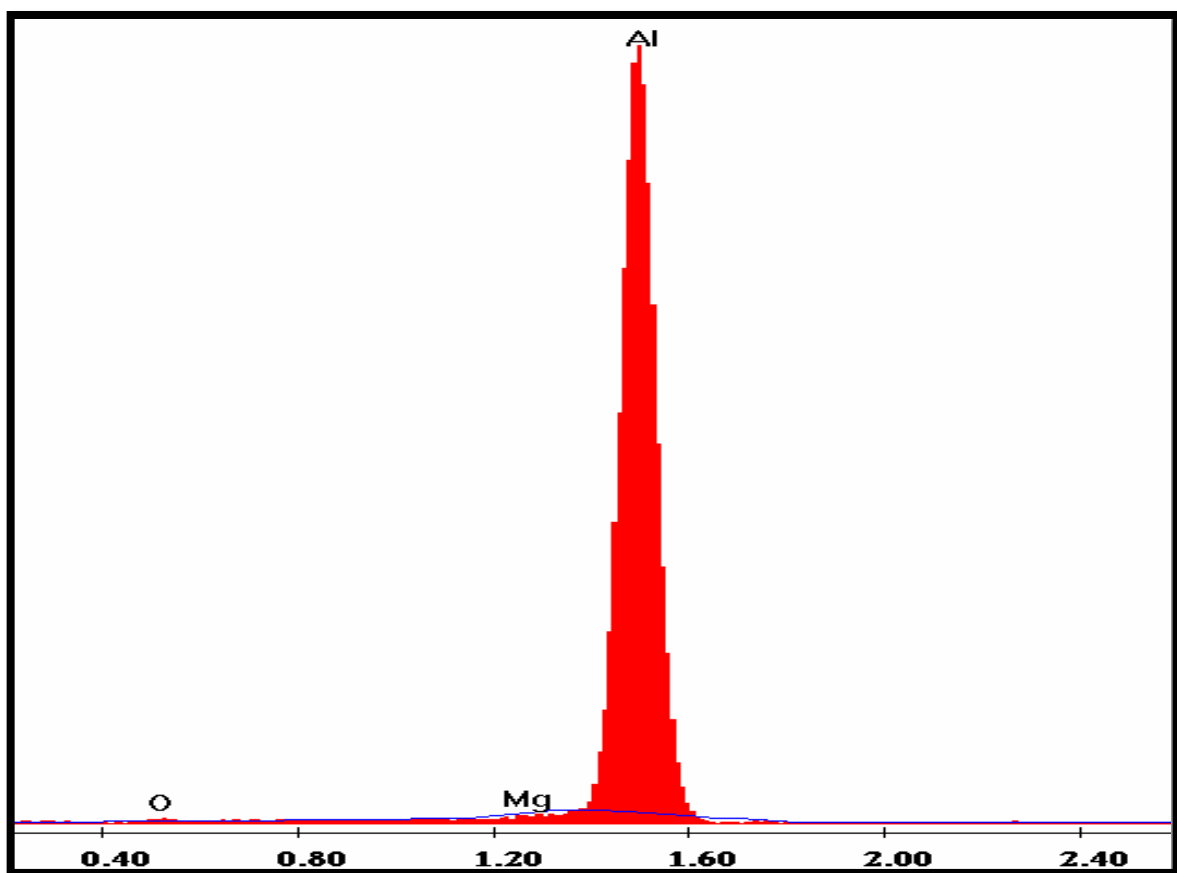


Figure II.11 : Composition élémentaire du métal des électrodes (Al) réalisée par MEB[38].

Chapitre III

Interprétation des résultats

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre rassemble tous les résultats des expériences menées avec les électrodes d'aluminium, sur l'élimination du colorant rouge Nylosan et Rouge Congo utilisé dans l'industrie de textile. Les mesures concernent le pH, la tension affichée sur la base du courant imposé, la conductivité, la température, les indicateurs de pollution tels que, la turbidité, l'absorbance.

L'objectif de cette partie est d'évaluer les performances du traitement par EC pour éliminer :

- Le colorant Rouge nylosan
- Le colorant Rouge Congo
- Le mélange des deux.

III.2. Interprétation des résultats du courant continu

III.2.1. Influence de la densité de courant sur l'élimination du colorant Rouge Congo

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. 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/décantation.

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, 300 et 400 A/m²**) à une concentration initiale fixe **C_i = 50 mg/L**, **pH** initial aux alentours de **7** et un débit d'écoulement **Q = 15 L/h**.

Les résultats trouvés sont représentés sur les figures **III.1** et **III.2**.

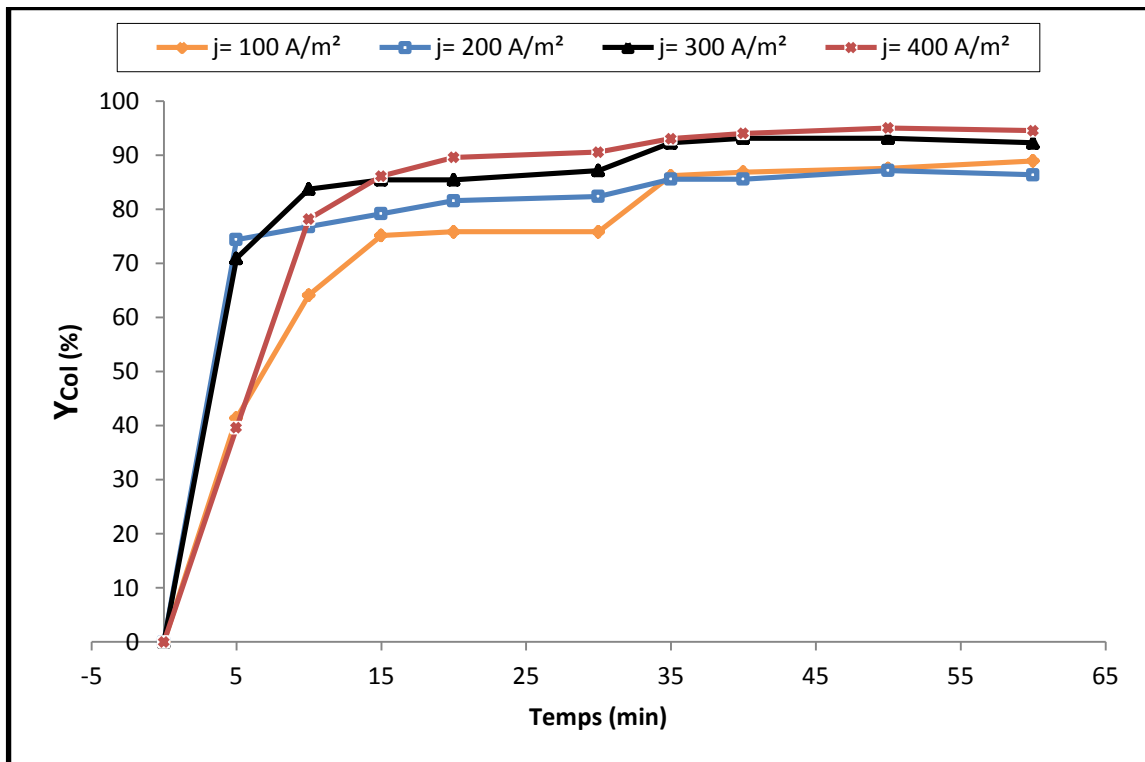


Figure III.1 : Effet de la densité de courant j sur l'élimination de la couleur : $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

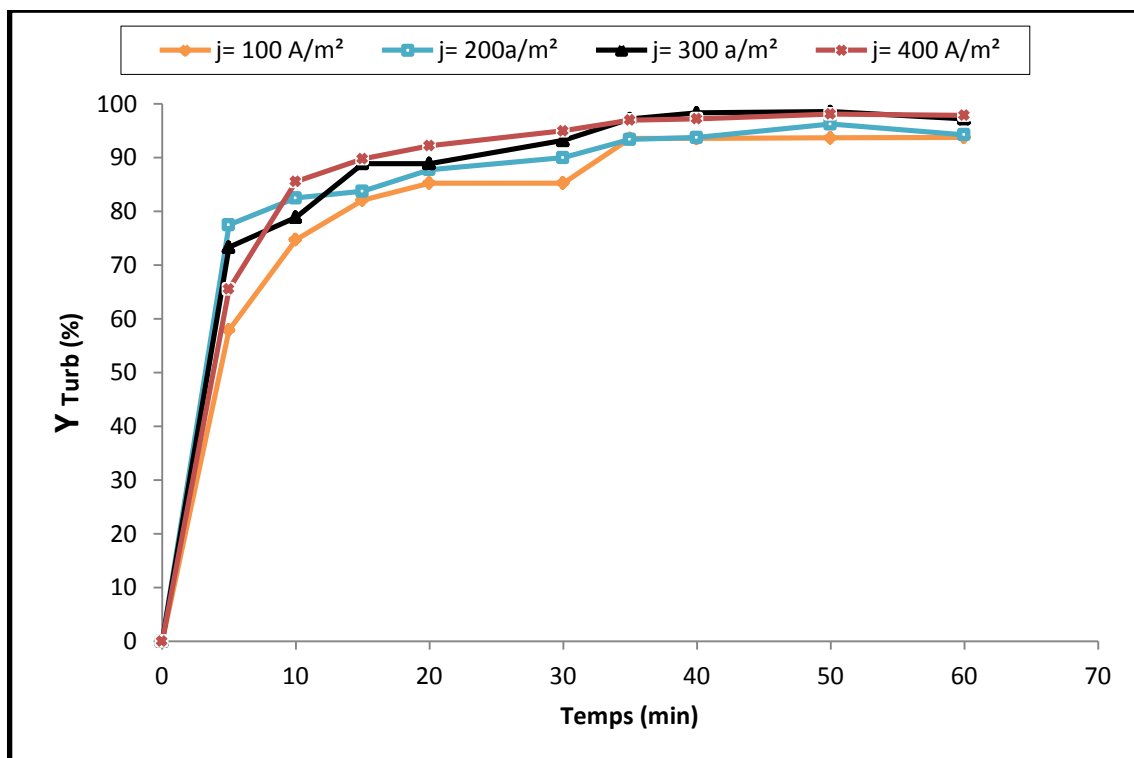


Figure III.2 : Effet de la densité de courant j sur l'élimination de la turbidité: $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

Les figures III.1 et III.2 montrent que le temps requis pour atteindre les valeurs optimales, c-à-d, les valeurs sur le plateau, diminue lorsque j augmente de 100 à 400 A/m², et devient presque constant à environ **35 min (temps de séjour)**. Une augmentation de densité de courant de 100 à 400 A/m² a engendré une augmentation de l'efficacité de décoloration de **88,96 à 94,55 %** pour l'absorbance et **93,78 à 97,88 %** pour la turbidité après **60 min** de traitement. Ceci est prévisible : quand la densité de courant augmente, la quantité de cations d'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 petite lorsque j est supérieure à **200 A/m²**.

Une densité de courant optimale peut donc être définie. En effet, lorsque l'augmentation de Y_{col} avec j est légère, les inconvénients de travailler avec des densités de courant élevées règnent : d'abord, la quantité de la boue formée augmente typiquement comme la densité de courant j ; puis, le même se tient pour la consommation du matériau d'électrode μ_{Al} (kilogramme d'Al requis par kilogramme de colorant enlevé), tandis que la consommation d'énergie E_{dye} augmente comme le carré de la densité de courant j^2 . Ces tendances ont été confirmées expérimentalement sur les figures (III.3) et (III.4) pour E_{dye} et μ_{Al} , respectivement, et elles sont conformes aux résultats déjà rapportés dans la littérature pour les effluents de textile [35]. En particulier, la consommation d'électrode par kilogramme de colorant devrait être réduite au minimum parce qu'elle peut constituer jusqu'à 80 % du coût total de fonctionnement pour les électrodes en aluminium [39].

La densité de courant optimale semble donc être entre 200 et 400 A/m². En conséquence, $j = 300$ A/m² correspondant à une intensité de courant $I = 1.44$ Aa été maintenue pour la menée des autres expériences.

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

De nombreux travaux sur l'électrocoagulation ont porté sur la consommation énergétique en termes d'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) (Daneshvar et al. 2007). Cette énergie a souvent été étudiée en fonction des paramètres de l'EC d'une façon générale.

L'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) et la consommation spécifique des électrodes par kg de colorant (μ_{Al}) sont calculées par les équations du chapitre II, section (II.6).

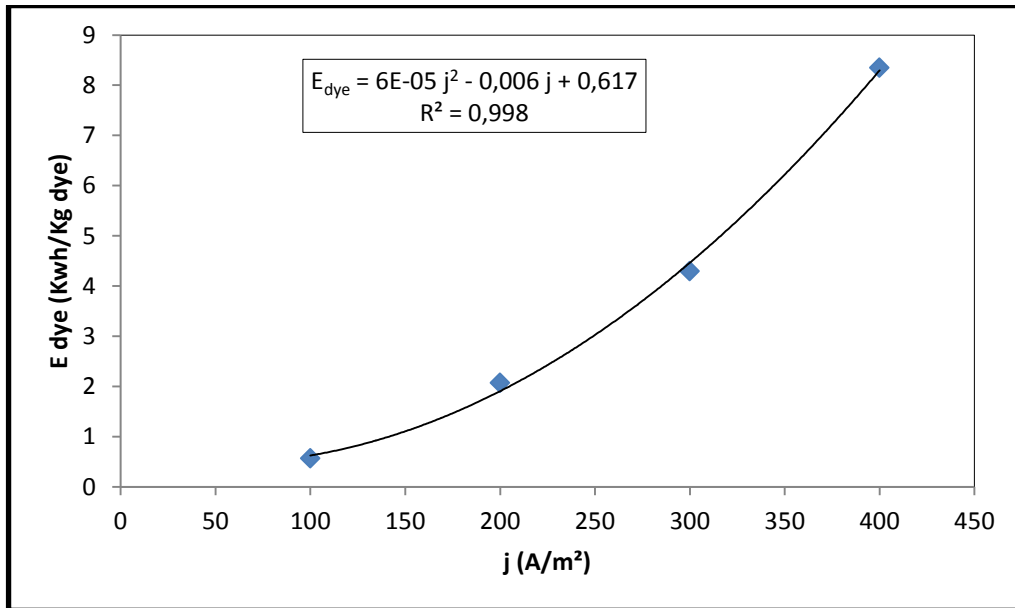


Figure III.3 : Effet de la densité de courant j sur l'énergie électrique spécifique consommée (E_{dye}) :
 $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

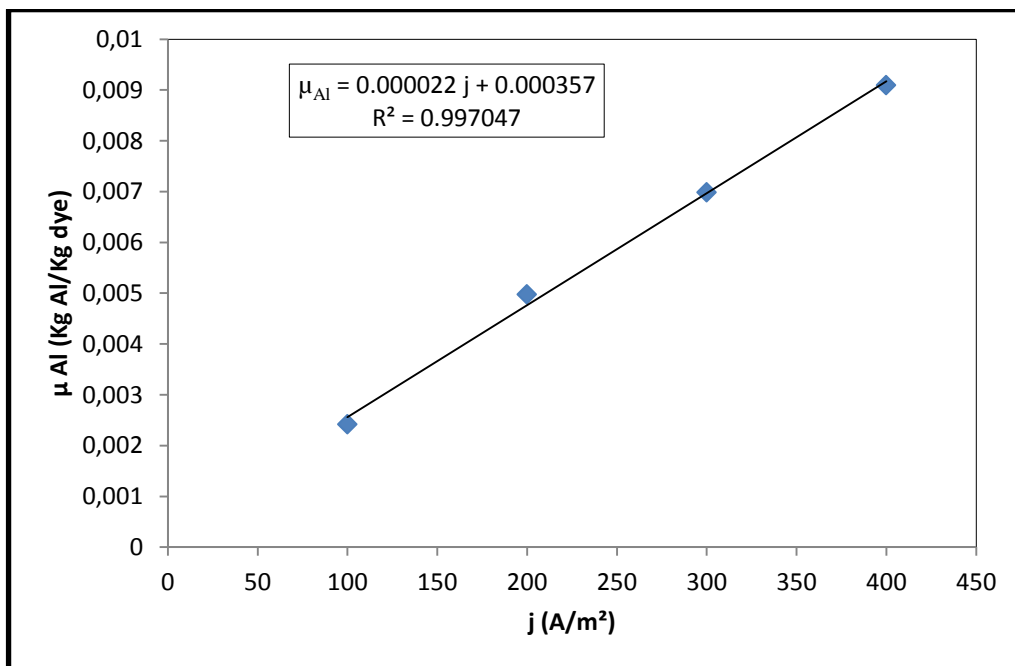


Figure III.4 : Effet de la densité de courant j sur la consommation des électrodes (μ_{Al}):
 $C_i = 50$ mg/L, pH initial = 8.02, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

Les figures III.3 et III.4 montrent que E_{dye} et μ_{Al} augmente d'une façon continue en fonction de j Cela est observé. 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 % d'après Bayramoglu et al.(2004). 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. Il serait donc intéressant de travailler à des densités de courant peu élevées.

III.2.3. L'effet du mélange des deux colorants (Rouge Congo et Rouge Nylosan)

Pour voir si le mélange peut affecter l'efficacité d'élimination de la pollution, on a mélangé les deux colorants avec des concentrations de 50 mg/L pour chaque colorant. Les résultats trouvés sont regroupés dans les figures suivantes.

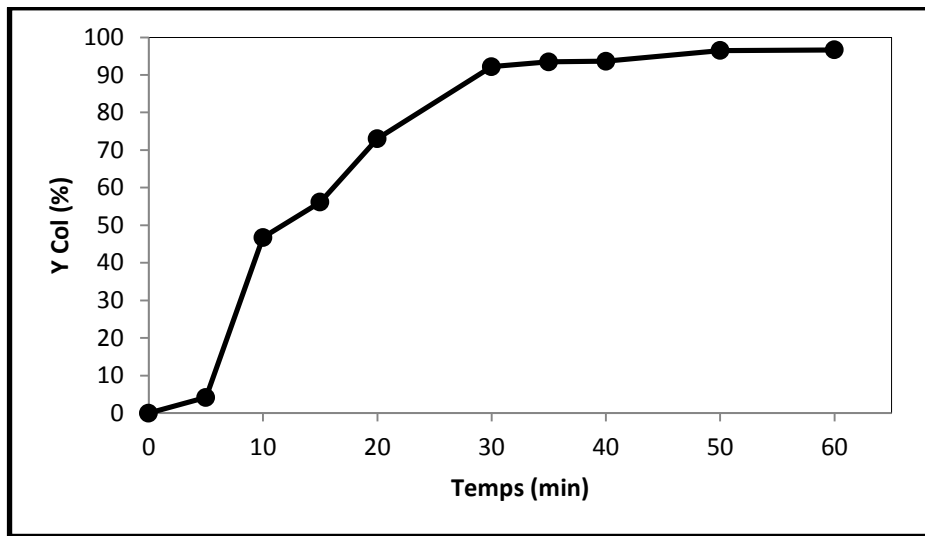


Figure III.5 : Effet de la densité de courant j et de mélange des deux colorants sur l'élimination de l'absorbance : $C_i = 50 + 50$ mg/L, pH initial = 10.8, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

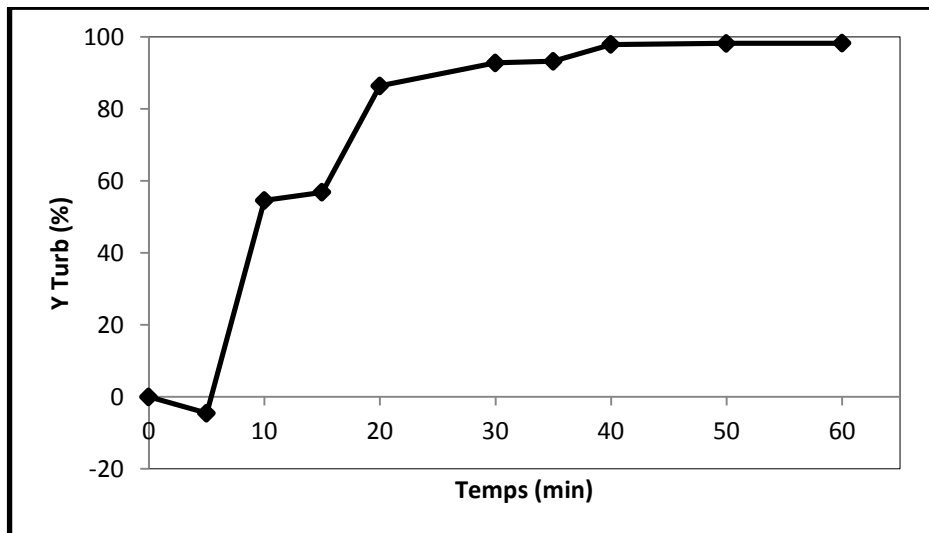


Figure III.6 : Effet de la densité de courant j et de mélange des deux colorants sur l'élimination de la turbidité : $C_i = 50 + 50$ mg/L, pH initial = 10.8, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

Les courbes III.5 et III.6 montrent que l'efficacité de réduction de l'absorbance et la turbidité augmente avec le temps de traitement pour atteindre une valeur maximum à environ 35 min de traitement (temps de séjours).

D'après ces résultats, l'EC fonctionne avec un bon rendement d'élimination des colorants soit pour un colorant seul soit pour un mélange des deux colorants (> 96 %).

III.2.4. Influence de la concentration initiale sur l'élimination du colorant Rouge Nylosan

Dans le but d'évaluer l'influence de la concentration initiale du colorant sur le traitement par électrocoagulation, nous avons testé les concentrations suivantes : 100, 200, 400, 600, 800 et 1000mg/L, en appliquant les paramètres optimaux tels que, $j = 300 \text{ A/m}^2$, $Q = 15 \text{ L/h}$.

Les résultats obtenus sont les suivants.

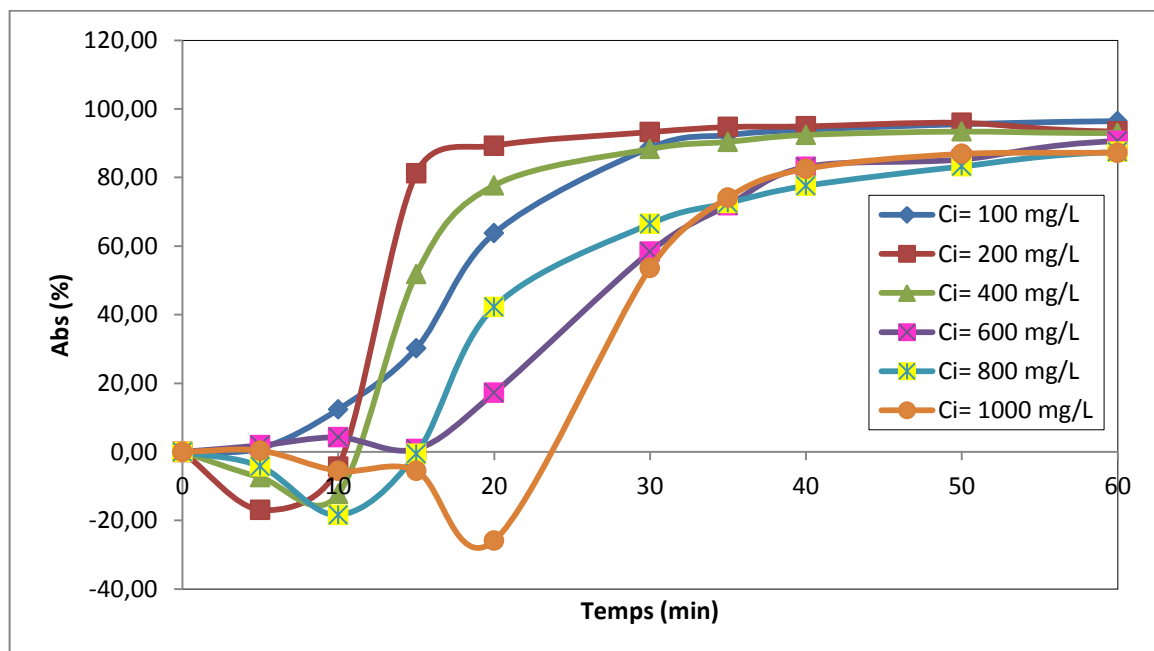


Figure III.7 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la couleur : pH initial = 7.41, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2.4 \text{ mS/cm}$

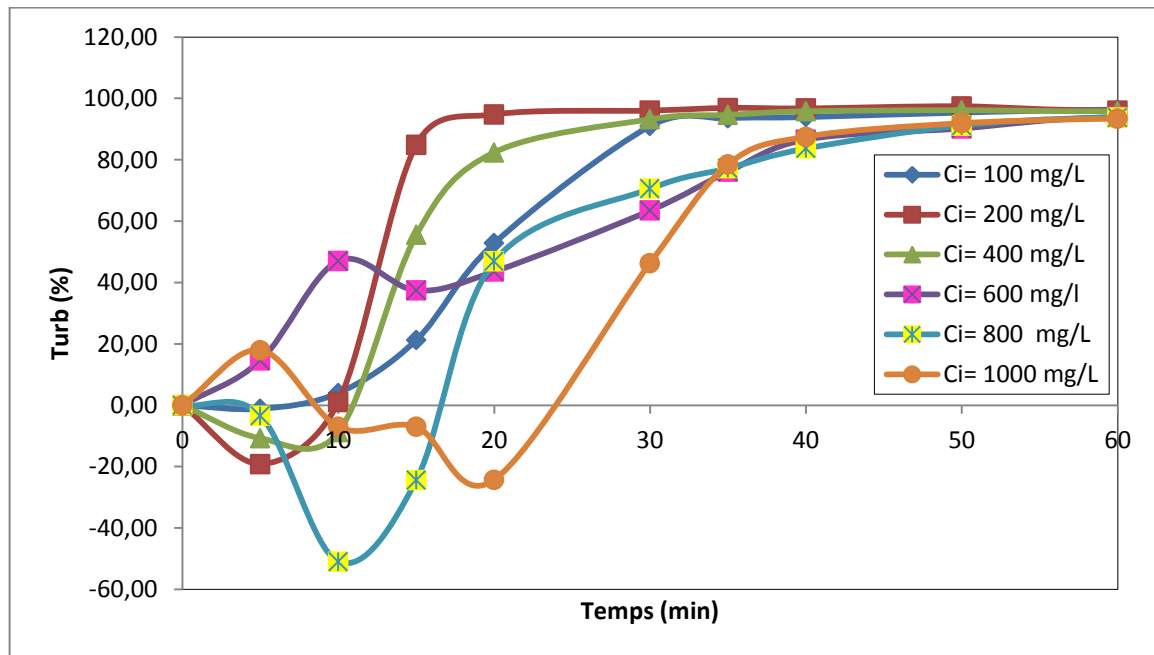


Figure III.8 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la turbidité : pH initial = 7.41, densité de courant $j = 300 \text{ A/m}^2$, débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2.4 \text{ mS/cm}$

Les résultats montrent que le procédé fonctionne avec un bon rendement d'élimination de la couleur et de la turbidité ($\geq 87 \%$) pour toutes les concentrations après 60 min de traitement.

Mais il ya une petite diminution d'efficacité de décoloration avec l'augmentation de concentration initial de 100 à 1000 mg/L de **96,44%** à **87,21%** pour l'absorbance et de **96,34%** à **93,42%** pour la turbidité après 60 minute de traitement.

III.3. Application de la photovoltaïque

III.3.1. Influence de la concentration initiale sur l'élimination du colorant Rouge Nylosan

Dans le but d'évaluer l'influence de la concentration initiale du colorant sur le traitement par électrocoagulation en utilisant la photovoltaïque, nous avons testé les concentrations suivantes : **100, 200, 400, 600, 800, 1000** et **1400 mg/L** avec un débit $Q = 15 \text{ L/h}$,

Les résultats obtenus sont les suivants.

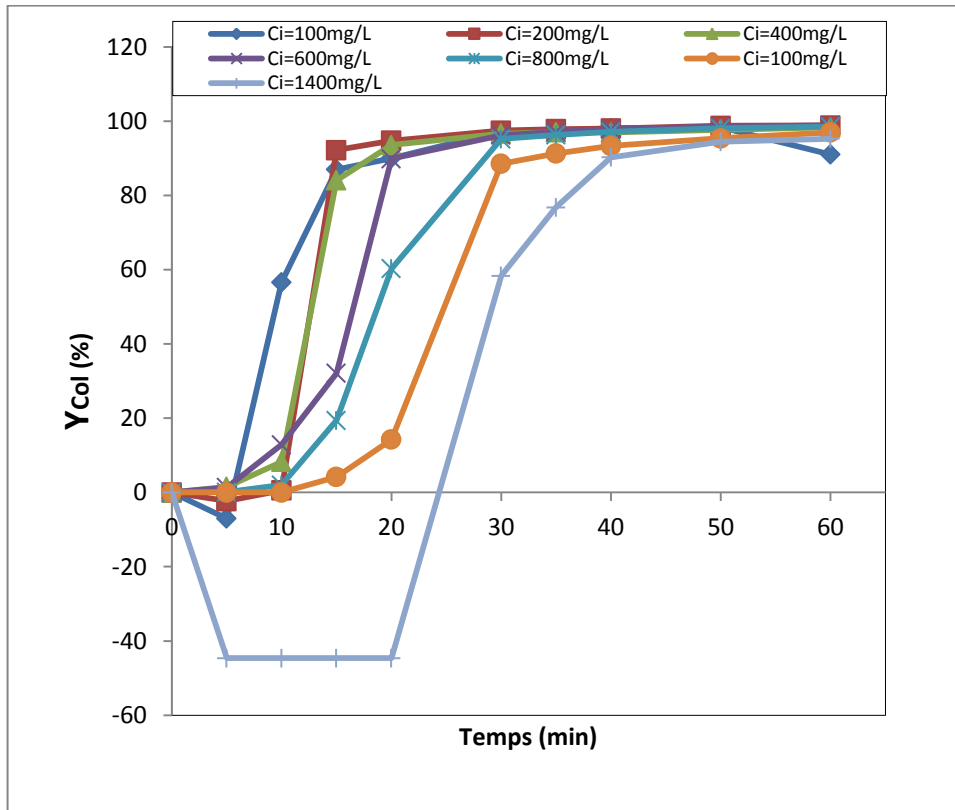


Figure III.9 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la couleur : pH initial = 8.02, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

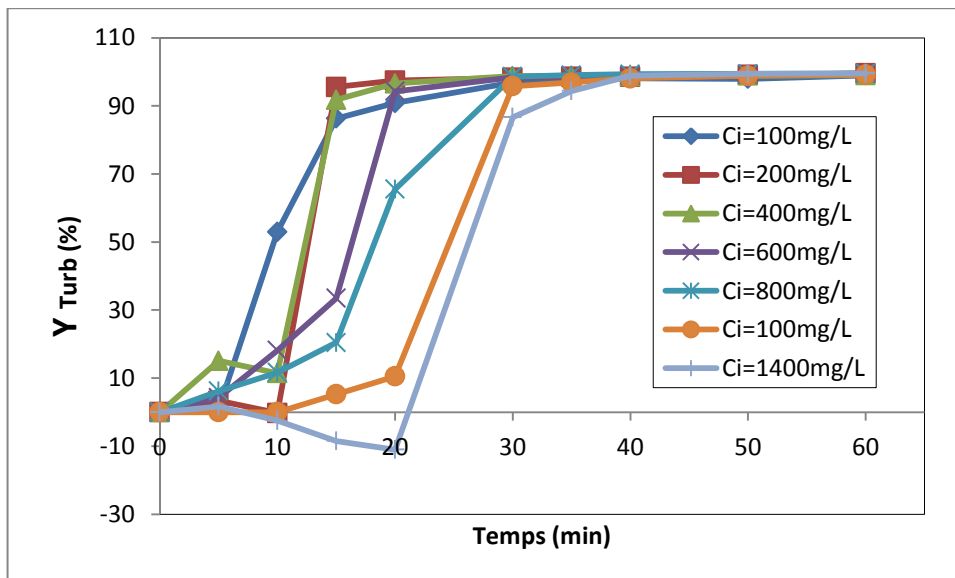


Figure III.10 : Effet de la concentration initiale C_i sur l'efficacité d'élimination de la turbidité : pH initial = 8.02, débit d'alimentation $Q = 15$ L/h, $\kappa = 2.4$ mS/cm

On peut diviser les figures III.9 et III.10 en deux parties

- **Partie 0 à 35 min :** on constate que l'efficacité d'élimination de l'absorbance et la turbidité est influencée par l'augmentation de concentration de colorant de 1000 à 1400

mg/L. Ceci est prévisible quand la concentration de colorant augmente la quantité d'hydroxyde d'aluminium (coagulant) $\text{Al}(\text{OH})_3$ produit ne suffit pas à éliminer la pollution.

➤ **Partie 35 à 60 min** : Les résultats montrent que l'efficacité de décoloration pour toutes les concentrations étudiées ($Y_{\text{col}} > 98\%$ et $Y_{\text{Turb}} > 90\%$) après 60 min de traitement.

III.3.2. Comparaison entre un générateur de courant électrique et un générateur photovoltaïque

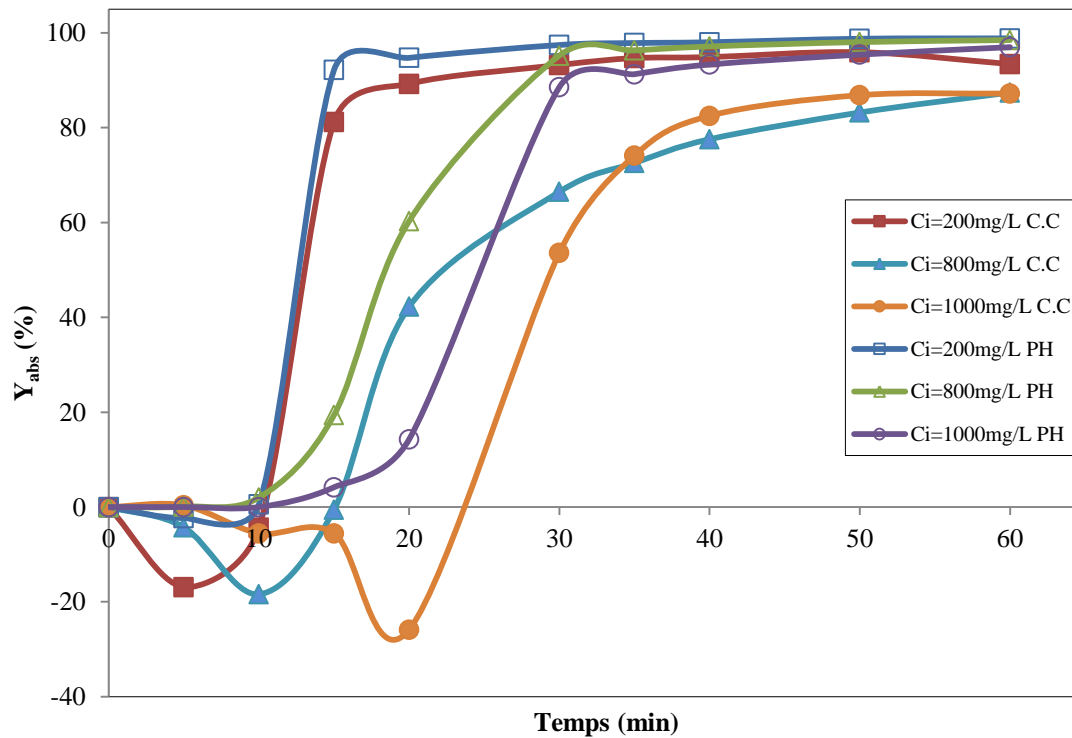


Figure III.11 : Effet de la concentration initiale C_i et de générateur de courant sur l'efficacité d'élimination de la couleur : débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2.4 \text{ mS/cm}$.

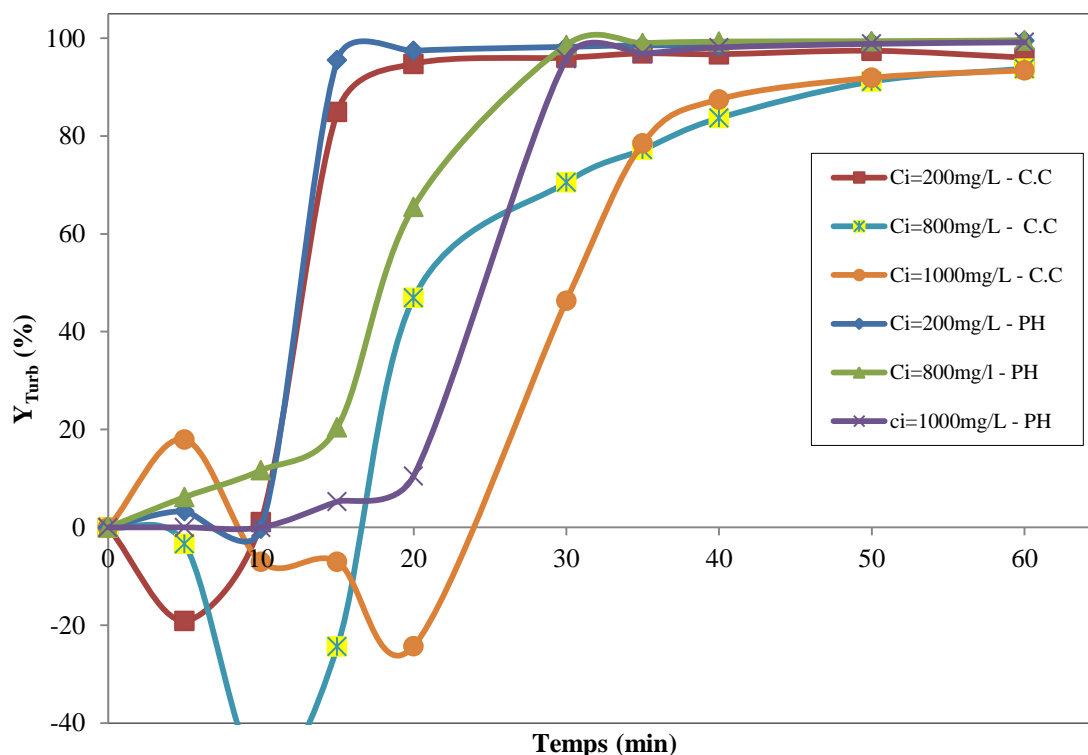


Figure III.12 : Effet de la concentration initiale C_i et de générateur de courant sur l'efficacité d'élimination de la turbidité : débit d'alimentation $Q = 15 \text{ L/h}$, $\kappa = 2.4 \text{ mS/cm}$.

Les courbes (III.11) et (III.12) montrent que le traitement par un générateur de courant photovoltaïque est plus efficace d'éliminer la couleur et la turbidité de l'effluent même à des concentration élevée par apport un générateur de courant continu (C.C), car l'intensité (I) produit par un générateur photovoltaïque (PH) est supérieure à l'intensité produite par générateur de courant continu. L'intensité et le voltage produit par le générateur photovoltaïque dépend des rayonnements solaire.

III.3.3. Comparaison de la densité de courant (j) entre les deux types de sources

Le tableau suivant nous résume les paramètres énergétiques de la photovoltaïque et du générateur de courant continu pour une concentration initiale du Rouge Nylosan $C_i = 100 \text{ mg/L}$.

D'après ces résultats, on constate que la densité de courant de la photovoltaïque est supérieure à celle fournie par un générateur de courant continu (C.C). A titre indicatif, l'énergie (E_{dye}) est de l'ordre de **16 kWh/kg du colorant éliminé**, et elle est **nulle** dans le cas de la photovoltaïque. La consommation des électrodes (μ_{Al}) est de **0.45 kgAl/kg du colorant éliminé** pour la première source, et elle est de l'ordre de **0.6 kgAl/kg du colorant éliminé** pour la photovoltaïque.

Tableau III.1. Comparaison des paramètres énergétiques entre les deux sources d'énergie

Temps (min)	Courant continu			Photovoltaïque		
	I (A)	U (V)	j (A/m ²)	I (A)	U (V)	j (A/m ²)
0	1.92	13.1	400	1.85	14.6	385.41
5	1.92	12.8	400	2.62	17.7	545.83
10	1.92	12.6	400	2.71	17.9	564.58
15	1.92	12.5	400	2.75	18	572.91
20	1.92	12.5	400	2.74	17.9	570.83
30	1.92	12.7	400	2.67	17.5	556.25
35	1.92	12.8	400	2.68	17.6	558.33
40	1.92	12.8	400	2.7	17.7	562.5
50	1.92	12.6	400	2.55	16.7	531.25
60	1.92	12.5	400	2.66	17.6	554.16

III.3. Conclusion partielle

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 cette technique pour le traitement d'un effluent simulé constitué à base de deux colorants utilisés dans l'industrie de textile. Les résultats trouvés montrent que le procédé d'EC fonctionne pour toutes les concentrations étudiées, même pour le mélange des deux colorants. Du point de vue énergétique, l'énergie consommée en fonction de la masse du colorant éliminée (E_{dye}) est de l'ordre de 16 kWh/kg du colorant éliminé pour (C.C), et elle est nulle dans le cas de la photovoltaïque. La consommation des électrodes est presque la même pour les deux sources d'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif l'élimination des colorants (Rouge Nylosan, Rouge Congo et leur mélange) utilisés dans l'industrie de textile par électrocoagulation (EC) avec des électrodes en aluminium. En imposant un courant électrique entre les électrodes (générateur de courant et panneau photovoltaïque), des ions d'aluminium (Al^{3+}) sont libérés, forment l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ qui joue le rôle d'un coagulant pour permettre la déstabilisation des particules en suspension et amorcer la formation des floccs qui seront éliminés par décantation et/ou flottation.

Nos résultats soulignent l'opportunité d'appliquer le procédé d'EC en continu avec un courant continu pour une réduction efficace de la couleur et de la turbidité. Notre réacteur d'EC-EF en continu fonctionne pour toutes les concentrations en colorants étudiées (**50 à 1400 mg/L**). Avec un pH aux voisinage de **7**, un débit d'alimentation de **15 à L/h** et sous une densité de courant de **100 à 400 A/m²**, un temps de séjour de **34.5 min**, une distance entre les électrodes de **1 cm**, on a enregistré une petite diminution d'efficacité de décoloration avec l'augmentation de concentration initiale de **50 à 1400 mg/L** de l'ordre de **96% à 87%** pour l'absorbance et de **96% à 93%** pour la turbidité à **60 min** de traitement.

L'utilisation de la photovoltaïque nous a permis de réduire la consommation énergétique, et en allant jusqu'à des concentrations élevés du colorant Rouge Nylosan (**1400 mg/L**) avec une réduction de la couleur de l'ordre de **95 %** et la turbidité à plus de **99 %**. Un autre avantage de cette source d'énergie est que la température de la solution traitée reste presque constante, et les densités de courant obtenues peuvent atteindre le double de celles obtenues par un redresseur de courant continu. Cependant cette source présente l'inconvénient de la consommation des électrodes.

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 ...
- Mettre en place un rhéostat pour régler l'intensité du panneau solaire à utiliser.
- Etude des rendements Faradiques en analysant l'aluminium consommé lors de traitement par EC par spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A).

Références Bibliographiques

- [1] Fatiha ZIDANE, Adil RHAZZAR, Jean-François BLAIS, Kamal AYOUBI, Jalila BENSALID, Soumia EL BASRI, Noureddine KABA, Qassid FAKHREDDINE, Brahim LEKHLIF, 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): 1727-1745, August 2011, ISSN 1991-8631.
- [2] R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [3] B. Flèche & D. Delagnes, *Energie solaire photovoltaïque*, juin 2007.
- [4] Gérard Groscaude « L'eau ». Volume 1, éditions Quae, ISBN : 9782759211975 (1999).
- [5] F. Meinck, H. Stooff, H. Kohlschutter « Les eaux résiduaires industrielles », 2^{ème} édition MASSON (1977).
- [6] Olivier Atteia « Chimie et pollution des eaux souterraines », Tec et Doc Lavoisier, (2005).
- [7] Guy Pierre Martineau « Maladies d'élevage des porcs » France agricole éditions, (1997).
- [8] Emilian Koller « Traitement de pollutions industrielles », (2004).
- [9] Actes d'une réunion d'experts de l'OCDE, « indicateurs environnementaux pour l'agriculture » volume 3, édition OCDE, Zurich, Suisse, novembre (2001).
- [10] Joel Graindorge, Eic Landot, « La qualité de l'eau potable, techniques et responsabilités » Territorial Editions, (2007).
- [11] Md. Tamez Uddin, Md. Akhtarul Islam, Shaheen Mahmud, Md. Rukanuzzaman, "Adsorptive removal of methylene blue by tea waste", *Journal of Hazardous Materials* 164, 53–60 (2009).
- [12] Robert Perrin, Jean-Pierre Scharff, « Chimie industrielle », 2^{ème} édition, Edition DUNOD (1996).
- [13] I. Brossard, *Technologie des Textiles*, Edition Dunod, Paris (1997).
- [14] M. Dore, *Chimie des oxydants et traitement des eaux*, Edition 1989 Paris.
- [15] H. Zollinger, *Color Chemistry – syntheses, proprieties and applications of organic dyes and pigments*, VCH Publications, New York, N.Y (1991).
- [16] J. Belegald, *Les colorants industriels*, Encyclopédie médico-chirurgicale pathologie du travail, intoxications maladies par agents physiques 16082 à paris, Editions techniques, pp 5. (1987).
- [17] A.B. DOS Santos, *Reactive decolourisation of deys by thermophilic anaerobic granular sludge*. Thèse de Doctorat, Wageningen University (Pays-Bas) 2005.
- [18] Flandrin-M Bletty, *Technologie et Chimie des Textiles*. Edition Cépaduès (1976).
- [19] N. Adhoum, L. Monser, N. Bellakhal, J.-E. Belgaied, Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electrocoagulation, *J. Hazard. Mater.*, 112, 207–213 (2004).
- [20] A. Alinsafi, M. Khemis, M.N. Pons, J.P. Leclerc, A. Yaacoubi, A. Benhammou, Nejmeddine, *Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater*, *Chem. Eng.*

Process, 44, 461–470 (2005).

[21] M.H. Al-Malack, A. A Bukhari, N.S. Abuzaid, Crossflow microfiltration of electrocoagulated kaolin suspension: fouling mechanism, *Jour. Mem. Sci.*, 243, 143-153 (2004).

[22] M. Muhammad H. Al-Malack, A. B. Alaadin, S. A. Nabil, B.Amirtharajah, K. M. Mill, Rapid mix desing for mechanisms of alum-coagulation. *Journ. Am. Water Wks Ass.*, 74, 210- 219 (1988).

[23] PICARD (2000), Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation, thèse de Doctorat Université de Limoges, 12-35 pp.

[24] BARD A.J and FAULKNER L.R (1983), électrochimie principes, methods et applications, Masson Ed. 791 p.

[25] C. A. Backes, E. Tipping, Aluminium complexation by Aquatic Humic fraction under aditic conditions. *Water Res.*, 21, 211-216 (1987).

[26] M. Bayramoglu, M. Eyvaz, M. Kobya, Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation : economical evaluation, *Chem. Eng. J.*, 128, 155–161(2007).

[27] M. Bayramoglu, M. Kobya, O.T. Can, M. Sozbir, Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Sep. Purif. Technol*, 37, 117–125 (2004).

[28] A.J. Bard, L.R. Faulkner, “Electrochimie, principe, méthodes et applications”. Masson edition, 78595, 2-225 (1983).

[29] M. Bayramoglu, M. Kobya, M. Eyvaz, E. Senturk, Technical and economic analysis of electrocoagulation for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater *Sep. Purif. Technol.*, 51, 404-408 (2006).

[30] D. J. Blackwood, A. S. L. Chong, Pitting corrosion on aluminium in absence of chloride. *British Corrosion Journal*, 33, 3, 219-225 (1998).

[31] Bollina, Possibilities of the electric coagulator for water treatment. *Water and Sewage*, 3,21-25, (1947).

[32] A. M. C. Brett, A. –M. C. F. Olivier Brett, J. L. C. Pereira, C. Rebelo. *Journal of applied electrochemistry*, 23, 332. (1993).

[33] A. E. R. Bruce, P. S. T. Sai and K. Krishnaiah, Liquid phase mixing in turbulent bed contactor. *Chem. Eng. Sci.*, 58, 3453-3463, (2003).

[34] O.T. Can, M. Kobya, E. Demirbas, M. Bayramoglu, Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62, 181–187 (2006).

[35] M.Carmona, M. Khemis, J.P. Leclerc, F. Lapique, A simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique. *Chem. Eng. Sci.*, 61, 1237–1246 (2006).

[36] - 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^o.2 (2011) 216-235.

[37] - 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.

[38] - Merzouk, B, Etude expérimentale pour le traitement des eaux usées industrielles par électroflottation. Thèse de Doctorat (2009), Université de Bejaia.

[39] - B. Merzouk, B. Gourich, A. Sekki, K. Madani, and M. Chibane, “Removal turbidity