

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés

MÉMOIRE DE MASTER 2

Spécialité : PTEPE

THEME

***ÉTUDE DE L'ELECTROCOAGULATION DE DEUX
COLORANTS (VERT DE METHYLE ET JAUNE BASIQUE 28)
EN MELANGE BINAIRE.***

Présenté par :

Benmenni Fatima

Proposé par :

Promoteur : Cheknane Benamar

Co. Promoteur : Aoudj salah eddine

Soutenue devant le jury composé de :

ZERMANE Faiza

Présidente

HAMITOUCHE Houria

examinatrice

BOUTMAK Khalia

examinatrice

Blida, 2016

Dédicace

À ma mère.

À mon marié.

À mes filles.

À toute ma famille.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié le procédé d'électrocoagulation de deux colorants cationiques (vert de méthyle et le jaune basique 28) en utilisant des électrodes en aluminium et en acier inoxydable.

Dans la première partie on a étudié l'effet de trois paramètres les plus importants à savoir (l'intensité de courant, pH du milieu et la concentration en colorant) sur la décoloration de ces polluants dans le système simple mono-composé. Les résultats obtenus nous ont permis de montrer que ces polluants disparaissent totalement de la solution et les résultats de la cinétique d'adsorption ont révélé qu'elle est fonction de la nature des colorants et que l'électrocoagulation est un procédé efficace pour le traitement des eaux colorés dans nos conditions expérimentales. Dans une deuxième partie, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'élimination de ces polluants dans un mélange binaire, ou nous avons pu montrer également que l'électrocoagulation de vert de méthyle et de jaune basique 28 en mélange binaire est influencée par la présence de l'un et de l'autre.

Mot clé : électrocoagulation, vert de méthyle, jaune basique 28 ; compétition.

Summary

In this work, we studied the process of electrocoagulation of two cationic dyes (basic methyl green and yellow 28) using aluminum electrodes and stainless steel. In the first part, we studied the effect of three main parameters, namely (the current intensity, medium pH and the dye concentration) on the discoloration of these pollutants in the simple system mono-composed. Results have allowed us to show that these pollutants are entirely removed from solutions and the results of the kinetics of adsorption reveals that it is a function of the nature of the dye and electrocoagulation is an effective method for the treatment of colored water in our experimental conditions. In a second part, we are interested in the study of the elimination of these pollutants in a binary mixture, we have also shown that methyl green and yellow 28 basic electrocoagulation of binary mixture is influenced by the presence one and the other.

Keyword: electrocoagulation, methyl green, Basic Yellow 28; competition

ملخص

يتلخص هذا العمل بدراسة التخثير الكهربائي لمولنين اخضر الميثيل وأصفر قاعدي 28 باستعمال ممر بين من الألمنيوم والفولاذ الغير مؤكسد في الجزء الأول قمنا بدراسة مدى تأثير (شدة التيار، درجة حموضة المحلول، والتركيز الأولي للملوث) على إزالة الملوثات على كل حدي حيث أثبتت النتائج على إزالة هذه الملونات نهائيا من المحلول وسرعة الإزالة تتعلق بطبيعة الملون والعوامل المدروسة سابقا، وبذلك فإن التخثير الكهربائي وسيلة ناجحة في معالجة المياه الملوثة بالملونات، أما في الجزء الثاني فقمنا بدراسة إزالة الملونات في المزيج الثنائي، أين أثبتنا أن التخثير الكهربائي يعمل على إزالة تامة للملوثات في حالة المزيج الثنائي.

كلمات مفاتيح: ملونات، تخثير كهربائي، أخضر ميثيل، أصفر قاعدي 28

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie **Dieu** pour tout le courage et la force qu'il m'a donné pour faire Ce travail.

C'est un plaisir pour moi de remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. Les nombreux étudiants qui sont succédées dans le laboratoire m'ont été d'une aide précieuse au différent stade de cette étude.

C'est à mon directeur de thèse, le docteur Cheknane Benamar, que j'aimerais formuler mes plus Vifs remerciements. Son ouverture d'esprit, associée à une rigueur scientifique peu commune, m'ont permis de bénéficier d'une direction de recherche que est un exemple de ce que le milieu universitaire peut fournir de meilleur comme encadrement scientifique.

- Je remercie monsieur docteur Aoudj Salaheddine, d'une part pour avoir accepté d'être mon Co-promoteur, et d'autre part, de sa disponibilité et sa précieuse aide technique et scientifique contribuant au bon déroulement de ma thèse.
- Je suis également très reconnaissant envers monsieur, Bouras, professeur de faculté de technologie pour ces discussions scientifique et conseils qui m'ont été précieux pour élargir mes connaissances sur le sujet.
- Je remercie également monsieur Benmaalem Abd Erahman, responsable de laboratoire à l'université de Blida pour son aide et son soutien.
- Je remercie du fond du cœur ma mère Benmaalem Tachaalet pour son soutien infaillible et grâce à qui pu me rendre jusqu'ici ma reconnaissance à mon marie, pour sa patience et ses encouragements, pour m'avoir témoigné toute sa confiance, même dans les moments difficiles et mes trésor d'amour mes deux filles Bassma Maya et Saloua Sofia.
- En fin, je remercie, toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu, de près ou de loin, durant la réalisation de ce travail.

Merci à tous

Sommaire

Résumé	01
Remerciements.....	02
Sommaire.....	04
Liste des tableaux	07
Liste des figures.....	08
Abréviations	11
Introduction générale.....	12
Partie théorique	
Chapitre I : Electrocoagulation	
I.1. Origine et évolution d'EC.....	17
I.2. Théorie de l'électrocoagulation.....	19
I.3. Principe du procédé d'EC.....	21
I.4 Réactions aux électrodes.....	22
I.5 Complexes aluminiums matière organiques.....	24
I.6 Principale lois régissant l'électrocoagulation.....	24
I.6. 1. Loi de faraday.....	24
I.7 Paramètres influençant l'EC.....	25
I. 8.Etudes faites sur l'EC.....	26
I.8.1. Principaux résultats obtenu pour le traitement d'effluents organiques.....	27
I.9 Avantages et inconvénients du procédé d'EC.....	33

Partie expérimentale.

Chapitre II : matériels et méthodes.

II.1 - Choix des polluants organiques.....	37
II.2- Dispositif d'électrocoagulation.....	38
II.2.1- Matériaux d'électrodes.....	40
II.2-2- Préparation des électrodes.....	40
II.2-3- Protocole de nettoyage des électrodes.....	40
II.3- Réactifs utilisés.....	40
II.4- Méthodes d'analyses.....	40

Chapitre III : résultats et discussions.

III.1 Effet de l'intensité de courant.....	46
III.2 évolution du pH en fonction du temps pour chaque intensité de courant.....	47
III.3 Effet de pH initial de la solution.....	48
III.4 Effet de la concentration initiale.....	50
III.5 Teneur d'aluminium libéré.....	52
III.6 Elimination VM et de JB28 dans le mélange binaire.....	53
III.6.1 Effet de la présence du JB28 sur l'élimination de VM ($r=VM/JB28$)	53
III.6.2 Effet de la présence du VM sur l'élimination de JB28($r=VM/JB28$)	54
Conclusion	55
Références bibliographiques	58

Figures et tableaux

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Historique des applications du procédé d'électrocoagulation.....	19
Tableau I -2 : les différents traitements en EC.....	28
Tableau II.1 : Propriétés des colorants utilisés.....	38
Tableau II.2 constantes d'absorptivité ϵ des deux colorants utilisés.....	42

Liste des figures

Figure I-1 : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électronégative.....	20	
Figure I-2 : Schéma du principe de l'électrocoagulation.....	21	
Figure 1-3 : Diagrammes de prédominance des espèces d'aluminium et effet du pH.....	23	
Figure II.1 : dispositifs expérimental d'électrocoagulation.....	39	
Figure II. 2 : spectres d'absorption dans le visible des colorants utilisés.....	42	
Figure II.4 : Courbe d'étalonnage des colorants utilisés	43	
(A) : VM à $\lambda_{\max} = 632.5\text{nm}$; (B) : JB28 à $\lambda_{\max} = 460\text{ nm}$;		
(C) : VM à $\lambda_{\max} = 460\text{ nm}$ et (D) : JB28 à $\lambda_{\max} = 632.5\text{ nm}$		
Figure III.1 : effet de l'intensité de courant sur l'élimination du colorant VM.....	47	
$[\text{VM}]_0 = 20\text{mg/L}$, $\text{pH}_{\text{initial}} = 6$, $[\text{NaCl}] = 1\text{g/L}$		
Figure III.2 : variation du pH en fonction du temps pour chaque intensité de courant.		
$[\text{VM}]_0 = 20\text{mg/L}$, $\text{pH}_{\text{initial}} = 6$, $[\text{NaCl}] = 1\text{g/L}$		47
Figure III.3.1 : influence du pH initial sur l'efficacité de décoloration de VM.....	49	
$I = 600\text{ mA}$ et $[\text{VM}]_0 = 20\text{mg/l}$, $[\text{NaCl}] = 1\text{g/L}$		
Figure III.3 .2: influence du pH sur l'efficacité de décoloration de JB 28.....	49	
$I = 600\text{mA}$ et $[\text{JB28}]_0 = 20\text{mg/l}$, $[\text{NaCl}] = 1\text{g/L}$		
Figure III 4.1 : effet de la concentration initial sur l'efficacité de la décoloration de VM		
$I = 600\text{mA}$, $[\text{NaCl}] = 1\text{g/l}$ et $\text{pH}_{\text{initial}} = 6$		51
Figure III.4.2 : effet de la concentration initial sur l'efficacité de la décoloration de JB28		
$I = 600\text{mA}$, $[\text{NaCl}] = 1\text{g/l}$ et $\text{pH}_{\text{initial}} = 6$		51

Figure III.5 : effet de l'intensité de courant sur la dissolution de l'anode en aluminium.....52

Figure III.6.1 : effet de la présence de JB28 sur l'élimination de VM.....53

$I=600\text{mA}$, $\text{pH}_{\text{initial}}=6$, $[\text{VM}]_0=20\text{ mg/L}$.

Figure III.6.2 : effet de la présence de VM sur l'élimination de JB28.....54

$I=600\text{mA}$, $\text{pH}_{\text{initial}}=6$, $[\text{JB28}]_0=20\text{mg/L}$.

Abréviations

EC : électrocoagulation.

Al³⁺ : cation d'aluminium trivalent.

t : temps (minute).

I : intensité de courant.

Δm : variation de la masse de l'anode en aluminium dissoute.

EF : électroflottation.

C₀ : concentration initiale en colorant.

DCO : demande chimique en oxygène.

DBO : demande biologique en oxygène.

MES : matière en suspension.

TPH : hydrocarbures totales de pétrole.

Introduction générale

La pollution de l'environnement par des contaminants organiques d'origine urbaine ou industrielle est un défi majeur que doivent relever les scientifiques et les responsables de l'écologie et de l'environnement.

La présence de matières colorante dans les rejets textiles peut constituer une menace sérieuse pour l'environnement quand ils ont rejetés sans traitement préalable dans la biosphère. Le dysfonctionnement de la corrosion des installations industrielles peut également générer d'autres pollutions (métallique, organométalliques et surtout organiques) qui engendrent des effets néfastes sur la flore et la faune aquatique, mais aussi sur les populations humaines et animales qui consomment les eaux non traitées. Un traitement sera donc indispensable pour éliminer ces matières néfastes à l'environnement. [1]

Les recherches actuelles s'orientent vers des techniques plus efficaces pour le traitement de ces nouveaux polluants organiques faisant aussi appel aux procédés électrochimiques.

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement de l'eau polluée qui a montré son efficacité pour le traitement de certains polluants solubles ou colloïdaux, tels que rencontrés dans des rejets liquides contenant des métaux lourds, des émulsions, des suspensions, etc. L'eau comportant des nitrates, des fluorures, du plomb,... peut être probabilisée par ce procédé.

Dans l'électrocoagulation, le coagulant est libéré dans la solution *in situ*, en utilisant la dissolution d'une anode soluble. Lors de l'alimentation des électrodes en courant, il y a simultanément une dissolution du métal de l'anode et un dégagement du gaz d'hydrogène H₂ sur la cathode. Les métaux d'aluminium et de fer sont généralement utilisés comme anode. Leur dissolution conduit à la formation des hydroxydes métalliques, oxy-hydroxydes métalliques et des hydroxydes polymériques. Ces composés ont généralement une meilleure efficacité de coagulation que celle des produits chimiques utilisés dans les techniques conventionnelles. Ils peuvent déstabiliser les colloïdes en suspension, en adsorbant, neutralisant ou précipitant les espèces polluantes dissoutes dans le liquide, pour les transformer finalement en floccs facilement extractibles par précipitation, filtration ou flottation. Généralement, la flottation est plus facile à réaliser que la filtration et la précipitation. Les bulles de gaz, ainsi générées en solution ont plusieurs avantages, y compris celui du transport, en particulier par flottation des particules déstabilisées.

L'électrocoagulation a été découverte au XIX^{ème} siècle. Elle a rapidement disparu jugée trop peu efficace, pour renaître dans les années 90. Il a été prouvé que cette technique offre la

simplicité, l'efficacité, la compatibilité environnementale, la sécurité, la sélectivité, pour un faible coût, en particulier lorsque l'électrocoagulation est comparée au traitement biologique. Bien que l'électrocoagulation soit rentable par rapport aux méthodes chimiques de traitement des eaux, la difficulté majeure qui limite le développement de cette technique est le manque d'études de génie chimique destiné à son application, de la conception des équipements aux modèles de procédés liés à cette technologie.

L'objectif de ce travail est l'élimination de deux polluants organiques qui sont le colorant vert de méthyle et le jaune basique 28 par le procédé d'électrocoagulation, l'optimisation des paramètres opératoires (intensité de courant, pH et la concentration initiale de la solution) sur l'élimination des colorants avec l'utilisation d'électrode en aluminium se fera en premier sur des eaux synthétique (eau distillée polluée par les colorants), en second lieu on a étudié la compétition d'élimination dans un mélange binaire .

Le manuscrit comporte trois grandes parties :

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

La deuxième partie fait l'objet de l'étude du traitement de deux colorants cationiques, le vert de méthyle et le jaune basique 28 dans le système simple par électrocoagulation : l'influence de l'intensité de courant, pH du milieu et la concentration initiale en colorant a été étudiée et nous a permis de définir des conditions optimales d'élimination par électrocoagulation et ces conditions ont été appliqué dans le système binaire des deux colorants (vert de méthyle et jaune basique 28).

En fin nous avons terminé le manuscrit par une conclusion générale qui regroupe ces résultats qui ont été appliqués dans le système binaire des colorants.

Partie théorique

Chapitre I

Electrocoagulation

L'aspect non polluant et les facilités d'automatisation que l'électricité apporte, devraient permettre un développement significatif des techniques électrochimiques de traitement dans les prochaines années.

De nombreuses techniques utilisant directement ou indirectement, l'énergie électrique se sont déjà développées. D'autres méthodes à l'échelle de laboratoire sont en cours d'études, et apportent des résultats pertinents dans le domaine de l'environnement en général, et plus particulièrement dans le traitement des effluents [2].

I.1 Origine et évolution d'EC

L'électrocoagulation est en train de connaître couramment une renaissance [3]. Le premier document rapportant l'utilisation de L'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer. La même année une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (grande Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats – Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du cout qui était deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique [2].

En 1940, Matteson et al décrivait un « coagulateur électrique » qui consistait à faire dissoudre une anode en aluminium pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui flocculent et coagulent en entraînant les matières en suspensions et purifient l'eau [4].

Un procédé similaire a été développé en Grand Bretagne pour traiter les eaux de rivière par des électrodes de fer [4]. L'EC a été utilisée pendant toutes ces années sans véritablement connaître un succès et sans qu'elle ne soit acceptée par les populations et les industriels. Cependant, ces dernières années, on constate un regain d'intérêt, et son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels font appel à elle pour le traitement de leur effluent. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement. Son efficacité a été démontrée sur divers polluants. Elle est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Pb, Cd, Cr et As ; les métaux tels que Mn, Cu, Zn, Ni, Al et Fe également des anions tel que CN^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , F^- et Cl^- , les non métaux tels que le phosphore et des composés organiques, hydrocarbures totales de pétrole (TPH), DBO,

benzène et xylème (TBX),DBO,MES ,Minéraux ,colorants organiques ,huiles et graisse tous des effluents industriels variés.

Tableau I-1 : Historique des applications du procédé d'électrocoagulation. [2]

Date	Auteurs	Types d'électrodes	Applications
1909	Harries	Al + Fe + sel cuivre	Eaux usées urbaines
1947	Bonilla	Al	
1956	Holden	Al	Eau de surface
1970	Sadek		Eau riche en Phosphates
1974	Beck et coll.	Al + Fe	Eau très chargée en Substances humiques
1984	Vik et coll.	Al	Eau très chargée en Substances humique
1985	Pazenko et coll		Emulsions d'huiles
1988	Renk	Al + Fe	Eau riche en sable Bitumeux et schistes Pétrolifères
1989	Ryan et coll.		Suspension d'argile
1992	Shen et coll		Eau de teinture et D'impression
1996	Lin et coll.		Effluents de L'industrie textile
2000	Chen et coll.	Al	
2002	Abuzaid et coll.		Eau riche en dérivés de nitrates
2003	Shen et coll.		Eau industrielle chargée en fluors
			Emulsions d'huiles industrielles

2005	Khemis et coll		
2007	Essadki et coll		Rejets de textiles et eaux industrielles

I.2 Théorie de l'électrocoagulation (EC)

L'EC est un procédé complexe impliquant plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui utilisent des électrodes consommables (solubles) pour fournir des ions dans l'effluent d'eaux.

Trois étapes successives principales sont impliquées durant L'EC :

- Formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle.
- Déstabilisations des contaminants, suspension particulaire et rupture des émulsions.
- Agrégation des phases déstabilisées pour former les floes.

Le mécanisme de déstabilisation des contaminants, de la suspension particulaire et la rupture des émulsions peut être résumé comme suit (figureI.1) :

- Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.
- Neutralisation de la charge des espèces ioniques présentes dans le rejet aqueux à l'encontre des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle.

Ces ions réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van der Walls prédominent, causant ainsi la coagulation.

- Formation du floe : le floe formé suite à la coagulation crée les boues qui piègent et relie les particules colloïdales restant dans le milieu aqueux [1]

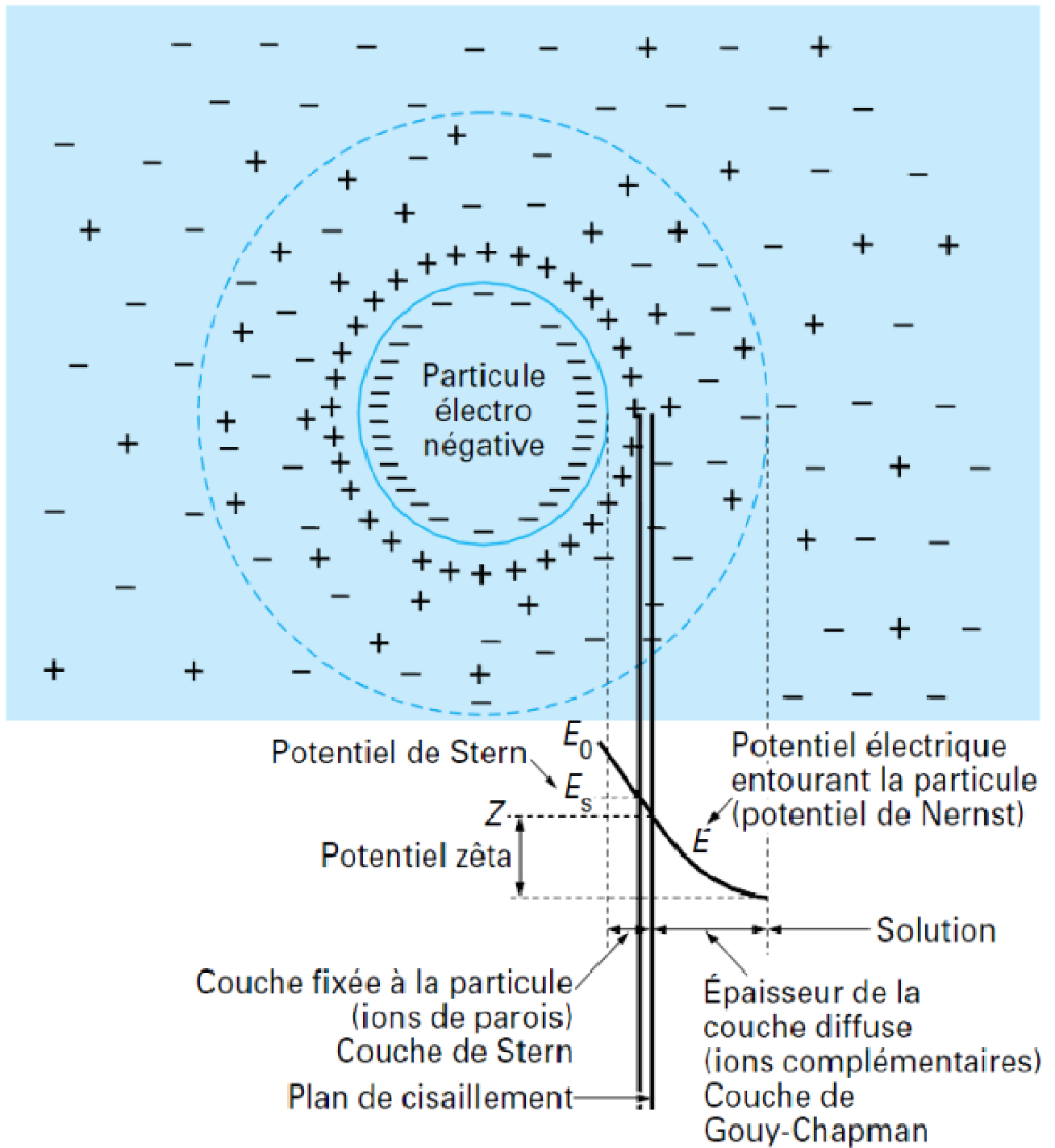


Figure I-1 : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électro négative. [5]

I.3 Principe du procédé d'EC

Le procédé d'EC 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 flocculation des polluants que l'on souhaite éliminer. Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floccs qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration). La figure (I.2), présente le principe du procédé avec une anode et une cathode en aluminium [2]. Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations, Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de tiges ou de tubes. Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux que sont choisis de manière à optimiser le procédé de traitements les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium [1].

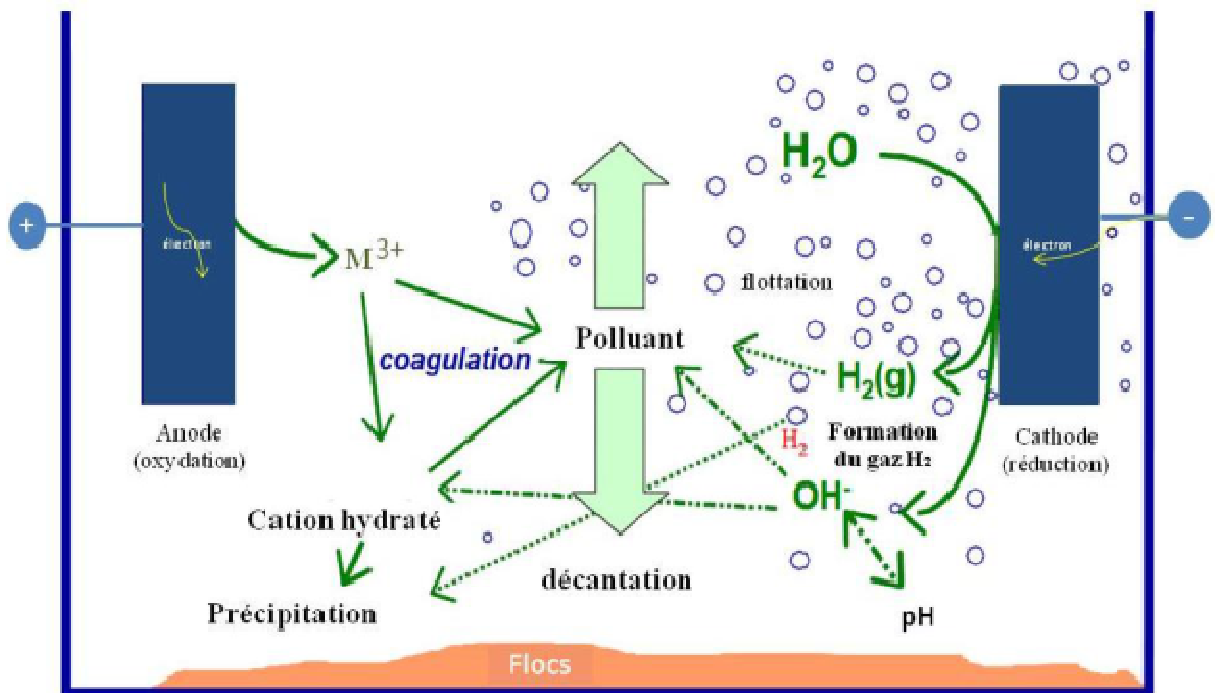


Figure I-2 : Schéma du principe de l'électrocoagulation. [5]

I.4 Réactions aux électrodes

Les électrodes les plus couramment utilisées en électrocoagulation, sont en aluminium ou en fer car ils possèdent des formes ioniques trivalentes [5]. Les principales réactions qui se produisent aux électrodes sont les suivantes.

➤ **A l'anode**

On a l'oxydation du métal qui va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction :



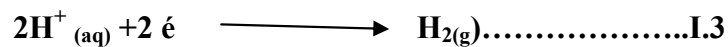
L'aluminium se dissout suivant la réaction :



➤ **A la Cathode**

Au voisinage de la cathode, la réduction du solvant (eau) provoque la formation du gaz d'hydrogène dont le dégagement permet la flottation des particules floculées (coagulées) [1].

Sous conditions acides, la réduction de l'eau est la suivante :



Sous conditions basiques, elle prend la forme suivante :



L'ion Al^{3+} , réagit, avec l'eau en attirant les ions OH^- pour former des complexes anioniques, cationiques ou neutres selon la réaction suivante :



Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espace majoritaire dépend du pH du milieu. Dans le cas d'aluminium, on trouve une multitude de complexes anionique. [6]

Ce sont ces espèces qui jouent le rôle de coagulant en neutralisant les charges négatives à la surface des colloïdes, et conduisent à la formation de précipité, puis de floc facilement éliminables [1].

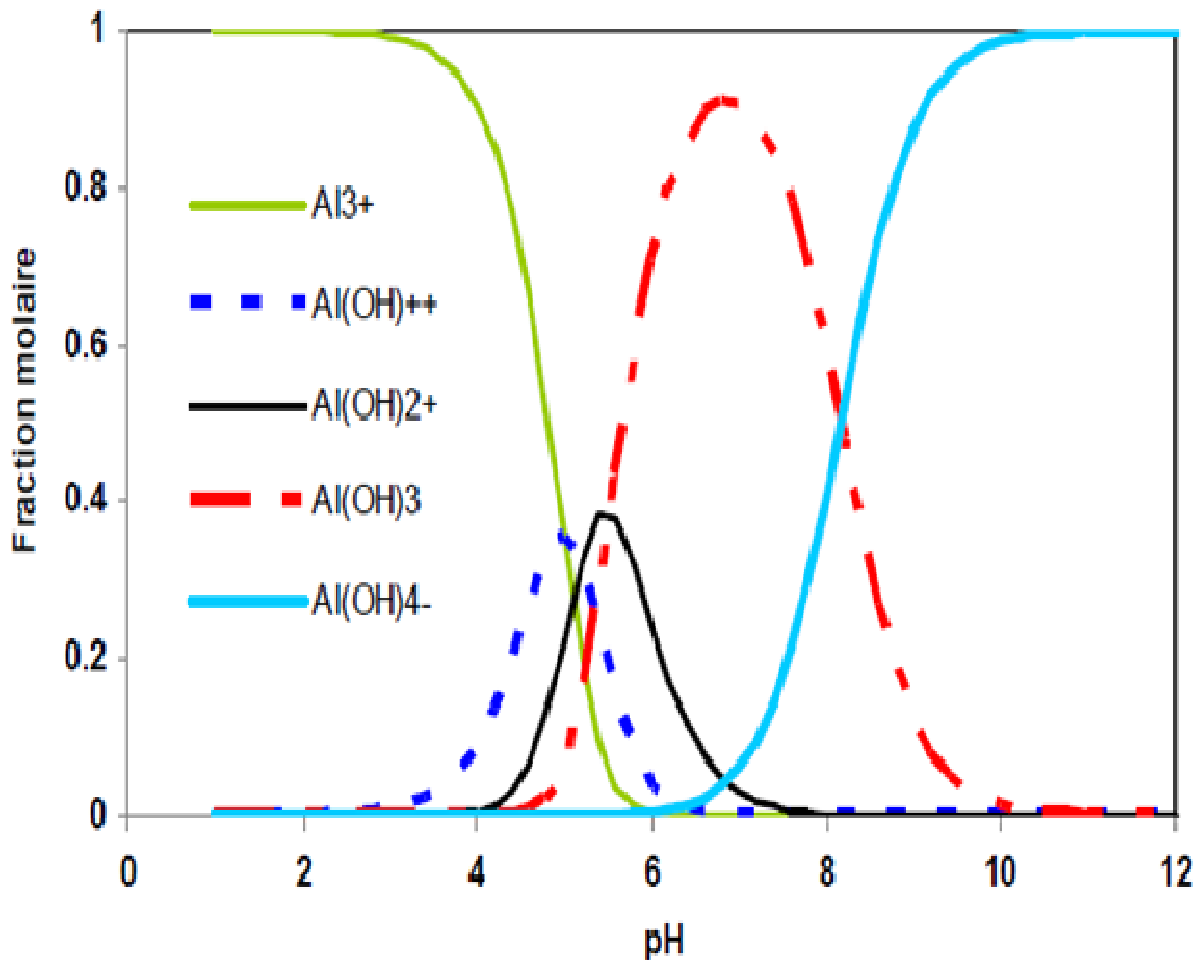


Figure 1-3 : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium (sans Tenir compte des formes polymères de ces hydroxydes). [5]

I.5 Complexes aluminium- matière organiques

L'aluminium peut former des complexes avec les matières organiques naturelles telles que les dérivés d'acides humiques, les protéines, les micelles et les colloïdes. La matière organique réagit plus facilement avec l'aluminium en milieu acide $\text{pH} < 4.5$ qu'en milieu basique ou neutre.

La détermination des constantes de formation des complexes Al – org n'est pas bien établie à ce jour. D'après Martell et Discal le modèle qui représente le groupement de 3 molécules organique avec une molécule d'aluminium selon la réaction [2].



I.6 Principales lois régissant l'électrocoagulation

I.6. 1 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 pendant une durée d'électrolyse.

A un courant I, en utilisant la loi de Faraday :

$$m = \frac{I.E.M}{n.F} \dots\dots\dots \text{I.7}$$

Avec :

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

I : intensité de courant imposé (A).

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

F : constante de Faraday ($96487 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$)

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

I.7 Paramètres influençant l'EC

Le pH

Le pH est un facteur important influençant la performance du processus d'électrocoagulation, le pH du milieu change pendant le processus, comme il était observé également par d'autres chercheurs, le changement dépend de type du matériel d'électrode et du pH initial [7].

La Conductivité

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé d'EC, si elle est trop faible, les résistances de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, par analogie avec les exploitations d'installation d'électrocoagulation d'effluents industriels, l'ajout de chlorure de sodium est utilisé pour accroître la conductivité de la solution. L'ajout d'un chlorure permet aussi d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'électrocoagulation [8].

La densité de courant

La densité de courant est un paramètre critique dans l'électrocoagulation, car c'est le seul paramètre qui peut être commandé directement. La densité du courant détermine directement le dosage de coagulant et le taux des bulles générées. [9]

Les densités de courant élevées sont désirables pour les processeurs de séparation impliquant des cellules de flottation ou larges bacs de lavage, alors que les densités de courant faible sont convenables pour l'EC. [10]

I. 8 Etudes faites sur l'EC

L'EC a largement été appliquée avec succès par différents chercheurs pour le traitement d'effluents de natures divers :

L'EC a été utilisée pour l'élimination des nitrates retrouvés dans les eaux de surfaces et le sol, surtout dans les zones où l'agriculture est la principale industrie, sachant qu'ils sont responsables d'un problème majeur qui est l'eutrophisation. [1]

Le traitement d'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage, caractérisée par une teneur élevée en matières en suspensions, une DCO supérieure à 500 mg /L, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg/l a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et 75% de DCO par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium [13].

Les rejets d'usine de pomme de terre très chargés en composés organiques incluant des carbohydrates, amidon, protéines, vitamines, pectines et sucres qui sont responsables de grande DCO, DBO et matières en suspension [14].

Des chercheurs turques ont réussi à réduire la lignine et le phénol des effluents de papeteries par EC. Ils ont prouvé que celle-ci pouvait être une alternative efficace pour le traitement de ce genre d'effluents [6].

L'élimination de la couleur et de la DCO dans les eaux usées des rejets de papeterie par l'électrocoagulation en utilisant deux types d'électrodes (acier et aluminium). Les auteurs sont arrivés à enregistrer des taux d'abattement de la couleur de 92% et 84 % pour l'électrode d'acier et d'aluminium respectivement et des taux d'abattement de la DCO de 95% et 89% pour les mêmes électrodes respectivement. [6]

Une élimination des manganèses à partir des solutions synthétiques par l'EC à électrodes d'aluminium en variant plusieurs paramètres (pH, densité de courant, temps d'électrolyse, conductivité et la concentration initiale de Mn^{2+}), il constata ensuite que la concentration du polluant diminue d'environ 99% de la concentration initiale à un pH optimal de 7, une densité de courant de 9.4 mA/cm² et une concentration initiale de Mn^{2+} de 25 mg/L [6].

Une étude comparative entre les électrodes d'aluminium et de fer dans le procédé d'EC de traitement des eaux de rinçage riche en phosphate et en zinc d'une usine de véhicules a été effectuée. Les conditions optimales pour atteindre les taux d'abattelements de 99.8% et 96.7%

de phosphate et du zinc respectivement étaient à pH 5, une densité de courant de 60A/m² et un temps de traitement de 25 min pour l'aluminium, tandis que pour le fer le pH était de 3, le temps de traitement était de 15 min pour une même densité de courant afin d'obtenir des abattements de 97,7% et 97,8% des phosphates et du zinc respectivement [6].

Le traitement d'une eau potable de la ville d'Anar (Iran), caractérisée par des teneurs élevées en calcium et une dureté totale, a permis d'atteindre 98,2% d'élimination de calcium et 97,4% de la dureté totale par l'électrocoagulation en utilisant des électrodes de fer. Ces résultats ont été obtenus à un pH de 10, une tension de 12V et un temps de traitement de 60 min. [6].

Rappelons que l'électrocoagulation peut être aussi combinée à d'autres procédés. En effet, une étude sur le traitement des effluents de papeterie et de cellulose a été entreprise en combinant l'électrocoagulation à électrodes de fer à un procédé photocatalytique (système YNV/TiO₂/H₂O₂), dans le but de réduire à la fois la DCO, la DBO et la turbidité. Les résultats enregistrés ont montré que l'EC a éliminé une grande partie des substances organiques principalement. Le procédé de la photocatalyse hétérogène à lequel est associé l'EC a transformé les polluants restants en substances plus simples et moins nocives. [6]

La qualité des résultats obtenus ont démontré le potentiel élevé des méthodes électrochimiques dans le traitement des effluents des usines de papier et cellulose.

Suite à cette étude bibliographique, il s'avère que l'application de l'EC a connu des domaines très divers, contribuant à l'élimination de plusieurs composés d'origines différentes mais qui s'unissent par leurs impacts négatifs sur l'environnement.

I.8.1 Principaux résultats obtenus pour le traitement d'effluents organiques

La littérature décrit un grand nombre de procédés de traitement par électrocoagulation comme nous l'avons signalé dans l'introduction générale alliant des montages différents des matériaux d'électrodes variées et de divers effluents traités.

Une efficacité d'abattement de DCO, DBO₅, MES et couleur allant de 60-90%, 61-99%, 71-99% et 95-100% respectivement pour différents effluents comme les effluents urbains, les effluents de teinturerie, de fabrication de papiers peints des eaux colorées de cartonnerie, de lavage de laine, de conserverie de légumes, de papeterie pour un temps de séjour de 2,5 min dans l'électrocoagulateur.

Le traitement de rejet urbain par électrocoagulation-flottation a permis d'avoir un abattement de 90% de MES, 80% de DBO5, 80% de DCO, 25% d'azote, 90% de phosphates, 80% de détergent.

La plupart des résultats confirment un abattement de plus de 80% de DCO, un bon traitement de matières organiques, inorganiques, les pathogènes, les matières en suspensions et la turbidité.

L'EC a largement été appliquée avec succès par différents chercheurs pour le traitement d'effluents de natures diverses, le tableau I-2 en donne quelques exemples significatifs. [11]

Tableau I -2 : les différents traitements en EC. [11]

Références	Composition	Rendement	Types de polluants	Electrodes
Gomes et al. (2007)	Eaux synthétiques contenant du chrome	78 à 99.6% d'abattement	Métaux lourds (As, Cr)	Al/Fe
Bejankiwar (2002)	Eaux usées de manufacture de cigarette, plus eaux domestique	56% d'abattement DCO, 84% DBO	DBO, DCO, MES	Fer
Pandit et al. (1992)	Eaux usées domestiques avec effluents industriels	79 à 56 mg/l de DBO finale 127 à 88mg/l de DCO finale	Turbidité, DCO, DBO, bactéries	Al/Al
Kobyia et al. (2003)	Effluents textiles	98% abattement de turbidité, 77% DCO	DCO, MES, COT, Turbidité	Fe et Al
Raju et al. (2008)	Effluent textile synthétique	99% d'abattement MES 62% de DCO 47% de TKN	DCO, DBO, MES, Chlorures, TNK, Dureté, Sulfate	Al et Fe

Canizarès et al. (2008)	Emulsions eau/huile (comparaison EC AL avec la coagulation chimique avec ajout de sels d'Al)	Même efficacité de CC et EC à la même évolution de pH.	DCO, potentiel zêta	Al
Droguì et al. (2007)	Effluent d'agro-industries	82 à 86% d'abattement de DCO	DCO, azote, germes pathogène, turbidité	Fe et Al
Daneshvar et al (2006)	Solution basique de colorant	20 à 100% d'abattement de couleur, 75 à 99% d'abattement DCO	DCO, couleur	Al, Acier inox
Arslan-Alaton, (2008)	Effluent réel réactif de bain	L'acier > Al, 99 à 100% d'abattement de la couleur, Al > acier pour DCO .L'acier consomme 9kWh/m ³ alors que Al en consomme 5kWh/m ³	DCO, couleur	Al, Acier inox
Irdemez et al. (2006)	Eaux usées phosphatées	100% d'abattement de phosphate avec l'Al et l'abattement diminue avec la concentration de phosphate dans le cas du fer	Phosphate	Al et Fe
Idbelkas et al. (2001)	Eaux usées chargées de phénol	Dégradation totale avec Pb/PbO ₂ et partielle avec Pt, abattement de phénol élevé aux potentiels élevés, l'augmentation de la concentration initiale réduit le taux l'abattement	Phénol	Dioxyde de plomb et de platine
Can et al. (2006)	Effluent textile	PAC plus efficace que alun en CEC, CEC donne 80% d'abattement DCO contre 23ù pour EC	DCO	Al
Szpyrkowicz et al (1995)	Effluent tannerie	Ti/Pt/Ir meilleur que Ti/Pt, Ti/Pt meilleur pour DCO, Ti/Pt résiste l'attaque de l'effluent	NH ₄ ⁺ , DCO	Ti/Pt et Ti/Pt/Ir

Zuo et al. (2008)	Eau de consommation	Fluorure réduit de 4-6mg/l à moins de 1mg/l	Fluorure	Al
Babu et al. (2007)	Effluent de tannerie	Abattement de toute la pollution proportionnel à la densité de courant I, abattement meilleur à de faibles débits	DCO, DBO, TDS et Cr (VI)	Fe anode Al cathode
Escobar et al. (2006)	Cuivre, plomb, cadmium dans l'eau et effluent simulé	Distance inter électrodes optimale=2cm pour le traitement du Cu et du Cd, abattement de Cu de 80%, 100%d'abattement du Pb et du Cd à pH 7 et plus	Cu, Pb, Cd	Lame d'acier
Mukhopadhyay et al. (2007)	Eau souterraine contaminée en Cr VI	Réduction chimique du Cr(VI) par le Fe(II) et réduction électrochimique du Cr(VI)	Cr VI	Fe
Heidman et al. (2007)	Solution aqueuse contenant du Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) et Cr (VI)	Réduction directe du Zn, Cu, Ni et Ag, puis précipitation en partie sous forme d'hydroxydes, puis coprecipitation avec Al(OH) ₃ , réduction directe à la cathode du Cr(VI), puis précipitation sous forme de Cr(OH) ₃	Zn(II), Cu (II), Ni(II), Ag(I) et Cr(VI)	Al
Golder et al. (2007)	Solution aqueuse de Cr (III)	Abattement important de Cr (III) de 1000 mg/ l à 2mg/l, phase de latence avant que le traitement ne démarre, PH élevé permet une Co-précipitation et une précipitation chimique, la boue coproduite est amorphe et doubler la densité de courant entraîne une augmentation de 18% de boue. Cr/ Fe= 3,5 à 4 pour la boue.	Cr(III)	Acier

Muruganathan et al. (2004)	Effluent de tannerie	MES, Cr (VI), Sulfures, éliminés à 95%, pathogènes éliminés à 99,97% EC, plus efficace sur la DCO, DBO que CC et la sédimentation.	MES, Cr, Sulfures, pathogènes, DCO, DBO	Al, Fe, Ir/Ta/Ru
Heidmann et al. (2007)	Eaux usées enrichies en chrome (VI)	Cr (VI) réduit directement à la cathode à i élevée, Cr (VI) réduit par Fe (II) aux faibles i, i inférieur à 0,1 A rend l'EC efficace et moins chère.	Cr(VI)	Fe
Gao et al. (2005)	Eaux usées contenant du Cr (VI)	Réduction de Cr (VI) en Cr (III) par le Fe (II), Fe (III) formé et Al (III) forment de bons coagulants	Cr(VI)	Hybride Fe-Al
Golder et al. (2007)	Solution aqueuse de Cr (III)	Le montage bipolaire donne un abattement de Cr de 100% contre 81,5% en mono polaire au bout de 50 min d'EC, en présence de 1820 mg/l de Cl-, l'abattement décroît de 3,6%, le rendement de 64,5 et 91,7% respectifs pour les cellules bi et mono polaires	Cr(III)	Fe
Vlyssides et al. (1997)	Liqueur de tannerie	Résultat au traitement respectif de 30 min et d'une heure : abattement de DCO de 52-83%, DBO de 35-66%, MES de 8,9- 26%, phénol de 95,6- 99,4%, sulfure-ammoniac-Cr soluble de 100% dans les deux cas, 4,8KWh/Kg et 200 KWh/ Kg de DCO traités respectivement	DCO, DBO, MES, Composés phénoliques totaux, ammoniac, sulfures, Cr soluble	Ti/Pt anode et cathode en acier inox
Muthukumar et al. (2007)	CI acide orange 10	60% d'abattement de Cl acide orange par EC.	Cl acide orange 10	Fe

Zaroual et al. (2006)	Effluent basique textile	Abatement 100% de couleur et 84% de DCO. La potentiel zêta montre que $Fe(OH)_2$ est responsable de la coagulation.	Couleur DCO	Fe
Daneshvar et al. (2003)	Couleur orange (II) en solution aqueuse	Plus de 84% d'élimination de DCO, plus de 98% d'élimination de couleur. Densité de courant optimal de 34,6 A/m ²	Couleur orange (II) et DCO	Fe
Alinsafi et al. (2005)	Colorant réactif de textile et effluent textile	Efficacité d'EC influencée par le temps et i. Couleur éliminée à 90- 95% et DCO à 30- 36%.	DCO Couleur	Al
Golder et al. (2005)	Solution de bleu de méthylène et de l'éosine jaune	5 à 15min suffisantes à décolorer les deux effluents. Durant EC, on a 1,5 KWh/m ³ énergie, 0,22 à 0,3 Kg/m ³ de boue et 89 et 74% d'abattement de DCO pour méthylène et éosine respectivement	Couleur DCO Boue	Acier
Kobyas et al. (2006)	Solution aqueuse	15 min d'EC, 100 A/m ² , à PH initial de 3 donne 99,9% d'abattement de polluants on a 2Kg Al/Kg de colorant et 43 KWh/ Kg de colorant de consommée.	Couleur	Al
Un et al. (2009)	Eaux usées de raffinage d'huile végétale	98,9 % réduction de DCO en 90min à 35 mA/m ² avec une SEEC de 42 KWh/ Kg DCO traitée.	Emulsions huile/eau	Al
Nanseu-Njiki et al. (2009)	Solution synthétique d'Hg (II)	99,95% d'élimination de l'Hg à 9,33 et 15,55 F/m ³ pour l'Al et Fe respectivement.	Hg(II)	Al et Fe
Biswas et Lazarescu (1991)	Emulsions d'industrie pétrolière, d'automobile, d'industries chimiques et de fabriques de machine	Abatement de l'huile atteignant 96% en utilisant 150 mg/l de $FeSO_4$ et 16min d'EC à 100 V	Emulsions huile/eau	Fe en EC combine avec CC utilisant le $FeSO_4$

Chou et al. (2009)	Traitement de solution contenant des ions indium (III)	Abattement de 78,3 ; 70,1 ; 31,4 ; 15,8% de l'indium avec les électrodes respectives de Fe/Al, Al/Fe, Fe/Fe et Al/Al, ajout de NaCl à 100mg/l et 20V sont des optima pour l'énergie ; la cinétique de décroissance de l'In au cours du traitement suit un pseudo loi du second ordre.	Indium (III)	Al et Fe
Raghu et al. (2007)	Effluent textile	Abattement maximal de DCO de 81,3% avec 300mg/l de coagulant en CC, abattement maximal de DCO de 92,3% à 0,25A/dm ² avec une énergie consommée de 19,29 KWh/Kg de DCO en EC avec des électrode de fer, 80% d'abattement à 1A/dm ² et une énergie consommée de 130KWh avec des électrodes d'aluminium.	DCO	CC coagulant polymérique, EC Al et EC Fe

I.9 Avantages et inconvénient du procédé d'EC

De nombreux auteurs ont comparé le procédé d'EC avec le procédé physico-chimique classique réalisé par l'addition de coagulants chimiques tels que le sulfate d'aluminium et Le chlorure ferrique.

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.
2. Meilleure efficacité du procédé d'électrocoagulation pour des polluants colloïdaux très fins par rapport à 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. des chercheurs 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. L'importance du champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries en utilisant des électrodes en titane.

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. Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisée et à la faible salinité du milieu.

7. 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. 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.

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. 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. [2]

Partie

Expérimentale

Chapitre II

Matériels et méthodes

Dans notre travail nous avons utilisé le procédé de l'électrocoagulation comme système de traitement d'eau pollué par deux colorants textiles à savoir (le vert de méthyle et le jaune basique 28).

Ce système présente l'avantage d'une utilisation très réduite des produits chimiques qui sont souvent compliqués à maintenir, notamment dans certains pays en voie de développement ou non développés. Ce procédé nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile, un temps de traitement réduit, produit une faible quantité de boues (flocs) comparée aux traitements chimiques.

L'objectif de ce travail est de traiter des solutions synthétiques de ces colorants au laboratoire par électrocoagulation en utilisant une anode en aluminium et une cathode en acier inoxydable.

La première partie de ce travail consiste à étudier un système simple ou nous avons étudié les paramètres influençant l'élimination de chaque colorant seul dans le système mono-composé, à savoir le pH, la densité de courant et la concentration initiale en colorant.

La méthodologie de travail adoptée consiste à examiner l'influence d'un paramètre en fixant les autres et en faisant à chaque fois varier le paramètre à étudier, aussi à présenter les résultats avec leur interprétation.

Dans la deuxième partie qui concerne le système binaire nous avons étudié l'effet de la présence des deux colorants en même temps en fixant les paramètres qui ont donné une bonne élimination dans le système simple.

II.1 Choix des polluants organiques

Dans notre étude deux colorants basiques ont été choisis comme polluants organique. Il s'agit du jaune basique 28 (JB28) et du Vert de méthyle (VM).

Les principales caractéristiques de ces deux colorants ainsi que leurs formules semi – développées sont regroupées dans le tableau II.1 :

Tableau II.1 : Propriétés des colorants utilisés.

Code	Structure moléculaire	λ_{\max} (nm)	Masse molaire (g.mol ⁻¹)
Jaune Basique 28 (JB28)		460	433
Vert de méthyle (VM)		632,5	472,52

Toutes les solutions de JB28 et VM sont obtenues par dilutions à partir de solutions mères à 1g. L⁻¹. Cette concentration est inférieure aux limites de solubilités généralement admises pour les deux colorants. Ces solutions mères sont préparées, par dissolution sous agitation magnétique de 1g de soluté dans 1L d'eau distillée, stockées dans des bouteilles sombres.

II 2 Dispositif expérimental

Le dispositif a été monté au laboratoire (figure II.1). Il est constitué de :

1. Un réacteur en verre de capacité de 1L et un agitateur magnétique et un barreau de 2cm de longueur.
2. Un générateur de courant électrique.
3. Un multimètre digital pour mesurer l'intensité de courant électrique.
4. Des fils électrique (connexion entre générateur, multimètre et électrodes).

5. Des électrodes : l'anode est en aluminium et la cathode en acier inoxydable, les électrodes sont placées parallèlement l'une par rapport à l'autre séparées par une distance de 1,5 cm qui reste constante pour tous les essais et seules les parties externes sont connectées, les dimensions des électrodes sont : 80 x 40 x 1 mm, la surface active des électrodes est de 32 cm², cette surface immergée est constante pour toute les essais.
6. pH mètre de type MV 870 digital -pH- MESSGERAT.
7. Des filtres en plastique avec des membranes en silicone de diamètre de 2 µm.



Figure II.1 : dispositif expérimental de l'électrocoagulation.

II. 2. 1 Matériaux d'électrodes

Nous avons utilisé dans cette étude deux types d'électrodes :

- électrode en acier inoxydable (cathode).
- électrode en aluminium dont la composition est de 99,5% d'Al et 0,5% d'alliage.

II. 2. 2 Préparation des électrodes

L'un des facteurs qui influent sur l'efficacité du procédé est la qualité de surface des électrodes. Donc, avant chaque essai, il faut les nettoyer afin d'éviter toutes sortes d'impuretés.

II.2.3 Protocole de Nettoyage des électrodes

- Polissage à l'aide d'un papier abrasif pour l'élimination de la couche de passivation après chaque essai.
- Rinçage abondant avec l'eau de robinet en suite avec l'eau distillée.
- Décapage avec une solution de NaOH (2N) pendant 5 minutes.
- Rinçage abondant avec l'eau de robinet ensuite avec l'eau distillée.
- Séchage dans l'étuve.

II.3 Réactifs utilisés

- La soude 0,1 N et l'acide sulfurique 0,1 N sont utilisés pour l'ajustement du pH.
- Une solution de soude 2N est utilisée pour le décapage des anodes en aluminium.

II.4 Méthodes d'analyses

Le réacteur est rempli avec 1 L de solution fille de concentration de 20 mg/L. La conductivité de la solution est ajustée par l'ajout de 1g de chlorure de sodium dans 1 L de solution, ce dernier est un sel présentant une faible toxicité à des concentrations modérées, un cout raisonnable, une conductivité et une solubilité élevée. L'ajout de chlorure de sodium est presque sans effet sur le pH initial de la solution. Le pH est ajusté à sa valeur initiale choisie par des solutions de la soude et de l'acide sulfurique 0,1 N.

Après avoir nettoyé les deux électrodes, l'anode est pesée, et puis les deux électrodes sont plongées dans le réacteur. Elles sont fixées l'un à côté de l'autre à une distance bien fixe pour tous les essais, et on garde toujours la même surface d'électrodes immergée pour tous les essais, ensuite elles sont reliées au générateur de courant à l'aide des fils électriques.

Une fois le courant est appliqué, l'agitateur est mis en marche à une vitesse moyenne et constante. Chaque 5 min. on prélève un échantillon pendant les 20 premières minutes après on opère des prélèvements après chaque 20 min.

On laisse l'échantillon prélevé se décanter dans des béchers de 20 ml pendant 20 min, ensuite on filtre la partie supérieure de l'échantillon avec des filtres à membrane dans des tubes à essais.

Pour l'anode on doit la sécher et la peser après chaque traitement.

La détermination de la concentration des colorants est effectuée par dosage spectrophotométrique dans le domaine du visible aux longueurs d'ondes appropriées λ_{max} .

A l'aide du spectrophotomètre UV-Visible, on mesure l'absorbance entre 400 et 800 nm. Sur la base des maxima d'absorption de chaque colorant, nous avons procédé à l'établissement des courbes d'étalonnage à fin de pouvoir estimer leurs concentrations en solution traitée.

Le maximum d'absorbance pour les deux colorants sont $\lambda_{max}(VM) = 632,5 \text{ nm}$ et $\lambda_{max}(JB28) = 460 \text{ nm}$.

Dans le cas des mélanges binaires (JB28, VM), les concentrations résiduelles sont corrigées en utilisant les équations suivantes [15] :

$$C_{JB28} = \frac{\epsilon_{VM2} \cdot d\lambda_1 - \epsilon_{VM1} \cdot d\lambda_2}{\epsilon_{JB1} \cdot \epsilon_{VM2} - \epsilon_{JB2} \cdot \epsilon_{VM1}} \dots\dots\dots \text{II.1}$$

$$C_{JB28} = \frac{\epsilon_{JB1} \cdot d\lambda_2 - \epsilon_{JB2} \cdot d\lambda_1}{\epsilon_{JB1} \cdot \epsilon_{VM2} - \epsilon_{JB2} \cdot \epsilon_{VM1}} \dots\dots\dots \text{II.2}$$

Ou :

$(\epsilon_{VM1}, \epsilon_{JB1})$ et $(\epsilon_{VM2}, \epsilon_{JB28})$ représentent respectivement les constantes d'absorptivité de JB28 ($\lambda_{max} = 460 \text{ nm}$) et du VM ($\lambda_{max} = 632,5 \text{ nm}$).

Les différentes valeurs des constantes d'absorptivité sont regroupées dans le tableau II.1 suivant :

Tableau II.2 : Constantes d'absorptivité ϵ des deux colorants utilisés.

Colorants	$\lambda_{\max} = 460 \text{ nm}$	$\lambda_{\max} = 632,5 \text{ nm}$
Jaune basique 28	0,0433	0,0004
Vert de Méthyle	0,0014	0,0575

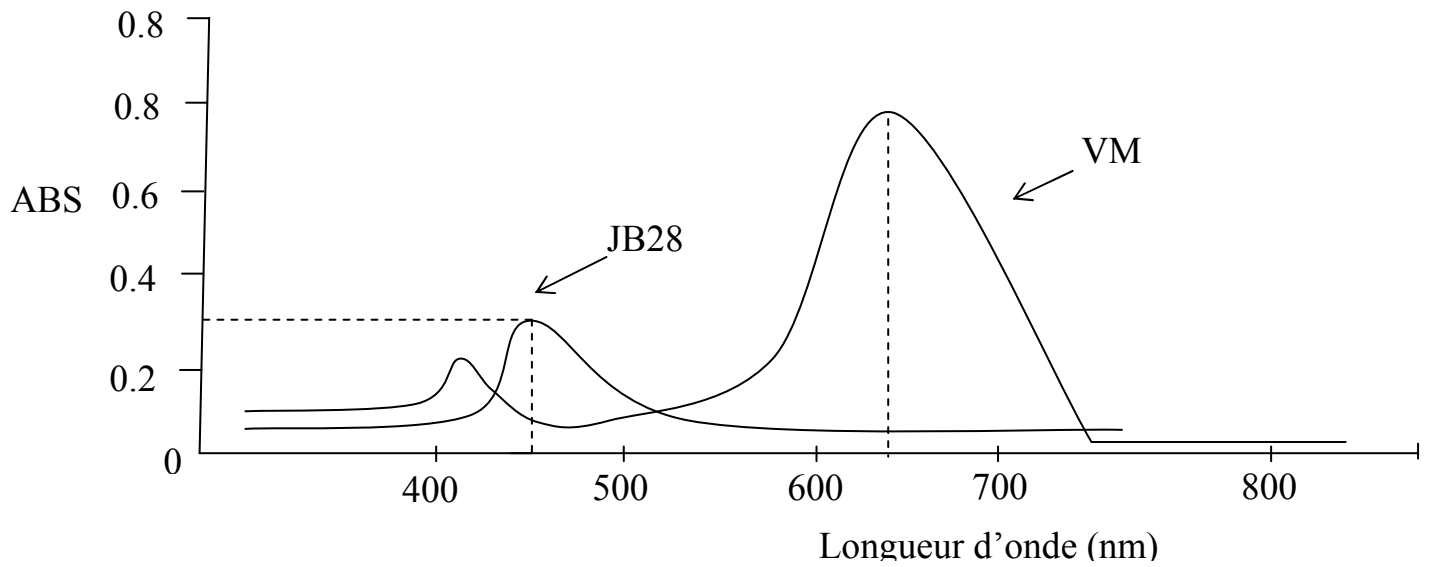
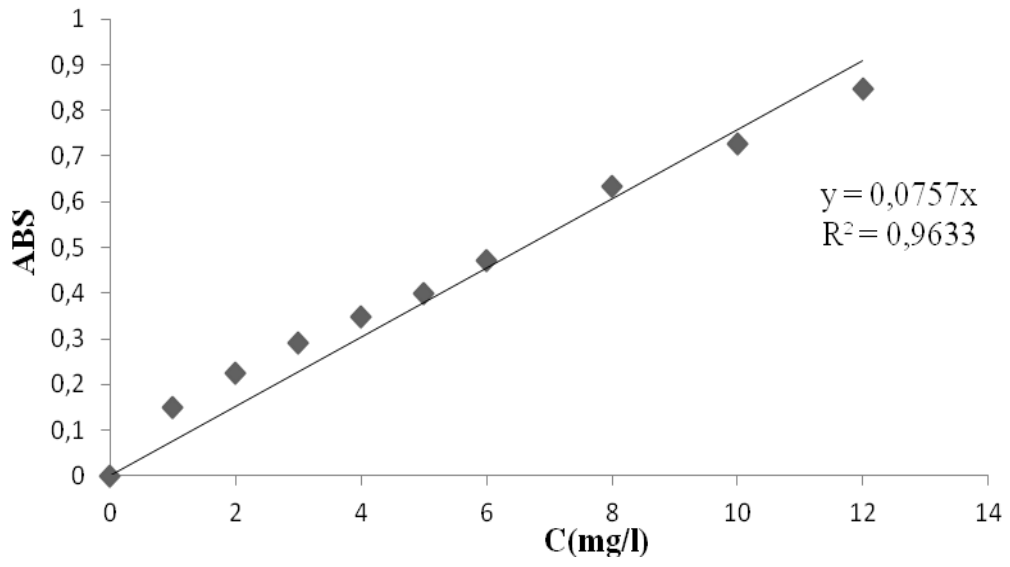
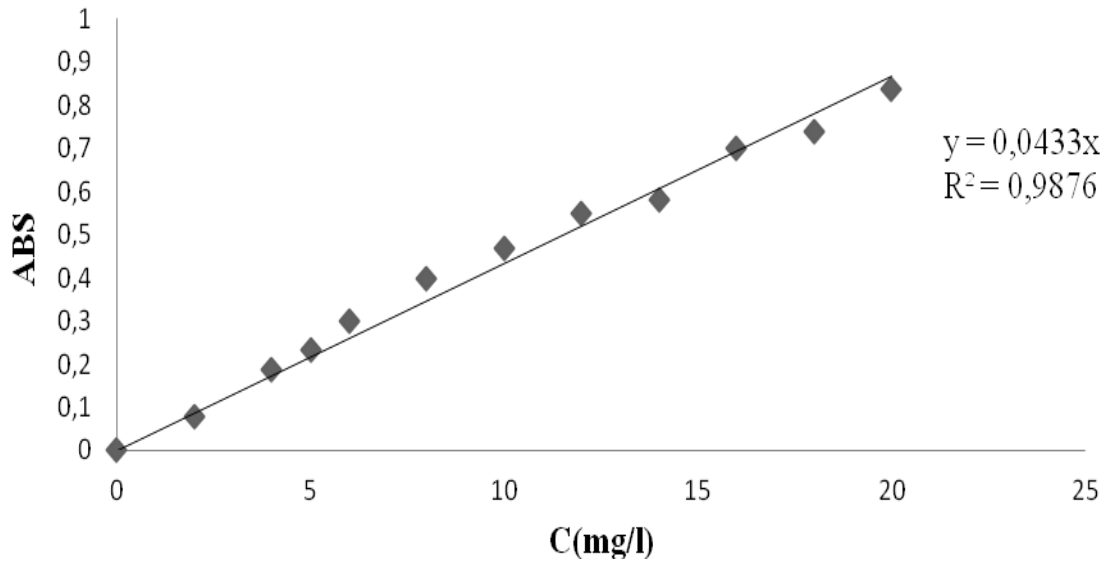


Figure II. 2 : spectres d'absorption dans le visible des colorants utilisés.

(A)



(B)



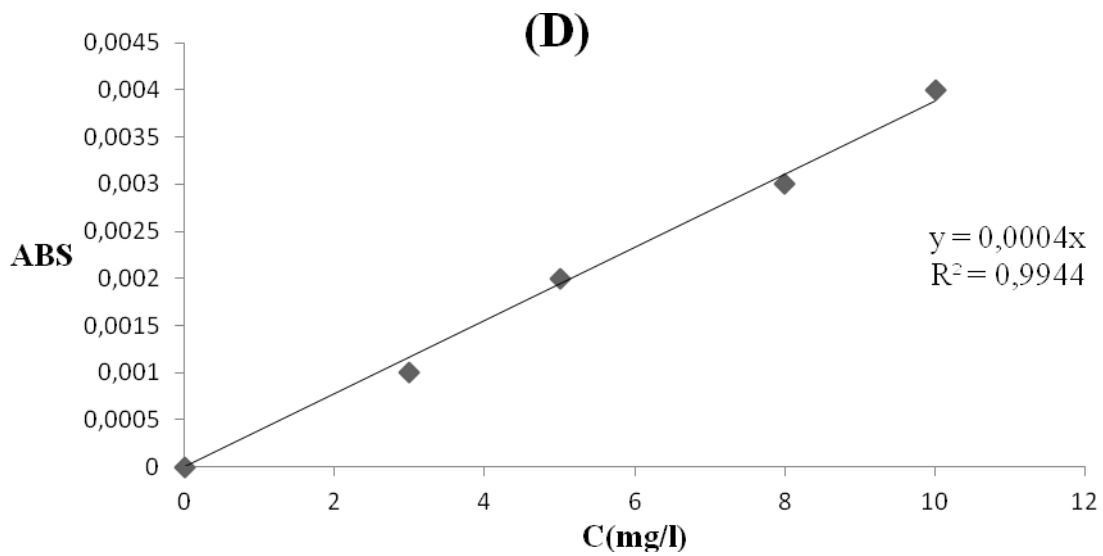
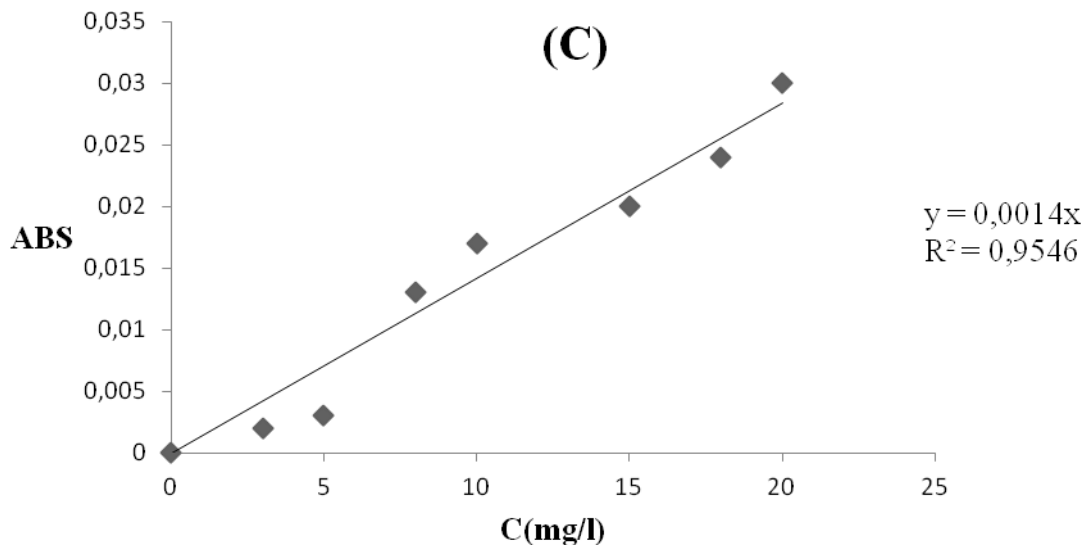


Figure II.3 : Courbe d'étalonnage des colorants utilisés :
 (A) : VM à $\lambda_{\max} = 632,5 \text{ nm}$; (B) : JB28 à $\lambda_{\max} = 460 \text{ nm}$;
 (C) : VM à $\lambda_{\max} = 460 \text{ nm}$ et (D) : JB28 à λ_{\max}

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Effet de l'intensité de courant

L'intensité du courant est considérée comme un paramètre clé dans l'électrocoagulation. Le courant imposé pendant le traitement joue un rôle déterminant pour la cinétique d'abattement du polluant et le temps du traitement. Il est responsable de la vitesse des réactions qui se déroulent au niveau des électrodes.

Lors de l'étude de ce paramètre, nous avons effectué une série d'essais en appliquant les intensités de courant suivantes : 100 mA, 200 mA, 600 mA, 800 mA et 1000 mA. Les autres conditions opératoires ont été maintenues constantes. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure III.1

On remarque que pour une intensité du courant appliquée de 100 mA et 200 mA l'abattement est faible, alors que pour les autres intensités (600 mA, 800 mA et 1000 mA), l'élimination de VM est plus importante avec une cinétique plus rapide.

Dans nos conditions opératoires, l'intérêt s'est porté sur l'intensité de courant appliquée de $i=600\text{mA}$ qui impose une cinétique d'abattement de colorant plus rapide dans notre réacteur. En effet, à titre de comparaison, au bout de 80 min l'abattement de VM est en dessous de 15mg/L pour les intensités de courant de 100 mA et 200 mA et au bout 20 minutes, l'abattement de VM est en dessous de 15mg/L pour les intensités de courants 600 mA, 800 mA et 1000 mA et après 80 minutes de traitement la courbe présente un palier avec une élimination importante du polluant, alors pour les intensités de courant de 100 mA et 200 mA, les 15 mg /L de polluant ne sont atteintes qu'au bout de 80 minutes d'électrolyse. Etant donné que la quantité du coagulant est proportionnelle à l'intensité du courant appliqué selon la loi de Faraday, cela peut être expliqué par le fait que la quantité d'espèces coagulantes produites est insuffisante pour l'adsorption de colorant présents.

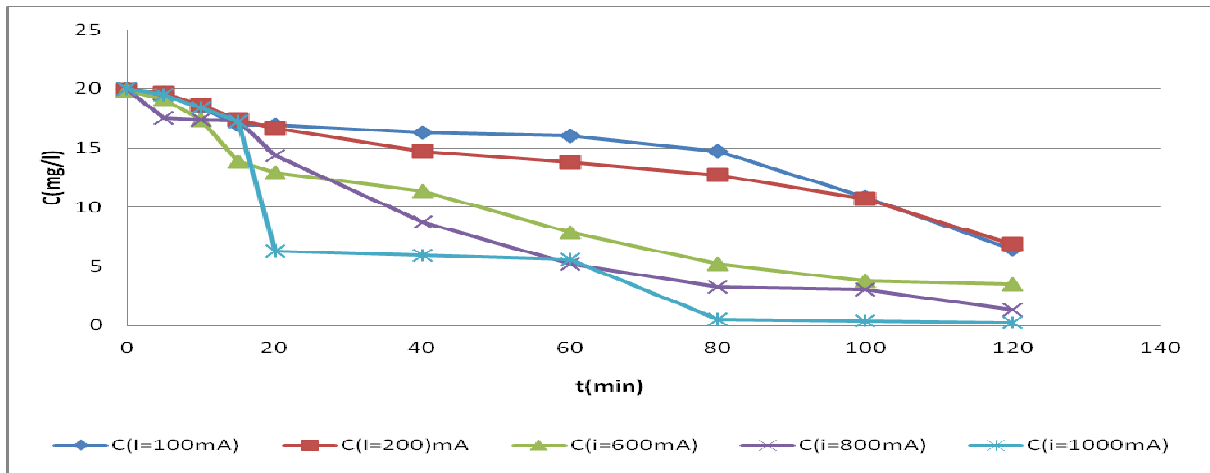


Figure III.1 : effet de l'intensité de courant sur l'élimination du colorant VM.

$[VM]_0 = 20 \text{ mg/L}$, pH initial = 6, $[NaCl] = 1 \text{ g/L}$.

III.2 Evolution du pH en fonction du temps pour chaque intensité de courant

Le graphe III.2 donne l'évolution du pH de la solution de VM avec une concentration initiale de 20 mg/L et un pH initial de 6. Les résultats obtenus indiquent une augmentation perceptible du pH initial, et une stabilité après 100 min de traitement pour toutes les intensités de courant pour atteindre un pH=8 pour $i=100 \text{ mA}$ et 200 mA et un pH de 10 pour $i=600 \text{ mA}$ et $i=800 \text{ mA}$ et un pH de 11 pour $i=1000 \text{ mA}$.

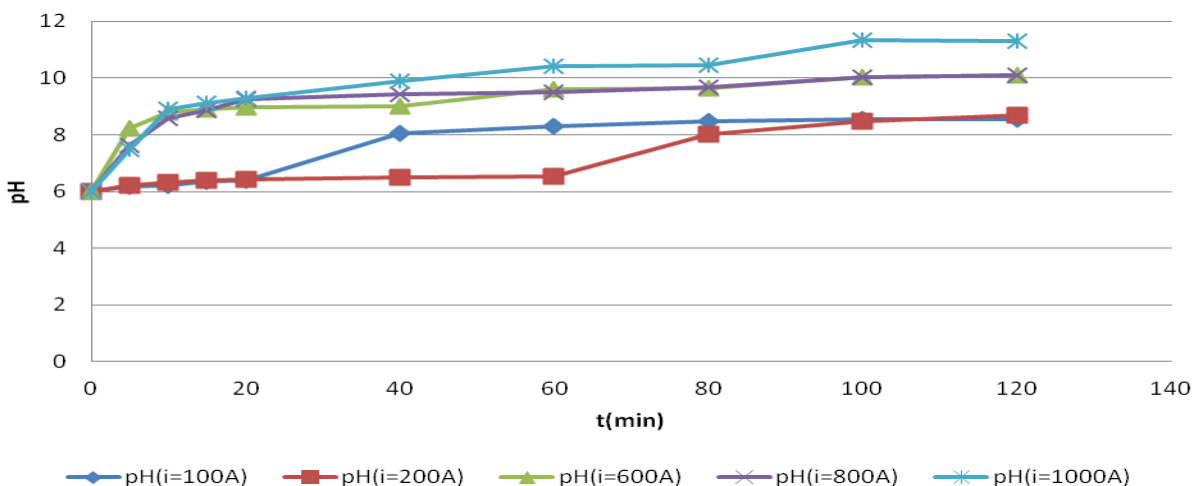


Figure III.2 : variation du pH en fonction du temps pour chaque intensité de courant.

$[VM]_0 = 20 \text{ mg/L}$, pH initial = 6, $[NaCl] = 1 \text{ g/L}$.

III.3 Effet du pH initial de la solution

Pour étudier l'effet du pH initial sur la cinétique d'élimination des deux colorants le VM et le JB28, nous avons effectué une série d'essais avec trois valeurs de pH initial à savoir : 3, 6 et 9. Les résultats sont présentés sur les figures III.3.1 et III.3.2.

A la lecture des deux figures III.3.1 et III.3.2, les résultats obtenus montrent que le pH a une influence non négligeable sur la cinétique d'élimination du polluant. En effet, le processus de d'électrocoagulation est plus significatif à pH=9 avec une cinétique très rapide comparée à celles obtenues pour les autres pH. L'ordre de l'efficacité de traitement est dans cet ordre $pH_0(3) < pH_0(6) < pH_0(9)$.

Selon Mameri et al , le procédé d'électrocoagulation dépend fortement du pH de la solution, il affecte la spéciation de l'aluminium qui a une influence significative sur le mécanisme de décoloration [1].

Il est considéré comme un facteur critique pour la formation d'hydroxyde amphotère: $Al(OH)_3$ qui est responsable de la formation des floes.

En effet, les espèces chimiques dominantes dans la solution diffèrent selon le pH, Al^{3+} et $Al(OH)^{2+}$ sont dominants à pH 2-3 ce qui explique la faible efficacité obtenue à pH = 3. Quand le pH = 6 et 9, les ions Al^{3+} et OH^- réagissent pour former des espèces monomérique comme $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{2+}$ et des espèces polymérique telles que $Al_6(OH)_{17}^{4+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ etc. Qui se transformant au bout du compte en un précipité amorphe $Al(OH)_{3(s)}$ suivant des cinétiques de polymérisation précipitation complexes.

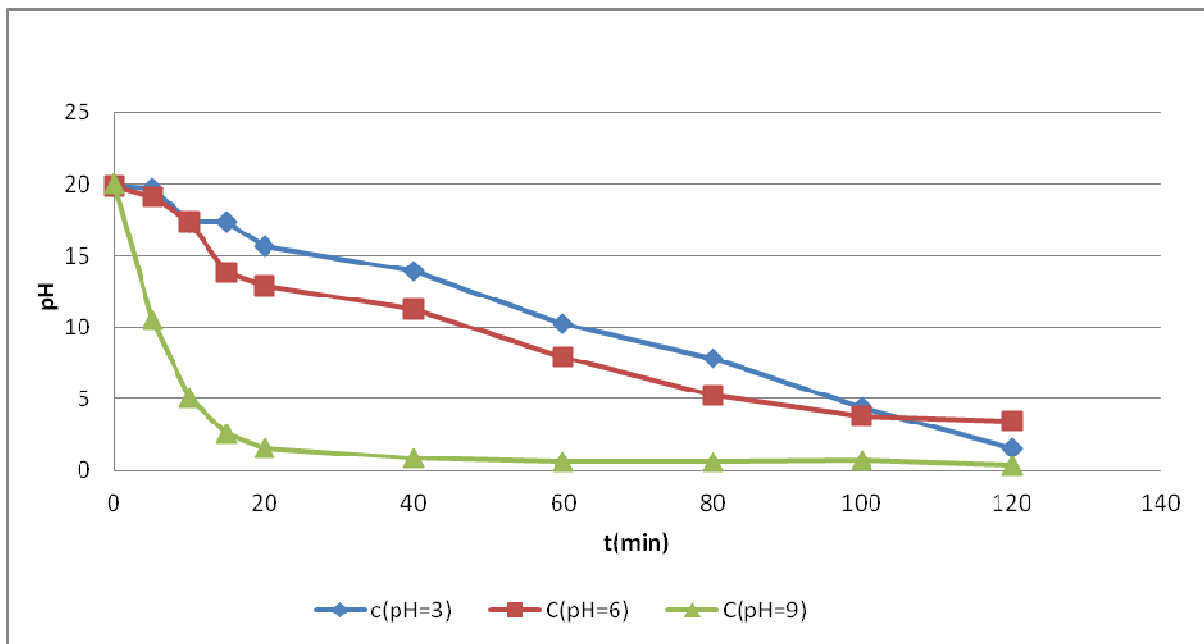


Figure III.3.1 : influence du $pH_{initial}$ sur l'efficacité de décoloration du vert de méthyle

$I=600mA$ et $[VM]_0=20mg/L$

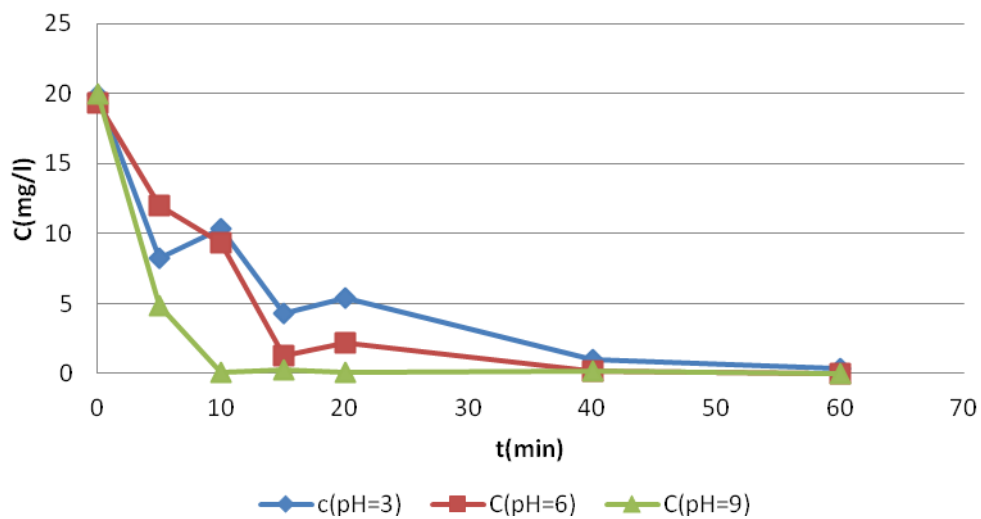


Figure III.3.2 : influence du $pH_{initial}$ sur l'efficacité de décoloration de jaune basique 28

$I=600mA$ et $[JB28]_0=20mg/L$.

III.4 Effet de la concentration initiale

L'objet de ces essais, est d'étudier l'influence de la concentration initiale des deux colorants le VM et le JB28 sur leur élimination par électrocoagulation.

Pour ce faire, tous les autres paramètres, autre que la concentration initiale, ont été fixés, à savoir : l'intensité de courant de 600 mA, la teneur en NaCl est de 1g/L, le pH fixé à 6, alors que nous faisons varier la concentration initiale des colorants de 5 à 20 mg/L.

Le suivi de l'évolution de la concentration des colorants en fonction du temps d'électrocoagulation pour les différentes concentrations initiales est représenté sur les figures III 4.1 et III 4.2.

Les différentes concentrations en colorants donnent des cinétiques qui évoluent de manières assez semblables. L'allure de ces courbes est similaire pour les différentes teneurs en colorants. La cinétique d'abattement est d'autant plus importante que la concentration initiale est faible. Quoique le traitement des solutions de plus en plus chargées nécessite plus de temps réactionnel pour atteindre de faibles concentrations pour les deux colorants, des concentrations proches de 0 mg/l sont obtenues quel que soit la teneur initiale expérimentée.

On peut donc en déduire que plus la concentration initiale est petite plus l'efficacité de décoloration est meilleure.

De même, il est observé dans notre cas, une réduction rapide de JB28 au début de l'électrolyse. En effet, au bout de 5 minutes nous avons atteint une valeur inférieure à 5 mg/L et ceci pour les concentrations 15 mg/L et 10 mg/L et au bout de 15 minutes pour la concentration de 20 mg /L c'est-à-dire que le traitement d'électrocoagulation s'avère très efficace que ce soit pour les faibles ou les fortes concentrations.

Et pour le colorant VM c'est au bout de 80 minutes que nous avons atteint une concentration de 5 mg/l pour les concentrations en colorant de 20 mg/L et 15 mg/L.

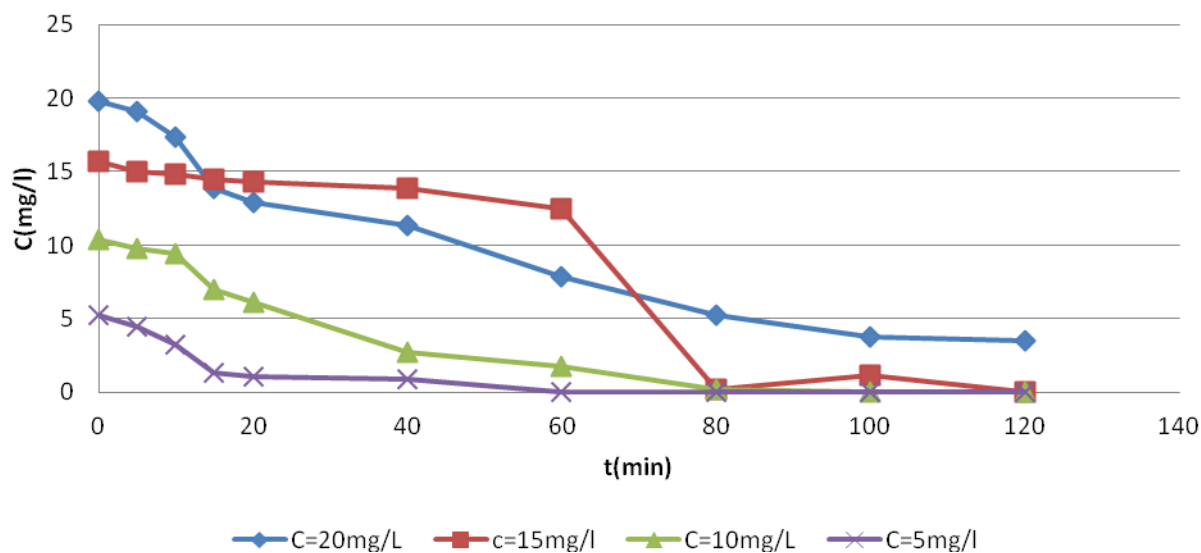


Figure III 4.1 : effet de la concentration initiale sur l'efficacité de la décoloration de VM
 $I=600\text{mA}$, $[\text{NaCl}]=1\text{g/l}$ et $\text{pH}=6$.

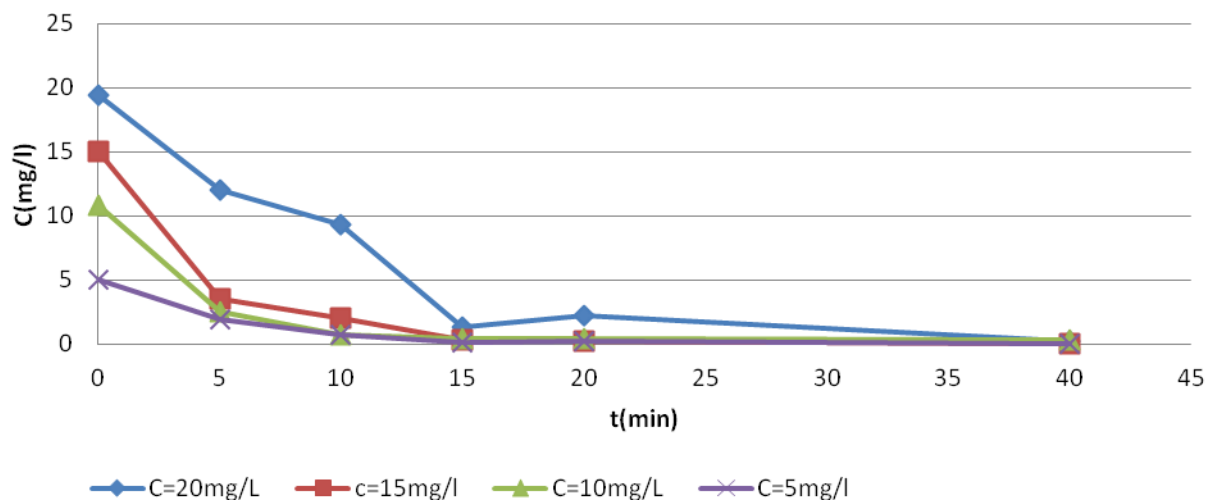


Figure III.4.2 : effet de la concentration initiale sur l'efficacité de la décoloration de JB28
 $I=600\text{mA}$, $[\text{NaCl}]=1\text{g/l}$ et $\text{pH}=6$.

III.5 Teneur d'aluminium libéré

Lors de l'électrocoagulation, il y'a dissolution électrochimique du métal d'anode pour former Al^{3+} en solution. En plus de cette dissolution électrochimique, le métal se dissout naturellement par oxydation dans la solution à traiter. Cependant, la loi de Faraday permet de quantifier la masse théorique d'aluminium libéré par le passage de courant entre les électrodes.

Les mesures de la masse expérimentale de l'anode en aluminium avant et après chaque traitement pour différentes intensités de courant permet la détermination de m_{exp} ou :

$$m_{exp} = m_f - m_i$$

D'après les résultats obtenus on remarque que plus l'intensité de courant augmente plus la masse de l'anode dissoute augmente et mieux est l'élimination du colorant et que la quantité d'aluminium mise en solution par électrocoagulation semble être supérieure à celle estimée à l'aide de la loi de Faraday.

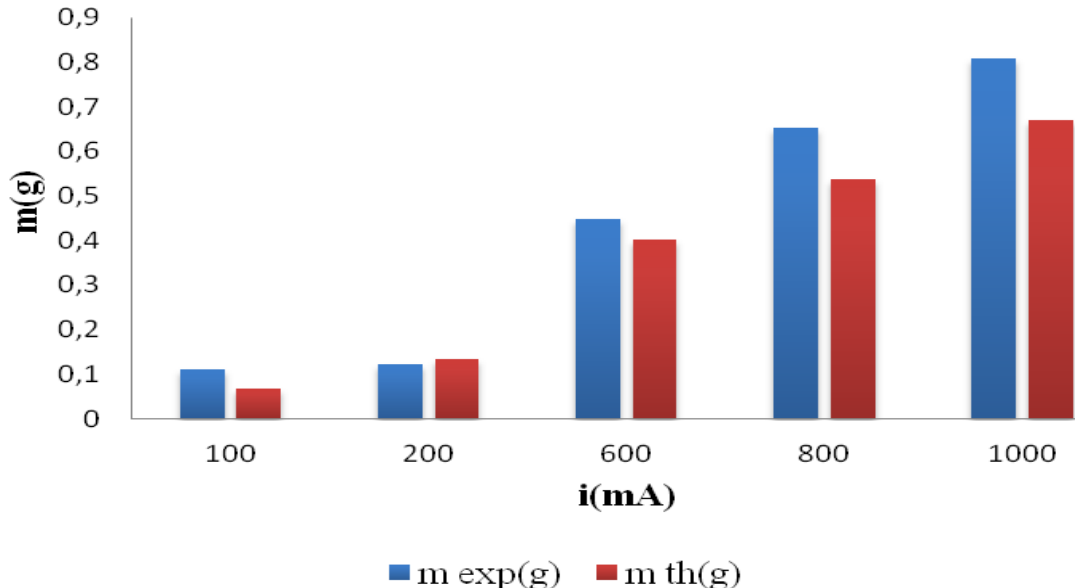


Figure III.5 : effet de l'intensité de courant sur la teneur en aluminium libéré.

III.6 Elimination VM et de JB28 dans le mélange binaire

Dans la pratique, il existe plusieurs situations où il les rejets contiennent les deux colorants (le vert de méthyle et le jaune basique 28) à la fois. et pour cela on a étudié l'effet de la présence de chaque colorant sur l'élimination de l'autre. Ceci a permis essentiellement de démontrer que le coagulant généré par l'électrocoagulation de l'anode de l'aluminium est capable d'éliminer simultanément les deux colorants.

III.6.1 Effet de la présence du JB28 sur l'élimination de VM ($r=VM/JB28$)

A travers les résultats obtenus nous pouvons remarquer que quel que soit le rapport étudié ($VM/JB28$), nous avons assisté aux mêmes phénomènes obtenus en système simple en termes de cinétique. Par ailleurs, nous avons montré également que l'ajout de JB28 affecte l'élimination de VM par effet positif en favorisant l'élimination. Cet effet peut être expliqué par un phénomène d'adsorption compétitive par effet synergique.

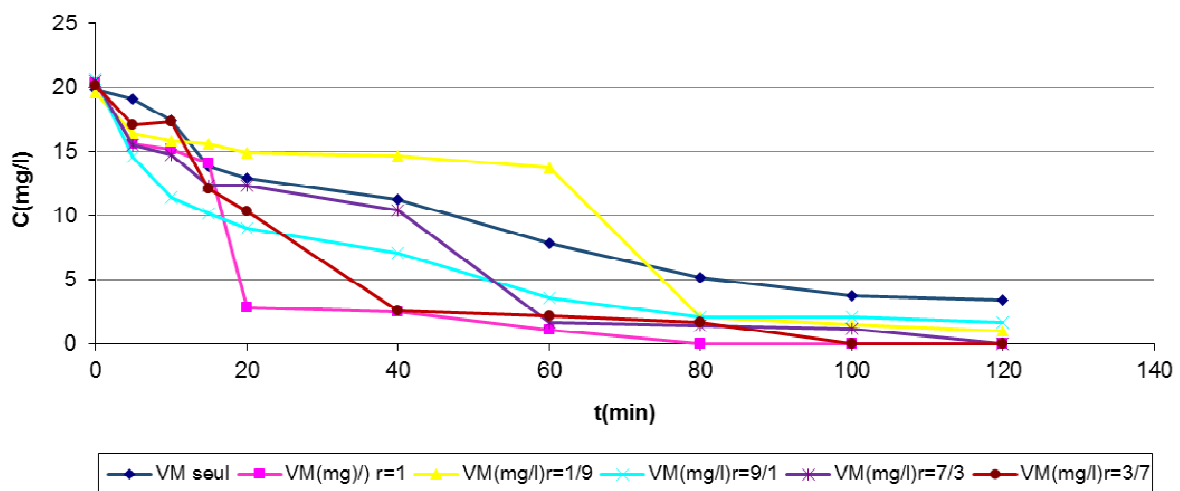


Figure III.6.1 : effet de la présence de JB28 sur l'élimination de VM

$I=600\text{mA}$, $\text{pH initial}=6$, $[VM]_0=20\text{mg/L}$.

III.6.2 Effet de la présence de VM sur l'élimination de JB28 ($r=JB28/VM$)

Dans le but d'étudier l'effet de la présence de VM sur l'élimination de JB28, nous avons réalisé des tests d'électrocoagulation à différentes concentrations. Les résultats obtenus montrent de façon claire que l'élimination de JB28 est fortement influencée par la présence de VM. A cet égard, on assiste à un phénomène d'adsorption par effet antagoniste.

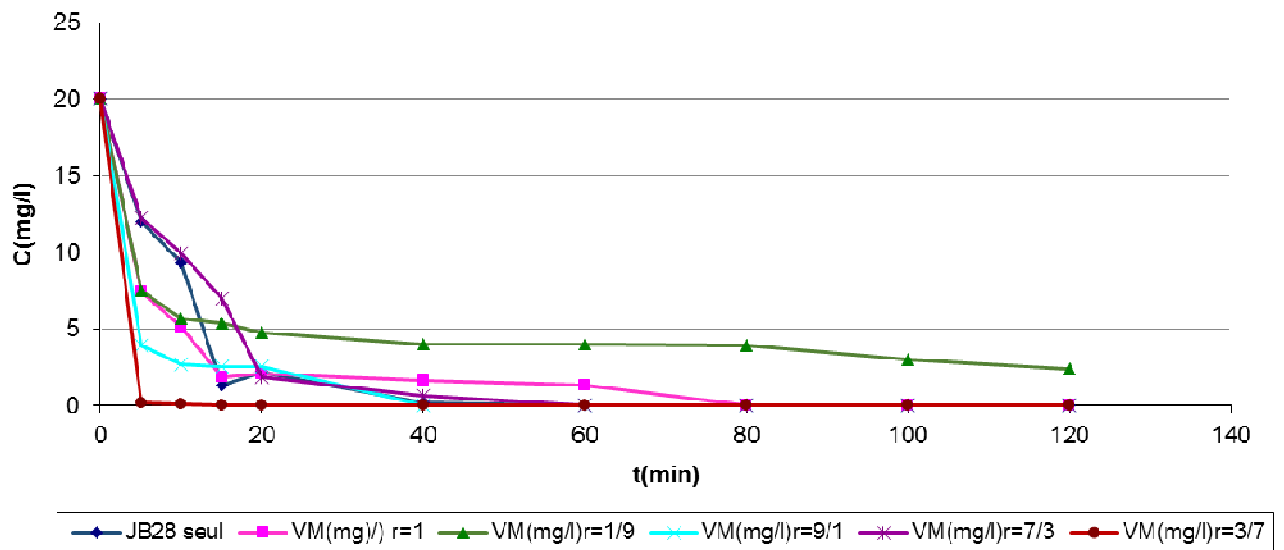


Figure III.6.2 : effet de la présence de VM sur l'élimination de JB28

$I = 600\text{mA}$, $\text{pH initial} = 6$, $[JB28]_0 = 20\text{mg/L}$.

Conclusion générale

Ce travail a pour objectif principal d'étudier l'efficacité d'un réacteur d'électrocoagulation muni de deux électrodes (anode : acier inoxydable, cathode : aluminium) pour l'élimination de deux polluants organiques qui sont des colorants cationiques : le jaune basique 28 et le vert de méthyle.

Dans la première partie de la présente étude, nous avons appliqué le procédé d'électrocoagulation pour le traitement de solutions synthétiques des deux colorants VM et le JB28 de façon séparée.

Au cours de cette étape, nous avons étudié l'influence de différents paramètres sur le procédé de décoloration des solutions par traitement d'électrocoagulation dans le système mono-composé, nous avons déduit que les paramètres tels que l'intensité de courant, le pH initial de la solution et la concentration initiale en colorants influencent l'efficacité du traitement

Nous pouvons aussi conclure que :

L'utilisation des anodes en aluminium et une intensité de courant modérée sont bénéfique puisque on arrive à éliminer presque toute la quantité de colorant et plus l'intensité de courant est importante plus le temps nécessaire pour atteindre de faible concentrations en colorants est faible. Les intensités de courant élevées provoquent une dissolution anodique importante ce qui nécessite une consommation élevée de l'énergie électrique, il serait donc intéressant de travailler à des intensités de courant modérées.

Une augmentation de pH est notée lors de l'augmentation de l'intensité de courant ce qui est expliqué par l'augmentation de la libération des ions OH^- due à la réduction de l'eau.

Pour l'étude de l'effet de pH initial, on conclut que le meilleur pH pour une élimination efficace de VM et JB28 est le $\text{pH}=9$.

L'étude de l'effet de la concentration initiale en colorant nous a permis de conclure que l'électrocoagulation est un procédé beaucoup plus efficace pour les faibles concentrations en polluants organiques.

Après optimisation de ces paramètres, nous avons évalué l'efficacité du procédé pour l'élimination des deux colorants dans le mélange binaire et on a conclu que ce procédé est efficace pour l'élimination simultanée des deux colorants.

Cette étude a principalement permis de mettre en évidence l'effet de la compétition (par synergie ou par antagonisme) lors du traitement par EC d'un mélange binaire VM et JB28.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LEMLIKCHI WAHIBA, élimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de Co-précipitation, Thèse de doctorat, UMMTO, 2012.
- [2] Mounir BENNAJAH, Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift, Thèse de doctorat, 2007.
- [3] Hamma Samia, Kebti Nadja ; électrocoagulation de l'eau du barrage en continu assisté par un champ magnétique, Projet de fin d'étude , USD Blida, 2006-2007.
- [4] Jalila BENSaid, contribution a la pollution des eaux usées par électrocoagulation et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium. Thèse doctorat, université de Rabat 2009.
- [5] SALIM ZODI, Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par Électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation : application à l'industrie textile et papetière, Thèse de doctorat, université de Lorraine, 2012.
- [6] Annane Ouardia, Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire, Mémoire de magister, UMMTO, 2007-2008.
- [7] Koby M., Taner O.C, Bayramoglu M. (2003), " Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes". Journal of Hazardous Materials B100,163-178.367.
- [8] Feuillade, G. ; Gueraud, S. ; Brizard, Y. ; Lahitte, C. (2001) « électrocoagulation et la production d'eau potable : faisabilité, intérêts et performances » ,4^{ème} congrès international GRUTEE 22-23 novembre 2001 (Limoges, France).
- [9] P.K.Holt, G.W .Barton , C.A.Mitchell (2005) , "The future for electrocoagulation as localized water treatment technology". chemosphere (59) ,355-367.
- [10] Holt ,P,K. : Barton ,G,W ;Wark ,M ;Mitchell, C.A.(2002) . " Electrocoagulation as a wastewater treatment». The third Annual Australian Environmental Engineering Research Event.Castlemaine, Victoria.
- [11] Inoussa Zongo, étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2009.

[12] Holt, P. K., Barton, G. W., Wark, M. and Mitchell, C. A. (2002) A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211 (2-3) 233-248.

[13] ChenL.L., ShengH.L. Electrocoagulation of chemical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical engineering journal*, 2003, 205-211.

[14] Kabay M.,H, ZH.,Senturk E.,Aydiner C.,Demirbas E. treatment of potatochips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*.2006.201-211.

[15] Benamar cheknane, étude de la granulation de supports hydrophobes à base d'argiles pontées et de matériau inerte : application a la mobilité et d'adsorption dynamique. novembre 2010.