

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITÉ SAÂD DAHLAB DE BLIDA
FACULTÉ DE SCIENCE DE TECHNOLOGIER
DÉPARTEMENT DE CHIMIE INDUSTRIELLE**



**MÉMOIRE DE MASTER
En chimie Industrielle
Option : Eau, Environnement et Développement durable**

THÈME

**ÉLIMINATION DU BLEU CIBACETTE EN SOLUTION
SYNTHÉTIQUE PAR ÉLECTROCOAGULATION
EN UTILISANT DES ÉLECTRODES EN ALUMINIUM ET EN
FER**

Présenté par :
Mr. MASKRI Sofiane

Promoteur :
Mr. BEN MAAMAR Zoubir

Co-promoteur :
Mr. GHRIBI Fethi

Année Universitaire 2012/2013

ملخص

يتعلق هذا العمل بتطبيق التخثير الكهربائي كطريقة معالجة محاليل مصنعة تحتوي على ملون النسيج أزرق سيباسات. هذا العمل هو إيجاد الشروط الأفضل والمقارنة حقتت باستعمال المسريين كهربائية من الألمنيوم و الحديد بمساحة فعالة ب 40 سم²، وذلك باستخدام مفاعل بحجم 0,8 لتر. المقارنة ركزت على العوامل الأكثر أهمية في العلاج، وهما: شدة التيار ودرجة الحموضة، المسافة بين المسريين وطبيعة المسريين. وثبتنا العوامل الأخرى: سرعة المزج، الناقلية الأولية. النتائج المتحصل عليها تتركز على نسب إزالة ملون أزرق سيباسات. ثم، قدرنا استهلاك الطاقة لكل نوع من القطب خلال فترة العلاج وذلك في الظروف المثلى. نتائج الشروط الأفضل المحصل عليها تبين أن نسبة القضاء على الصبغة هي 95% لازرق سيباسات خلال مدة 30 دقيقة من العلاج لكل من المسريين الحديد و الألمنيوم، وهذا في الشروط التالية: المسافة بين المسريين = 2 سم، شدة التيار = 375 أ/سم²، درجة الحموضة الابتدائية 6 إلى 7، الناقلية = 2.7 م س/سم و التركيز الابتدائي للصبغة = 0.05 غ/لتر و سرعة المزج = 660 دورة /د. نتائج استهلاك الطاقة تشير إلى أن الحديد هو أقل استهلاكاً للطاقة مقارنة مع الألومنيوم، هو 11 كيلووات ساعة / م³ للحديد 12 كيلووات ساعة / م³ للألومنيوم. تشير النتائج أن التخثير الكهربائي طريقة فعالة و بديلة لمعالجة المحاليل المصنعة تحتوي على أزرق سيباسات.

كلمات مفاتيح: التخثير الكهربائي، الملونات النسيجية، مسرى الألمنيوم، مسرى الحديد، القضاء على الصبغة، أزرق سيباسات، استهلاك الطاقة.

Résumé

Ce travail est consacré à l'application de l'électrocoagulation (EC) en batch comme mode de traitement d'une solution synthétique contenant un colorant textile le Bleu Cibacette. Un travail d'optimisation et de comparaison a été réalisé avec des électrodes en aluminium et en fer, de surface active de 40 cm², via un réacteur 0,8L

La comparaison est basée sur les paramètres les plus significatives sur le traitement, à savoir: l'intensité du courant et le pH, la distance inter-électrodes et nature d'électrode. On a fixé les autres paramètres: la vitesse d'agitation, conductivité initiale. Les résultats obtenus sont basés sur les taux d'élimination du colorant Bleu Cibacette. Par la suite, on a estimé la consommation d'énergie pour chaque type d'électrode durant le traitement et ça dans les conditions optimum.

Les résultats de l'optimisation montrent un taux de décoloration autour de 95% du Bleu Cibacette durant 30min de traitement et pour les deux types des électrodes Al et Fe, et ça dans les conditions suivantes: distance inter-électrodes= 2 cm, densité de courant= 375 A/m², pH initial 6 à 7, conductivité 2,7 mS/cm et concentration initial du colorant de 0,05 g.l⁻¹ et vitesse d'agitation 660 tr/min.

Les résultats de la consommation d'énergie indiquent que le fer est moins énergivore par rapport au l'aluminium, elle est de 11 kWh / m³ pour le fer et de 12 kWh / m³ pour l'aluminium. Les résultats suggèrent que l'électrocoagulation pourrait être considérée comme une alternative efficace pour le traitement des solutions synthétiques contenant un colorant textile.

Mots clés : Electrocoagulation, colorants textiles, électrodes aluminium, électrodes fer, décoloration, Bleu Cibacette, consommation d'énergie.

Abstract

The main subject of this scientific work is the application of electrocoagulation (EC) in batch as a electrochemical in order to decoloration a solution containing a synthetic textile dye the Blue Cibacette. An optimization work was made with electrodes of aluminum and iron, active area of 40 cm², using a 0.8 L reactor, to make a comparison between electrodes. The comparison is based on the most significant parameters of the treatment, as: the current intensity and pH, natural and inter-electrode distance. We set other parameters: speed of agitation, initial conductivity. The results are based on the percent (%) elimination of dye Blue Cibacette. Subsequently, we estimated the energy consumption for each type of electrode during treatment and that in the optimum conditions. The optimization results show that the decoloration is around 95% of Blue Cibacette. During 30 min as time of treatment and for both Al and Fe electrodes, and that under the following conditions: inter-electrode distance = 2 cm, density current = 375 A/m², initial pH 10 to 12, conductivity 2.7 mS / cm and the initial concentration of the dye of 0.05 gl-1 and the stirring speed 660 tr / min. The results of the energy consumption indicate that iron is less energy compared to aluminum, it is 11 kWh / m³ for iron and 12 kWh / m³ for aluminum. The results suggest that electrocoagulation could be considered an effective alternative for the treatment of synthetic textile dye-containing solutions.

Keywords: electrocoagulation, textile dyes, aluminum electrodes, iron electrodes, discoloration, Cibacette Blue, energy consumption.

DEDICACES

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

- *À celle qui a illuminé ma vie avec sa gentillesse, son soutien, son encouragement et son sacrifice, à la femme qui règne sur mon cœur, **ma mère.***
- *À celui qui m'a toujours dirigée, guidée, et encouragée, à l'homme qui a toujours souhaité me voir à la hauteur, **mon père.***
- *À mes sœurs: rayane,*
- *À mes frères: bilalle ,ayoubé , farouké, abdel illahe*
- *À mes très chers collègues et toute la promotion 2013.*
- *À tous mes chers amis surtout de CSE.*
- *À tous ceux que j'aime et tous ceux qui me sont très chers.*
- *À toute personne ayant élaboré ce travail, par un conseil, ou même un sourire.*

Maskri sofiane

Liste de tableaux

Tableau I-1: présentation des différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés	3
Tableau I-2 : Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité Croissante	5
Tableau I-3 : Structures moléculaires des différents colorants selon la classification Chimique	5
Tableau I-4 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants	4
Tableau I-5 : Avantages et des inconvénients des techniques de dépollution des effluents textiles	14
Tableau II .1: Historique des applications du procédé d'électrocoagulation	15
Tableau II-2: Matériaux d'électrodes utilisés en l'électrocoagulation	17
Tableau III-1: réactifs utilisés avec leurs emplois	25
Tableau III-2: Caractéristiques du BC	25
Tableau III-3 : Conditions opératoires pour l'électrocoagulation	28

Liste de figure

Figure I-1 : formation du colorant azoïque sur la fibre	7
Figure I-2 : Comportement du colorant direct en présence des fibres	8
Figure I-3 : Comportement du colorant à mordant en présence du textile	9
Figure I-4 : Dangers des rejets textiles	9
Figure II-1: Schéma du principe de l'électrocoagulation	15
Figure II-2: Représentation schématique du mécanisme réactionnel de l'EC	19
Figure II.3: Diagramme de distribution pour Al-H ₂ O considérant seulement l'espèce mononucléaire	20
Figure III-1: Schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation à 2 électrodes (batch).....	26
Figure IV-1: Influence de la distance inter-électrodes sur le taux d'élimination du colorant BC électrode Al	32
Figure IV-2 : Influence de la distance inter-électrodes sur le taux d'élimination du colorant BC électrode Fe	32
Figure IV-3: Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la distance inter-électrodes (cm) à t= 90min électrode Al	33
Figure IV-4: Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la distance inter électrodes (cm) à t= 90min électrode Fe	33
Figure IV-5: Influence de la densité de courant sur le taux d'élimination du colorant BC.	35
Figure IV-6: Influence de la densité de courant sur le taux sur le taux d'élimination du colorant BC électrode Fe	35
Figure IV-7 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la densité de courant (A/m ²) à t=60min. électrode Al	36
Figure IV-8 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la densité de courant (A/m ²) à t=60min. électrode Fe	36
Figure IV-9 : Influence du pH sur le taux d'élimination du colorant BC , Al	38
Figure IV-10 : Influence du pH sur le taux d'élimination du colorant BC , Fe	38
Figure IV-11 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction du pH initial 60 min. électrode	39
Figure IV-12 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction du pH initial.60 min. électrode Fer	39
Figure VI-13: Hydrolyse de l'aluminium en fonction du pH	40

Figure IV-14 : Influence du pH sur le taux d'élimination du colorant BC	42
Figure IV-15 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction du pH initial.30 min. électrode Fer et Al	42
Figure IV-16. Comparaison entre aluminium (Al^{3+}) et le Fer (Fe^{+2}) en le sens du rendement faradique	43
Figure IV-17. Consommation de l'énergie ($kWhm^{-3}$)	45
Figure VI-18 : Evolution de la température C°	46
Figure VI-19 : Variation des températures pour chaque intervalle du temps. (Temps de traitement 30 min).....	46
Figure VI-20 : Variations de la consommation d'énergie entre chaque intervalle de temps. (Temps de traitement 30 min).....	47

TABLE DES MATIÈRES

Résumé

Table des matières

Listes des figures et des tableaux

Introduction générale	1
Chapitre I: colorants textiles	
I-1 Définition	2
I-2. Aperçus sur l'industrie textile	2
I-3. Effluents textiles	2
I-4. Caractéristiques des colorants	4
I-5. Classification des colorants	5
I-5-1. Classification technologique ou (appellation usuelle)	5
I-5-2. Classification technique	5
I-5-3. Classification chimique	6
I-5-4. Classification tinctoriale	7
I-6. Colorants textiles, environnement et santé humaine	9
I-6-1 Impact des colorants sur l'environnement	9
I-7. Procédés de traitement des colorants	11
I-7-1. Traitement physico-chimique	11
I-7-1-1. Coagulation-Floculation	11
I-7-1-2. Filtration sur membrane	12
I-7-1-3. Adsorption sur charbon actif (ou sur un autre adsorbant)	12
I-7-1-4. Traitement chimique	12
I-7-1-5. Traitement biologique	13

Chapitre II: Électrocoagulation

II-1.	Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation(EC)	15
II -2.	Définition l'électrocoagulation	16
II-3.	Principe de l'électrocoagulation	16
II-4.	Matériaux utilisés comme électrodes	17
II-5.	Phénomène chimique	17
	II-5-1. Particules colloïdales	17
	II-5-2. Matières organiques dissoutes	18
II-6.	Mécanismes réactionnels de l'électrocoagulation	18
II-7.	Paramètres influençant l'électrocoagulation	21
	II-7-1. pH	21
	II-7-2. Conductivité	21
	II-7-3. Température	21
	II-7-4. Densité de courant	21
	II-7-5. Nature des électrodes	22
II-8.	Application de l'électrocoagulation	22
II-9.	Décoloration des solutions synthétiques par l'électrocoagulation	23
II-10.	Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation	24
	II-10-1. Avantages de l'électrocoagulation	24
	II-10-2. Inconvénients de l'électrocoagulation	24

Chapitre III: Matériels et méthodes

III-1.	Matériels	25
	III-1-1. Produits utilisées	25
	III-1-2. Effluent synthétique	25
III-2.	Dispositif expérimental	25
III-3.	Protocole expérimental	27
	III-3-1. Nettoyage des électrodes	27

III-3-2. Préparation de la solution synthétique	27
III-3-3. Techniques d'analyses	27
III-3-4. Paramètres étudiés	27
III-3-5. Méthodes et paramètre de mesure	28
III-4. Indicateurs liés à consommation d'énergie	29
III-4-1. Rendement faradique	29
III-4-2. Consommation d'énergie ou le coût énergétique	30
 Chapitre IV: Résultats et discussions	
IV-1. Effets de la distance inter-électrode	31
IV-2. Effets de la densité de courant	34
IV-3. Effet du pH	37
IV-4. Consommation d'énergie	41
IV-4.1. Les essais optimums	41
IV-4.2. Rendement faradique	43
IV-5. Consommation d'énergie du procédé d'électrocoagulation	44
Conclusion générale	48
Annexes	49
Références bibliographiques	50

CHAPITRE I:

COLORANTS TEXTILE

I-1. Définition

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre une substance d'une manière durable. Un colorant proprement dit est une substance qui possède deux propriétés spécifiques, indépendantes l'une de l'autre, la couleur et l'aptitude à être fixée sur un support tel qu'un textile [6].

I-2. Aperçus sur l'industrie textile

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

- dans l'industrie textile, fourrure, cuir (textiles à usage vestimentaire, de décoration du bâtiment, du transport, textiles à usage médical...)
- dans l'industrie des matières plastiques (pigments)
- dans l'industrie du bâtiment : peintures (pigments), matériaux de construction, céramiques...
- dans l'imprimerie (encres, papier)
- dans l'industrie pharmaceutique (colorants)
- dans l'industrie des cosmétiques (dont les colorations capillaires)
- dans l'industrie agroalimentaire (colorants et additifs alimentaires...) [7].

La teinture des textiles a été effectuée depuis les temps les plus reculés. On employait alors uniquement des colorants naturels, mais ces composés ont été presque totalement remplacés par des colorants de synthèse. Une teinture consiste à faire absorber, diffuser des colorants dans les fibres textiles, puis ensuite à les fixer à l'intérieur de celles-ci [8].

I-3. Effluents textiles

Les eaux résiduaires de l'industrie de textile présentent généralement des problèmes de couleur, de température relativement élevée et de concentration élevées de DBO₅, de DCO, des sels, de solides en suspension, ainsi que de toxicité et de conductivité élevées. Leurs caractéristiques peuvent être extrêmement variables en raison du large spectre de colorants de pigments, de produits auxiliaires et de procédés utilisés, métaux lourds tels que : le cuivre et le chrome, Des acides organiques et minéraux, des alcalis (soude, carbonate), Des oxydants, provenant du blanchiment qui se fait à l'eau oxygénée, à l'eau de javel, au chlorite ou au perborate, ou constitués par les bichromates, etc [9,10].

Tableau I-1, résume les différentes étapes de l'industrie textile ainsi que les rejets associés.

Tableau I-1: présentation des différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés [11].

Activités	Rejets associés
Préparation de la laine	- Rejets liquides fortement chargés en matières en suspension et matières organiques
Filature	- Aucun rejet liquide (exception pour la filature du lin dite mouillée qui permet d'obtenir des fils fins: rejets équivalents à ceux provenant de la préparation de la laine) - Rejets gazeux constitués essentiellement de poussières
Tissage/tricotage	- Présence de poussières - Présence d'agents d'encollage Mais consommation en eau, activité considérée comme peu polluante.
Ennoblement: - Prétraitement (désencollage, désensimage, débouillissage, mercerisage) - Blanchiment - Teinture - Impression - Apprêts chimiques	- Rejets contenant des huiles, des cires, de la soude, des détergents et des produits auxiliaires - Les prétraitements représentent 50% de la pollution organique liée à l'ennoblement (surtout au niveau du désencollage). 7% du volume des effluents liés à l'ennoblement - Eaux de blanchiment (présence d'organochlorés) 69% du volume des effluents liés à l'ennoblement - Essentiellement constitués d'eau, de colorants non fixés (colorant utilisés souvent insolubles dans l'eau). 12% du volume des effluents liés à l'ennoblement - Eaux d'impression: colorants (même type qu'en teinture mais en concentrations plus importantes), liants, adjuvants (fixation des colorants), épaississant (pour éviter le coulage de la couleur). 10% du volume des effluents liés à l'ennoblement - Eaux de vidange et de nettoyage des machines (produits chimiques). 2% du volume des effluents liés à l'ennoblement - Rejets gazeux.

I-4. Caractéristiques des colorants

Les colorants furent, pendant très longtemps, extraits du milieu naturel : plantes, animaux et minéraux. Le coût d'obtention était souvent très élevé, et les procédés d'application plus ou moins reproductibles et très fastidieux.

Les premiers colorants synthétiques datent du milieu du XIX^{ème} siècle. L'évolution de l'industrie des colorants a été étroitement liée au développement de la teinture synthétique et de la chimie en général. En conséquence, au début du 20^{ème} siècle, les colorants synthétiques ont presque complètement supplantés les colorants naturels [12].

Un colorant doit posséder, outre sa couleur propre, la propriété de teindre. Cette propriété résultant d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre, est à l'origine des principales difficultés rencontrées lors des traitements. En effet, selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères afin de prolonger la durée de vie des produits textiles sur lesquels ils sont appliqués: résistance à l'abrasion, stabilité photolytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment par les détergents) et aux attaques microbiennes.

L'affinité du colorant pour la fibre est particulièrement développée pour les colorants qui possèdent un caractère acide ou basique accentué. Ces caractéristiques propres aux colorants organiques accroissent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu disposés à la biodégradation [13].

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés groupes chromophores. La molécule colorante est un chromogène [14]. Plus le groupement chromophore donne facilement un électron, plus la couleur est intense (Tableau I-2).

Généralement, les colorants consistent en un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène, etc).

Lorsque le nombre de noyaux aromatiques augmente, la conjugaison des doubles liaisons s'accroît. L'énergie des liaisons « p » diminue tandis que l'activité des électrons « π » ou « n » augmente et produit un déplacement vers les grandes longueurs d'onde. De même, lorsqu'un groupe auxochrome donneur d'électrons (amino, hydroxy, alkoxy...) est placé sur un système aromatique conjugué, ce groupe se joint à la conjugaison du système « p », il peut

y avoir hyperconjugaison et la molécule absorbe dans les grandes longueurs d'onde et donne des couleurs plus foncées [15].

Tableau I-2 : Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité Croissante [15].

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulphure (>C=S)	Groupements donneurs d'électrons

I-5. Classification des colorants

Les colorants synthétiques sont classés selon leur structure chimique et leur méthode d'application sur différents substrats (textiles, papier, cuir, matières plastiques, etc.).

I-5-1. Classification technologique ou (appellation usuelle)

La classification technologique permet à l'utilisateur de connaître le mode d'application du colorant, et donc ses domaines d'utilisation, ses propriétés (solubilité, affinité pour tel type de fibres ou matériaux, nature de la fixation, etc.). Il est souvent difficile de connaître la composition chimique des colorants car la confidentialité sur la composition chimique est généralement préservée. Cette classification comprend trois éléments :

Nom générique de la classe d'application ; Couleur ; Numéro d'ordre chronologique d'inscription au "couleur index " [16].

I-5-2. Classification technique

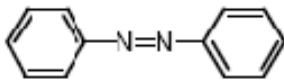
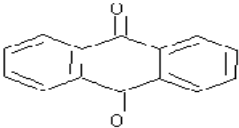
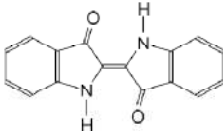
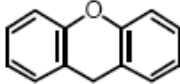
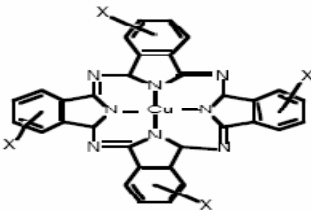
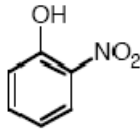
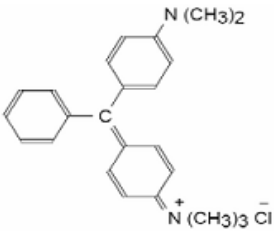
Les colorants utilisés dans l'industrie textile contiennent habituellement des groupes acides sulfoniques qui leur confèrent une hydrosolubilité appropriée et qui permettent à la molécule du colorant de se lier ioniquement aux sites chargés du réseau polymérique du tissu. On peut classer les colorants organiques en deux catégories suivant leur synthèse [16] :

Colorants naturels ; Colorants synthétiques

I-5-3. Classification chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (tableau I-2). Les classes chimiques les plus utilisées dans les colorants textiles sont principalement les colorants azoïques, puis les colorants anthraquinoniques et les phtalocyanines [17]. Structures moléculaires des différents colorants selon la classification chimique dans le tableaux suivant :

Tableau I-3 : Structures moléculaires des différents colorants selon la classification chimique [17].

Classification chimique	Structures moléculaires
Colorants azoïques	
Colorants anthraquinoniques	
Colorants indigoïdes	
Colorants xanthènes	
Colorants phtalocyanines	
Colorants nitrés et nitrosés	
Colorants triphénylméthanés	

I-5-4. Classification tinctoriale

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application.

I-5-4-1. Colorants réactifs

Contiennent des groupes chromophores issus essentiellement des familles azoïques, anthraquinonique et phtalocyanine. Leur appellation est liée à la présence d'une fonction chimique réactive, de type triazinique ou vinylsulfone assurant la formation d'une liaison covalente forte avec les fibres. Solubles dans l'eau, ils entrent de plus en plus fréquemment dans la teinture du coton et éventuellement dans celle de la laine et des polyamides [17].

I-5-4-2. Colorants développés ou azoïques insolubles

Sont formés directement sur la fibre. Au cours d'une première étape, le support textile est imprégné d'une solution de naphthol ou copulant. Les précurseurs de la molécule suffisamment petits pour diffuser dans les pores et les fibres sont ensuite traités avec une solution de sel de diazonium qui, par réaction de copulation entraîne le développement immédiat du colorant azoïque [18], (Figure I-1).

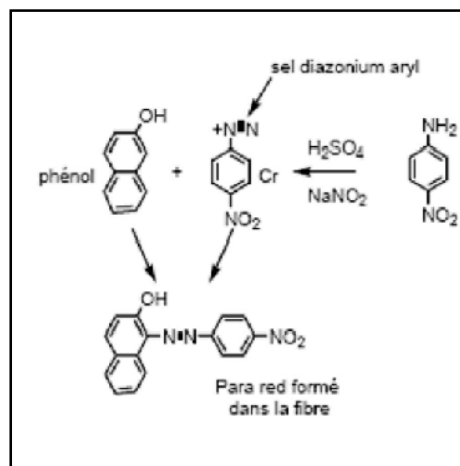


Figure I-1 : formation du colorant azoïque sur la fibre [18].

I-5-4-3. Colorants acides ou anionique

Ils sont Solubles dans l'eau grâce à leurs groupes sulfonâtes ou carboxylates. Ils sont ainsi dénommés parce qu'ils permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide) en bain légèrement acide.

L'affinité colorant-fibre est le résultat de liaisons ioniques entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupes amino des fibres textiles [18].

I-5-4-4. Colorants basiques ou cationiques

Sont des sels d'amines organiques, ce qui leur confère une bonne solubilité dans l'eau. Les liaisons se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres. En passe de disparaître dans la teinture de la laine et de la soie, ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes [17].

I-5-4-5. Colorants de cuve

Sont insolubles et doivent être transformés en leucodérivés par réduction alcaline. La teinture se termine par la réoxydation in situ du colorant sous sa forme insoluble initiale. Réputés pour leur bonne résistance aux agents de dégradation, les colorants de cuve sont encore utilisés, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles jean.

I-5-4-6. Colorants directs

Contiennent ou sont capables de former des charges positives ou négatives électrostatiquement attirées par les charges des fibres. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule.

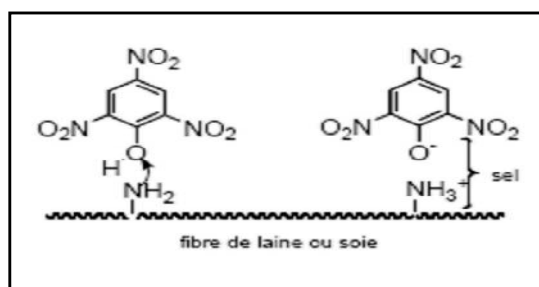


Figure I-2 : Comportement du colorant direct en présence des fibres [19].

I-5-4-7. Colorants à mordants

Contiennent généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium, de chrome, de cobalt, de cuivre, de nickel ou de fer pour donner différents complexes colorés avec le textile.

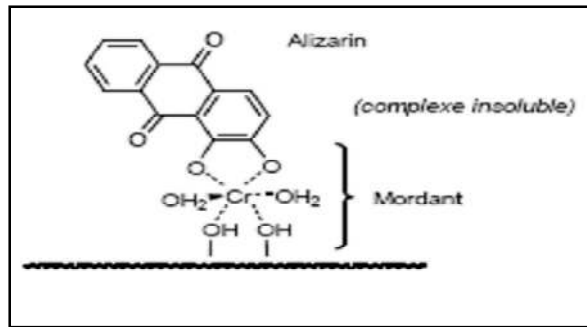


Figure I-3 : Comportement du colorant à mordant en présence du textile [19].

I-5-4-8. Colorants dispersés

Ils sont très peu solubles dans l'eau et sont appliqués sous forme d'une fine poudre dispersée dans le bain de teinture. Ils sont en mesure, lors d'une teinture à haute température, de diffuser dans les fibres synthétiques puis de s'y fixer [19].

I-6. Colorants textiles, environnement et santé humaine

Les colorants sont introduits dans l'environnement à travers les effluents des industries textiles. En effet, des quantités considérables de colorants sont retrouvées dans ces effluents à cause de leur incomplète utilisation et suite aux opérations de lavage. Il y a des évidences sur leurs effets nocifs [20].

I-6-1. Impact des colorants sur l'environnement

La figure I-4 résume les dangers évidents et à long terme des rejets textiles,

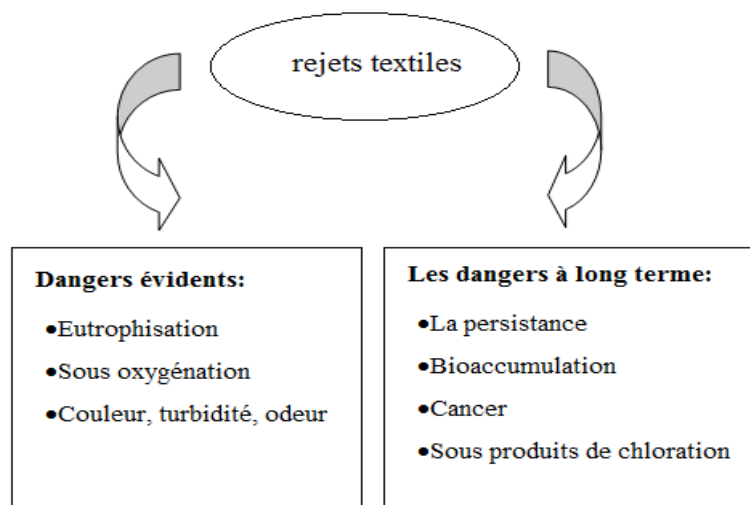


Figure I-4 : Dangers des rejets textiles [21].

- **Eutrophisation** : Sous l'action des microorganismes, les colorants libèrent des nitrates et des phosphates dans le milieu naturel. Ces ions minéraux introduits en quantité trop importante peuvent devenir toxiques pour la vie piscicole et altérer la production d'eau potable. Leur consommation par les plantes aquatiques accélère leur prolifération anarchique et conduit à l'appauvrissement en oxygène par inhibition de la photosynthèse dans les strates les plus profondes des cours d'eau et des eaux stagnantes.

- **Couleur, turbidité, odeur** : L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvais goûts, prolifération bactérienne, odeurs pestilentielles et colorations anormales.

- **La persistance** : Les colorants organiques synthétiques sont des composés impossibles à épurer par dégradations biologiques naturelles. Cette persistance est due principalement à leur réactivité chimique :

- Les composés insaturés sont moins persistants que les saturés ;
- Les alcanes sont moins persistants que les aromatiques ;
- La persistance des aromatiques augmente avec le nombre de substituants ;
- Les substituants halogènes augmentent plus la persistance des colorants que les groupements alkyles.

- **Bioaccumulation** : Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant être jusqu'à mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau (illustration du phénomène de bioaccumulation de pesticides) [21].

- **Cancer** : Si la plupart des colorants ne sont pas toxiques directement, une portion significative de leurs métabolites l'est. Leurs effets mutagènes, tératogène ou cancérigène apparaissent après dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation : amine cancérigène pour les azoïques.

I-7. Procédés de traitement des colorants

Au cours des différentes étapes de teinture, des quantités plus ou moins importantes de colorants sont perdues par manque d'affinité avec les surfaces à teindre (Tableau I.4) , et à cause de leurs toxicités précédemment décrites , ces effluents nécessitent un traitement préalable avant d'être déversés dans le milieu naturel

Tableau I-4 : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants [19].

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

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la conception d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par étapes successives. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage, etc.) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide-liquide. Les techniques de dépollution intervenant le plus couramment en deuxième étape dans les industries textiles sont brièvement discutées dans les sections qui suivent:

I-7-1. Traitement physico-chimiques

I-7-1-1. Coagulation-Floculation

La coagulation-floculation est un processus physico-chimique par lequel des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés, à l'aide des coagulants et floculant chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floes). Les particules colloïdales sont déstabilisées tout d'abord par l'addition des sels tels que $Al_2(SO_4)_3$. Les floculant facilitent l'agglomération des particules déstabilisées conduisant à la formation des floes. Les floes formés sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués. Les coagulants inorganiques tels que l'alun ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$), donnent des colorants dispersés,

de cuve et au soufre, mais sont totalement inefficace pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques [22,23]. Par ailleurs, la coagulation-floculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. D'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé :

Leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires [22,23].

I-7-1-2. Filtration sur membrane

La filtration sur membrane pilotée par pression hydraulique se décline en microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. L'effluent passe à travers une membrane semi-perméable qui retient en amont les contaminants de taille supérieure au diamètre des pores, pour produire un perméat purifié et un concentré qui reçoit les impuretés organiques. D'après Taylor et Jacobs [24], Parmi les quatre types de procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse sont les plus adaptés à la réduction partielle de la couleur et des petites molécules organiques, mais l'osmose inverse reste la plus répandue [25]. La nanofiltration s'applique surtout au traitement des bains de teinture de colorants réactifs en agissant comme un filtre moléculaire tandis que la microfiltration retient les matériaux colloïdaux tels que les colorants dispersés ou de cuve grâce à une "membrane écran" [26], l'ultrafiltration ne s'applique qu'à la réduction de DCO et des solides en suspension, et ne se montre réellement efficace qu'en combinaison avec la coagulation/floculation [27].

I-7-1-3. Adsorption sur charbon actif (ou sur un autre adsorbant)

Lors de l'adsorption, le polluant est transféré de la phase liquide vers la phase solide. Le charbon activé est l'adsorbant le plus communément utilisé pour la réduction de la couleur, Mais cette technique n'est efficace que sur certaines catégories de colorants cationiques, à mordant, colorants dispersés, de cuve et réactifs, et pour un type donné de carbone, dans une certaine gamme de pH et pour une concentration en impuretés relativement constante afin de prévenir un relargage dans l'effluent. De plus ces techniques non destructives requièrent des opérations postérieures onéreuses de régénération et de post-traitement des déchets solides. [28, 29].

I-7-1-4. Traitement chimique

Dans la littérature, les techniques d'oxydation chimique sont généralement appliquées pour le traitement des composés organiques dangereux présents en faibles concentrations, en prétraitement avant des procédés biologiques, le traitement des eaux usées chargées de constituants résistant aux méthodes de biodégradation.

Les réactifs les plus souvent énumérés pour ce type de traitement sont H_2O_2 , Cl_2 et O_3 . Le peroxyde d'hydrogène est un oxydant fort et son application pour le traitement des polluants organiques et inorganiques sont bien établis [30]. Mais l'oxydation seule par H_2O_2 n'est pas suffisamment efficace pour de fortes concentrations en colorant. Hamada et al. ont proposé de traiter les colorants azoïques par l'hypochlorite de sodium mais, même si la molécule initiale est détruite, les halogènes sont susceptibles de former des trihalométhane cancérogènes pour l'homme avec les sous-produits de dégradation [31].

I-7-1-5. Traitement biologique

Les procédés d'épuration par voie biologique sont basés sur la biotransformation microbienne des colorants. En outre, la majorité des colorants sont très stables et non biodégradables. Néanmoins, beaucoup de recherche ont démontré la biodégradation partielle ou complète des colorants par voie biologique [32,33]. Si ces techniques sont adaptées à un nombre de polluants organiques, elles ne sont pas toujours applicables sur les effluents industriels en raison de fortes concentration de polluants, de leur toxicité qui entraînent la mort des microorganismes ou de leur très faible biodégradabilité. De plus, ces techniques génèrent des quantités importantes des boues biologiques à retraiter. Selon Loehr [34], la biodégradabilité est favorable pour les eaux usées présentant un rapport $DBO_5/DCO > 0.5$, par contre elle est très limitée lorsque ce rapport devient inférieur à 0,2. Ce rapport, appelé degré de dégradation biochimique, sert de mesure pour la dégradation biochimique des polluants dans les eaux usées.

Le tableau I-5 résume les avantages et les inconvénients des différentes techniques de traitement.

En effet, et d'après Cette étude bibliographique les rejets colorés posent un problème esthétique et sanitaire. Comme tous les composés organiques dangereux pour l'homme, les colorants synthétiques requièrent des traitements spécifiques. Mais les procédés classiques utilisés par les usines de traitements des eaux usées sont mal et parfois même pas adaptés à la dépollution de ces polluants biocides. La majorité de ces procédés sont trop sélectifs sur les catégories de colorants à traiter et ne font que déplacer la pollution plutôt que la supprimer. Cependant lorsqu'une approche semble prometteuse, les investissements ou les couts de fonctionnement deviennent prohibitifs pour une application à grande échelle.

Une technique de traitement adaptée aux colorants doit avant dégrader les molécules jusqu'à complète minéralisation afin d'éviter la formation de sous-produits plus dangereux que les composés initiaux. Les procédés présentés dans ce chapitre ne répondent pas à cette attente car ils sont pour la plus part non destructifs. Mais un autre type de procédé: les

procédés électrochimiques capables de décolorer la solution par destruction des groupes chromophores et réduire le taux de matière organique non biodégradable. Ces procédés seront abordés dans le chapitre suivant [35].

Tableau I-5 : Avantages et des inconvénients des techniques de dépollution des effluents textiles [35].

Technologie	Exemples	Avantages	Inconvénients
Coagulation / Floculation	Alun Chaux FeCl ₃	Equipement simple Décoloration relativement rapide Réduction significative de la DCO	Formation de boues Adjonction de produits chimiques nécessaire Fonctionnement onéreux Coagulants non réutilisables Réduction spécifique de la couleur
Filtration sur membranes	Osmose inverse Nanofiltration Microfiltration Ultrafiltration	Utilisation simple et rapide Pas d'addition de produits chimiques Faible consommation énergétique Réduction de la couleur	Investissement important sélectif Encrassement rapide de membranes Pré et post traitements nécessaires
Adsorption	Charbon actif Silice	Réduction efficace de la couleur Technologie simple Faible coût d'utilisation pour certains adsorbants	Investissement et coûts de fonctionnement élevés Lent et limité en volume Régénération des adsorbants onéreuse Sélectif Formation de boue
Oxydation chimique	Ozone Chloration	Traitement de gros volumes Diminution nette de la coloration	Investissement et coûts de fonctionnement très élevés Efficacité limitée pour certains colorants Produits d'oxydation inconnus Coût élevé Formation de sous produits de chloration (trihalométhane cancérogènes)
Réduction chimique	Chlorure d'étain Hydrosulphite	Décoloration efficace des azoïques	Formation d'amines aromatiques Dégradation incomplète
Procédés biologiques	Aérobie Anaérobie	Approprié aux colorants insolubles Décolore la plupart des colorants par un mécanisme de réduction Réutilisation du méthane produit comme source d'énergie sur site	Spécifique à certains colorants Décoloration variable Grandes quantités de boue générées Besoins énergétiques importants Produits de dégradation inconnus Beaucoup de produits toxiques non dégradés

CHAPITRE II:

ELECTROCOAGULATION

II-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 [36] qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique [40]. Le tableau suivant présente l'historique des procédés étudiés:

Tableau II -1: Historique des applications du procédé d'électrocoagulation [36].

Date	Auteurs	Types d'électrodes	Applications
1909	Harries	Al et Fe et sel cuivre	Eaux usées urbaines
1947	Bonilla	Al	
1956	Holden	Al	Eau de surface
1970 1974	Sadek Beck et coll.	Al et Fe	Eau riche en phosphates
1984	Vik et coll.	Al	Eau très chargée en substances humique
1985	Pazenko et coll.		Emulsions d'huiles
1988	Renk	Al et Fe	Eau riche en sable bitumeux pétrolifères
1989	Ryan et coll.		Suspension d'argile
1992	Shen et coll.		Eau de teinture et d'impression
1996	Lin et coll.		Effluents de industries
2000	Chen et coll.	Al	Rejets liquides des industries de la restauration
2002	Abuzaid et coll.		Eau riche en dérivés de nitrates
2003	Shen et coll.		Eau industrielle chargée en fluors
2005	Khemis et coll		Emulsions d'huiles industrielles
2007	Essadki et coll		Rejets de textiles et eaux industrielles chargées en fluors

II -2. Définition l'électrocoagulation

L'électrocoagulation est une technologie qui résulte de l'interaction de trois technologies fondamentales qui sont: l'électrochimie, la coagulation et la floculation [37].

L'EC est un procédé électrochimique de traitement d'effluents liquides, qui permet de générer au cours du traitement des cations Al^{3+} et/ou Fe^{3+} nécessaires à la formation d'ions complexes avec lesquels des polluants organiques sont adsorbés [38].

II-3. Principe de l'électrocoagulation

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit, d'imposer un courant 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).

La figure suivante présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

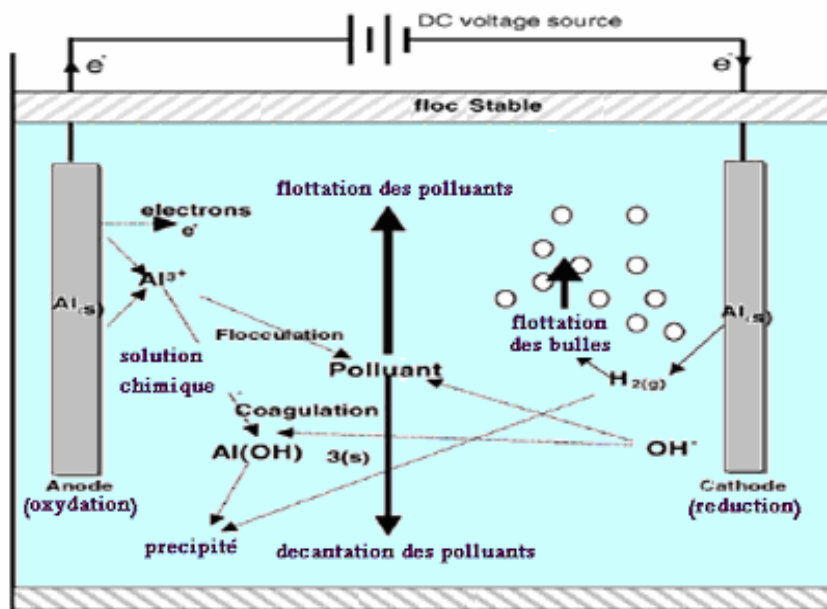


Figure II-1: Schéma du principe de l'électrocoagulation

II- 4. Matériaux utilisés comme électrodes

Les électrodes les plus utilisées sont celles en fer et en aluminium. Cependant des essais ont été conduits sur d'autres types d'électrode. Le Tableau II-2, illustre quelques couples d'anode/cathode qui sont utilisés en électrocoagulation [39].

Tableau II-2: Matériaux d'électrodes utilisés en l'électrocoagulation [39].

Electrodes utilisées	Références
Anode en plomb et cathode en acier inox	Vik et al. (1984)
Titane/ Platine et Ti/Pt/Ir	Garrote et al. (1995)
Fe/Fe	Hansen et al. (2006)
Fe/Al ou Al/Fe	Kobaya et al. (2006)
Ti/Acier	Jordao et al. (1997)
Al/Al	(Holt,et al. 2005).

II-5. Phénomène chimique

II-5-1. Particules colloïdales

La théorie de processus d'EC entraîne trois stades successifs [40]:

- Formation de coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle. L'anode (Fe/Al) se dissout, produisant des ions métalliques, qui vont immédiatement à leur tour former des polymères d'hydroxydes de fer ou d'aluminium, ces derniers sont d'excellents agents de coagulation.
- Déstabilisation de suspension particulaire et cassage d'émulsions [41]. Le mécanisme de déstabilisation des impuretés, suspension particulaire et cassage d'émulsions a été décrit en larges étapes et peut être résumé comme suit:

Compression de la double couche autour des espèces chargées, qui est atteinte par les interactions d'ions générés par dissolution de l'électrode sacrificielle, grâce au passage de courant à travers la solution [42].

Neutralisation de charge des espèces ioniques présentes en eau usée, qui est causée par les ions opposés, produits par la dissolution électrochimique de l'électrode sacrificielle. Ces ions opposés réduisent suffisamment la répulsion inter particulaire électrostatique de telle sorte que l'attraction de Van der Waals prédomine, causant ainsi la coagulation [42].

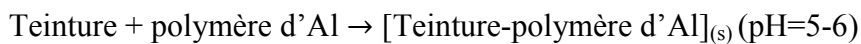
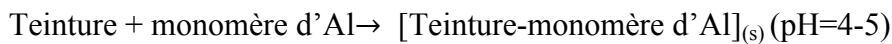
- Agrégation des phases déstabilisées pour former des floes: Les floes sont formés en raison de la coagulation, ces floes fournissent des surfaces actives pour l'adsorption des espèces polluantes [43].

L'eau est également électrolysée dans une réaction parallèle, produisant de petites bulles d'O₂ à l'anode et d'H₂ à la cathode. Ces bulles entraînent les floccs formés à la surface [42]. Les cathodes peuvent être composées de mêmes ou différents matériaux comme l'anode [43]. (Figure II-1).

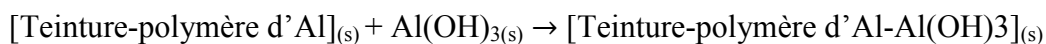
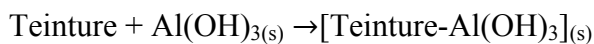
II-5.2. Matières organiques dissoutes

De même, les mécanismes d'élimination des substances organiques dissoutes via précipitation et/ou adsorption sur les floccs sont évoqués par plusieurs auteurs [44,45], qui expliquent l'élimination de teintures organiques par, précipitation pour des pH de 4 à 6 et par adsorption pour des pH supérieurs à 6,5 selon les réactions suivantes :

- Précipitation :



- Adsorption:



II-6. Mécanismes réactionnels de l'électrocoagulation

Dans le procédé d'électrocoagulation, le coagulant est produit « in situ » par oxydation électrolytique d'une anode suite au passage d'un courant (Figure II.2) en utilisant des électrodes en aluminium ou en fer, puisque ces deux métaux ont été largement utilisés pour le traitement classique des eaux sous formes de sels.

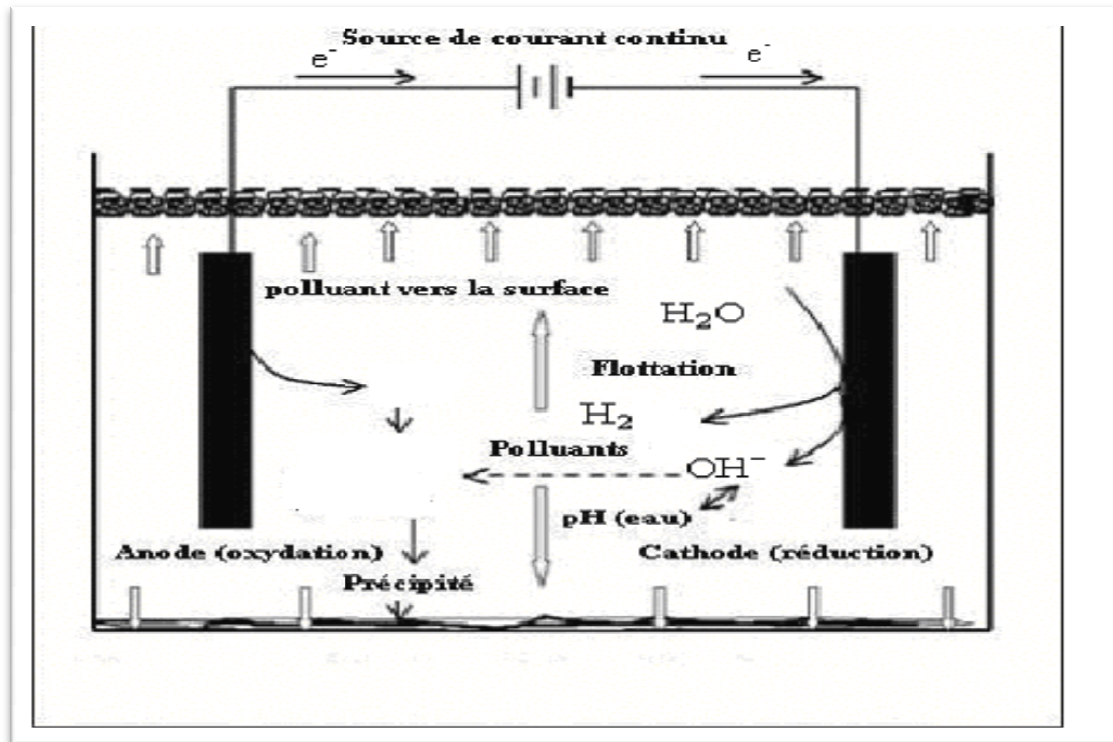
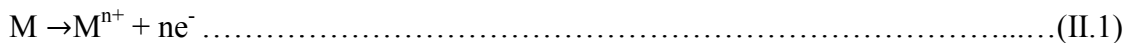


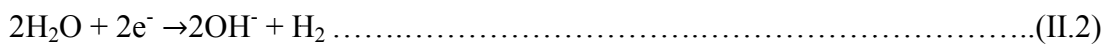
Figure II-2: Représentation schématique du mécanisme réactionnel de l'EC [46].

Un courant passe à travers une électrode métallique générant les deux processus suivants :[47]

- Oxydant le métal (M) en son cation (M^{n+}) selon :

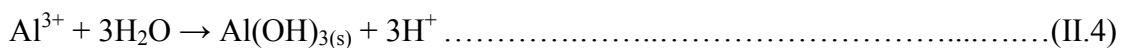
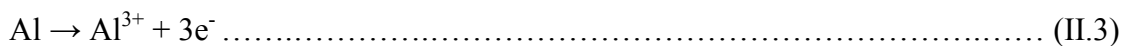


- Simultanément, l'eau est réduite en gaz d'hydrogène et l'ion hydroxyle selon :

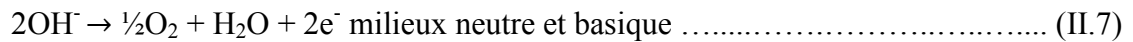
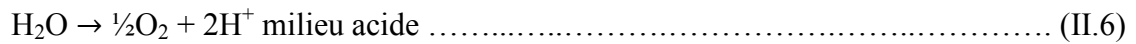


La dissolution électrolytique de l'anode d'aluminium produit l'espèce monomérique cationique telle que Al^{3+} et $Al(OH)_2^+$ à faible pH, qui à des valeurs de pH convenables sont transformées au début en $Al(OH)_3(s)$ et finalement polymérisées en $Al_n(OH)_{3n}$

Anode:

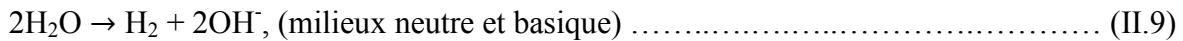
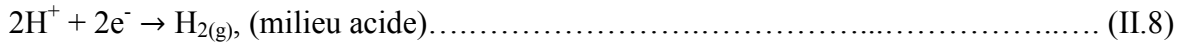


De plus, si la densité de courant est suffisante et si les conditions du milieu s'y prêtent, l'anode peut être également le siège d'une oxydation de l'eau [48]:

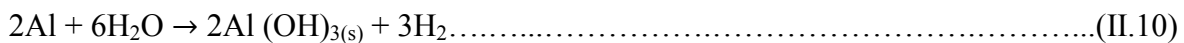


Cathode:

Les dégagements de bulles d'hydrogène au niveau de la cathode sont dus aux réactions suivantes:



Total:



Cependant, une multitude de complexes anioniques et cationiques ont été trouvés [48]:

Les monocomplexes: $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$

Les polycomplexes: $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ (Figure II.2).

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

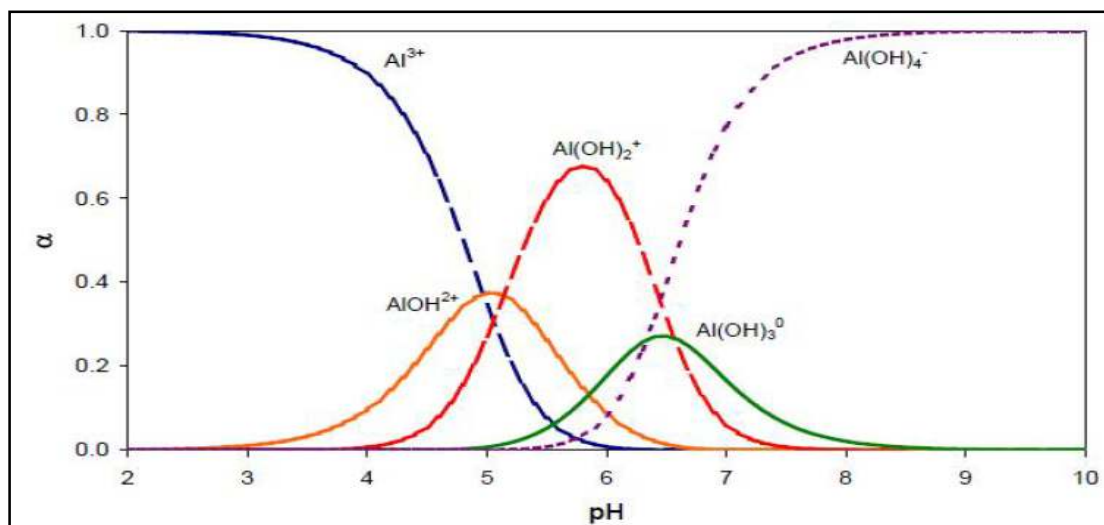


Figure II-3: Diagramme de distribution pour Al-H₂O considérant seulement l'espèce mononucléaire [49].

II-7. Paramètres influençant l'électrocoagulation

Certains paramètres opérationnels tels que la densité de courant, conductivité, pH, type (nature) d'électrode influencent le processus d'électrocoagulations.

II-7-1. pH

Le pH est un facteur important influençant la performance du processus d'électrocoagulations. Il détermine la spéciation d'ions métalliques et influence l'état d'autres espèces en solution et la solubilité de produits formés. Ainsi, il affecte le rendement global et l'efficacité d'électrocoagulations [43].

Le pH du milieu change pendant le processus, comme il était observé également par d'autres chercheurs, ce changement dépend de type du matériel d'électrode et du pH initial [45].

II-7-2. Conductivité

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procédé; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter.

L'ajout d'ions chlorure permet d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'EC [50].

II-7-3. Température

L'efficacité du traitement par oxydation électrochimique des eaux contaminées dépend aussi de la température du milieu [47]. En général, la vitesse de la réaction chimique et ou, électrochimique augmente avec l'accroissement de la température du milieu. Cependant, le traitement à des températures élevées diminuera la vie des électrodes. En effet la plupart des anodes en métaux ne peuvent pas résister aux attaques des oxydants abondamment générés [51].

II-7-4. Densité de courant

La densité de courant i est le courant délivré à l'électrode divisé par l'aire active de l'électrode. Elle est considérée comme un paramètre critique dans l'électrocoagulation. Elle détermine à la fois la vitesse de la dissolution métallique électrochimique dans l'eau et la densité de production électrolytique des bulles. Les densités de courant élevées sont désirables pour le processus de séparation impliquant des cellules de flottation ou de larges bacs de

lavage, alors que les densités de courant faibles sont convenables pour les électrocoagulateurs qui sont intégrés avec des filtres de charbon et de sable conventionnels [43].

II-7-5. Nature des électrodes

Les électrodes constituent la partie la plus importante, et sont considérées comme le cœur de l'unité d'électrocoagulations. La nature des électrodes, et en particulier celle des anodes, joue un rôle primordial sur l'efficacité et le rendement du procédé. Le matériau d'électrode détermine le cation introduit en solution. En effet, les plaques d'aluminium ou de fer sont les électrodes les plus utilisés en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité prouvée [43].

II-8. Application de l'électrocoagulation

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

L'EC offre la possibilité d'épurer les eaux usées de leur contenu en métaux lourds (chrome, zinc, plomb, etc.) [52], en hydrocarbures [53] et en composés organiques récalcitrants à la dégradation, tels que les halobenzènes, les pesticides... [54], mais aussi permet l'élimination des matières en suspension [42,55] et des colloïdes [53,56].

Cette technique est utilisée également pour l'élimination des colorants et des pigments dans l'industrie textile [57]. D'autres auteurs citent son emploi dans la séparation des gouttelettes lipidiques à partir des émulsions huileuses [58].

Des chercheurs thaïlandais ont isolé des produits naturels à partir des plantes par EC; celle-ci leur a donné des résultats meilleurs que les méthodes classiques telles que, l'extraction par solvants ou chromatographies, où des solvants organiques toxiques doivent être utilisés en grandes quantités et qui finissent éventuellement comme problématique environnementale [59].

Les résultats obtenus suite à l'élimination de la lignine et du phénol des effluents de papeteries par électrocoagulations ont prouvé que celle-ci pouvait être une alternative efficace pour le traitement de ce genre d'effluents [60].

L'électrocoagulation a été appliquée comme prétraitement des margines (rejets des industries de production d'huile d'olive) où la majorité des composés phénoliques responsables de couleur sombre, phytotoxicité, etc., ont été polymérisés [61].

II-9. Décoloration des solutions synthétiques par l'électrocoagulation

L'application de l'EC pour le traitement des effluents textiles est fortement recommandée pour deux raisons: Premièrement, ce procédé est efficace pour le traitement des différents rejets liquides contenant des niveaux élevés de divers types de polluants (organique, minéral, des métaux lourds, et des colorants...). Deuxièmement, l'EC est connue pour son efficacité à la décoloration et la désinfection.

En effet, plusieurs chercheurs ont lancé des projets de recherches sur la décoloration des effluents synthétiques où se sont des solutions qui ont été préparés avec un colorant spécifique, selon Martínez-Huitle et Brillas [62]. Dans la plupart des cas, chaque étude est concentrée sur l'étude de la décoloration d'un seul type de colorant dans la solution. Où les différents paramètres d'EC ont été optimisés, à savoir, le pH, la densité électrique, la distance inter-électrodes. Des résultats très satisfaisants sont habituellement rapportés, un taux d'élimination de couleur s'étendant entre 98 et 100% dans la plupart des cas.

Ainsi, Ayhan et al [63] ont étudié la décoloration d'un effluent synthétique contenant le C.I. réactif noir 5 dans un réacteur en batch avec une distance inter électrode de 2,5 cm. Ils ont obtenu un taux de décoloration de 98,8% dans les conditions opératoires suivantes: une concentration initiale de 100 mg/L, température ambiante, électrode en fer, pH initial 5, avec une densité de courant de $4,575 \text{ mA cm}^{-2}$ et en présence de 3 g/L de NaCl.

Plusieurs autre études de décoloration par l'EC ont été effectués sur différents colorants à savoir ; la violette en cristal [64], de l'orange II [65] et C.I. rouge acides 14 [66].

Les auteurs ont rapporté que souvent le pH initial optimal est près de 7, tandis que la période du traitement et l'intensité du courant sont liées ensemble. La quantité de coagulant électro généré, varie réellement avec l'intégrale du courant avec le temps.

Daneshvar et al [67], ont obtenu l'élimination de couleur de 99% de la solution acide du jaune 23 de C.I., mais une élimination de la DCO de 69% seulement. Ce résultat prouve que l'absorbance des colorants n'est pas suffisante pour estimer l'efficacité du traitement [68,69]. Une étude très intéressante sur l'effet des auxiliaires de colorant a été effectué par Kabdaşlı et al [70] en traitant par l'EC d'un effluent synthétique composé de trois colorants (Réactif rouge CI, réactif jaune 145 et le réactif bleu 221) avec l'ajout de NaCl, de Na_2CO_3 ou d'acide polycarboxylique. Les résultats montrent des taux acceptables de l'élimination des colorants et de la DCO particulièrement avec NaCl et des électrodes en aluminium.

II-10. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation

II-10-1. Avantages de l'électrocoagulation

L'EC nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile laissant suffisamment de latitude pour régler les problèmes de:

- l'EC permet une réduction remarquable de métaux, de MES et une réduction notable de DCO [53,71].
- l'EC produit un volume de boues réduit et qui peut être facilement éliminé [52].
- l'EC évite l'utilisation de réactifs chimiques, de telle sorte qu'il n'y a aucun problème de neutralisation des réactifs en excès et aucune possibilité de pollution secondaire par les substances chimiques ajoutées comme dans le cas des traitements chimiques des eaux usées. Cette absence de réactif chimique rajouté permet d'assurer avec succès un traitement biologique réalisé en aval [74].
- coût de fonctionnement souvent plus faible que les stations classiques qui nécessitent l'ajout périodique de réactif [65].
- l'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement: ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation [72].

II-10.2. Inconvénients de l'électrocoagulation

- l'effluent doit avoir une conductivité élevée [62].
- un film imperméable d'oxyde sur la cathode peut être formé, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d' l'électrocoagulation [40].
- lorsque des électrodes sacrificielles sont utilisées, celles-ci sont dissoutes par suite d'oxydation, ce qui nécessite le remplacement régulier de ces électrodes [40].
- L'usage d'électricité peut être coûteux dans certains endroits. L'utilisation de l'énergie électrique, assez coûteuse, et le coût des électrodes consommables constituent un désavantage pour le procédé d' l'électrocoagulation [73].

CHAPITRE III:

MATERIELS & METHODES

Rappelant que l'objectif de notre travail est l'élimination d'un seul colorant synthétique (Bleu cibacette) par l'électrocoagulation, et ça, par l'optimisation des différents paramètres. Les expériences ont été effectuées avec un réacteur d'EC en mode discontinue.

III-1. Matériels

III-1-1. Produits utilisées

Le Tableau III-1 rassemble les réactifs utilisés au cours des essais expérimentaux.

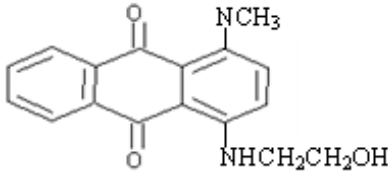
Tableau III-1: réactifs utilisés avec leurs emplois.

Produit	Formule	Utilisation
Hydroxyde de sodium	NaOH	Ajustement du pH et décapage des électrodes
Acide chlorhydrique	HCl	Ajustement du pH
Chlorure de sodium	NaCl	Support électrolytique

III-1-2. Effluent synthétique

Effluent synthétique a été préparé au laboratoire par dissolution dans de l'eau distillée un colorant largement utilisé en industrie textile. Il s'agit d'un colorant anthraquinonique : le Bleu Cibacette. Ce colorant nous a été gracieusement fourni par l'entreprise des textiles SOTRDAL de BOUFARIK; le Tableau III-2 présente les caractéristiques du BC.

Tableau III-2: Caractéristiques du BC.

Type de colorant	N° de réf. (C.I.)	Structure	Classe chimique	M (g.mol ⁻¹)	λ (nm)
Bleu Cibacette (BC)	/		Anthraquinonique (basique)	296.325	629

III-2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été réalisé par montage des matériaux et des appareils suivants :

- Un générateur de courant électrique continue de type ELECTROLYSER (10A-15V).
- Des fils électriques (connexions entre générateur, multimètres et électrodes).
- Un bécher d'un volume de 1000 mL a un diamètre de 10 cm, a été utilisé comme la cuve du réacteur d'EC.
- Des électrodes en aluminium et en Fer, d'une forme rectangulaire et d'une épaisseur de 0.5 mm plongées verticalement dans la solution dont la surface immergée est de (170 mm × 50 mm).
- Un agitateur magnétique de type IKAMAG ® RH (20-2000 rpm).
- Conductimètre de type i HANNA instruments (EC215).
- Milliampèremètre.
- pH-mètre de type inolab (pH level 1).

La cellule expérimentale est composé de deux électrodes en Fer ou en Aluminium : anode et cathode plongés verticalement avec une surface active de $80 \times 50 \text{ mm}^2$, où le volume de solution de 800 ml (Figure III-1).

Un support en plexiglace a été placé sur le réacteur, a joué un double rôle : premièrement, la fixation des électrodes et les maintenir parallèles, deuxièmement, le support nous a permet de faire varier la distance inter -électrode de 2 à 6 cm.

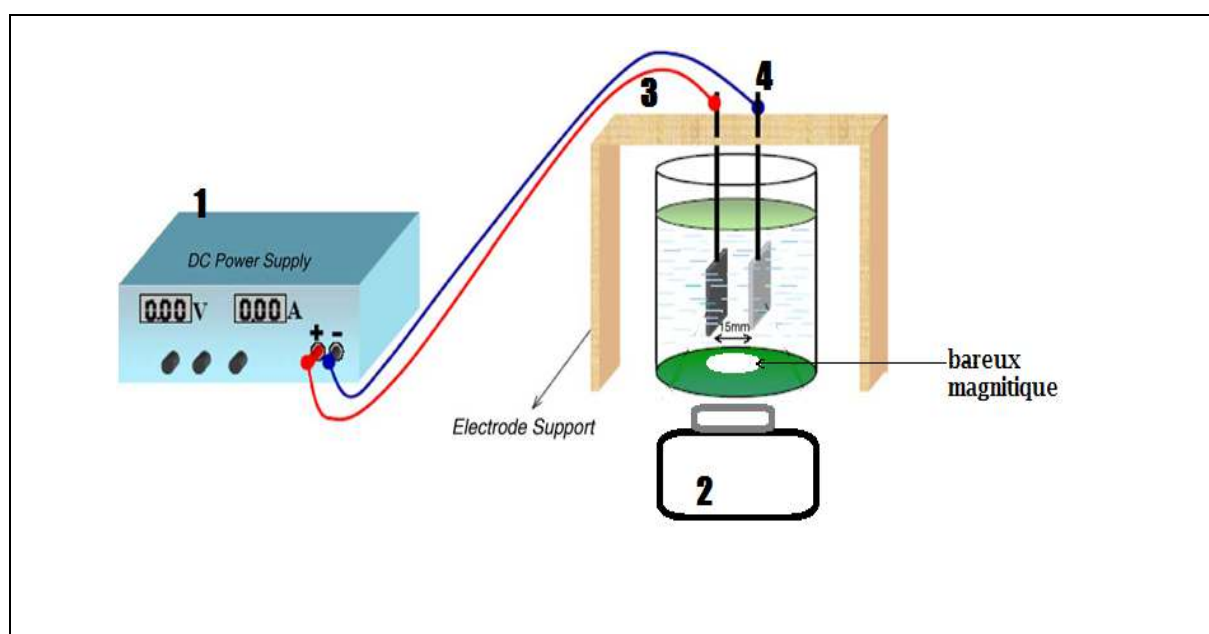


Figure III-1: Schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation à 2 électrodes (batch).
(1) générateur de courant; (2) agitateur avec barreau magnétique; (3) anode; (4) cathode.

III-3. Protocole expérimental

III-3-1. Nettoyage des électrodes

Les deux plaques parallèles et rectangulaires, 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. Par la suite, un nettoyage a été effectué avec une solution d'hydroxyde de sodium de 10%, permettant ainsi d'éliminer les dépôts des polluants.

III-3-2. Préparation de la solution synthétique

La solution synthétique a été préparée en dissoudre 50 mg/l d'un colorant de BC dans l'eau distillée, avec l'ajout de NaCl comme électrolyte support pour augmenter la conductivité de la solution. Le volume introduit dans la cellule est de 800 mL.

Il faut noter que l'optimisation des paramètres a été réalisée sur un seul colorant BC, en utilisant les deux types d'électrodes en Fe et Al.

III-3-3. Techniques d'analyses

Durant le traitement d'EC des prélèvements d'environ 8 ml ont été effectuées en fonction du temps. Ces échantillons ont subi une décantation et une filtration. Ces points expérimentaux ont été analysés par spectrophotométrie Visible à une longueur d'onde précise.

III-3-4. Paramètres étudiés

L'étude est basée sur le suivi de l'élimination du colorant BC à des conditions expérimentales précisées. Nous avons optimisé les paramètres suivants pour les deux électrodes Al et Fe : Distance inter-électrode, Densité de courant, pH initial, et nous avons fixé les autres paramètres à savoir : Conductivité, Vitesses d'agitation, concentration initiale de colorant. Le Tableau III-3, présente les différentes valeurs des paramètres de l'optimisation.

Tableau III-3 : Conditions opératoires pour l'électrocoagulation.

Paramètres	Valeurs
Distance inter-électrodes (cm)	2; 4 et 6
pH initiale	2; 5 ; 6,5 ; 10 et 12
Densité de courant (A/m ²)	175; 250; 375, 500

Sachant que la valeur de la conductivité initiale correspond à l'ajout de NaCl: 2 g/l. Les densités de courant correspondent aux intensités de courants suivantes : 0,7; 1; 1,5 et 2 A. la vitesse d'agitation a été fixée à 660tr/min. la concentration initiale du colorant a été fixé à 0,05g/l.

III-3-5. Méthodes et paramètre de mesure

Les spectres d'absorbance du colorant BC a été obtenu par spectrophotomètre de type UV- VIS 8500 TECHCOMP, de longueur d'onde entre 400 et 800 nm (lumière visible), ce qui a permis de déterminer la longueur d'onde optimale à laquelle l'absorbance est maximale; le spectre pour la concentration initiale de 50 mg.L⁻¹. (**Annexe**).

A partir du spectre, nous avons enregistré la longueur d'ondes (λ) pour la quelle l'absorbance est maximale :

colorant	λ (nm)
Bleu Cibacette	629

Suite à la détermination de λ , une courbe d'étalonnage a été tracée en **Annexe** afin de pouvoir estimer la concentration du BC en solution.

Le pourcentage d'élimination E% du colorant, est calculé par la relation suivante :

$$E\% = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

C_i et C_f : les concentrations initiales (avant traitement) et finales (après traitement) du colorant (en mg.L⁻¹).

III-4. Indicateurs liés à consommation d'énergie

Nous avons procédé à la calcul de la consommation énergétique de notre procédé, afin de comprendre les différences de la consommation d'énergie entre Al et Fe.

III-4-1. Rendement faradique

Le rendement faradique représente le rapport de ce que produit le courant consommé et de ce qui devrait être produit. Dans le cas présent, on le calcule en faisant le rapport de la quantité de métal dissous sur la quantité de métal devant être dissous selon la loi de Faraday.

Cette loi montre que la quantité d'ions métalliques dissous par oxydation anodique est directement proportionnelle à l'intensité imposée et à la durée d'électrolyse mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion émis. En effet :

$$m_{\text{théorique}} = \frac{M}{n} \times \frac{I \cdot t}{F}$$

Sachant que :

$m_{\text{théorique}}$: Masse théoriquement dissoute en g.

M : Masse molaire de l'ions considéré en g.mol⁻¹. (27 pour Al ; 56 pour Fe)

n : Nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée. (+3 pour Al ; +2 pour Fe)

I : Intensité imposée aux bornes des électrodes en A. (1.5 A)

t : Durée d'électrolyse en s. (1800 s) = 30 min ;

F : Constant de faraday=96485,3 C.mol⁻¹

Donc ; rendement anodique ou faradique (R_{anode}) :

$$R_{\text{anode}} = \frac{\text{Masse expérimentalement dissoute (g)}}{\text{Masse théorique donné par la loi de Faraday (g)}} \times 100$$

Toutefois, la quantité dissoute dépend également du nombre d'électrodes et par conséquent du mode de connexion monopolaire ou bipolaire. Dans le mode bipolaire, pour (p) électrodes, le système sous tension est constitué de (p-1) anode et la masse dissoute s'exprime alors de la façon suivante [71] : Dans les conditions bipolaire : g/h

$$m_{\text{théorique}} = \frac{M}{n} \times \frac{I \cdot t}{F} (p - 1)$$

II-4-2. Consommation d'énergie ou le coût énergétique

La consommation d'énergie a été calculée à partir des formules suivantes: Selon, El-Ashtoukhy (2009) [75] :

$$\text{Consommation d'énergie (kWhm}^{-3}\text{)} = \frac{VIt}{v(\text{litre})}$$

Où : V= la tension (volt) ; I= l'intensité (A) ; t= temps de traitement (h) ; v=Volume traité en litre.

CHAPITRE IV:

RESULTATS ET DISCUSSIONS

INTRODUCTION

Introduction

L'industrie textile est de gros consommateur d'eau et utilise des colorants organiques pour colorer leurs produits. Ces colorants synthétiques sont à la fois toxiques et responsables de la coloration des eaux [1]. En particulier, les problèmes de coloration ont un impact psychologique important sur la population. Ainsi, les rejets colorés posent un problème esthétique, et sanitaire [2].

Les colorants synthétiques réclament des traitements spécifiques. Cependant, les procédés classiques utilisés par les usines de traitement des eaux usées sont mal, et parfois même pas, adaptés à la dépollution de ces polluants biocides [3]. Différentes techniques physicochimiques sont valables pour le traitement des eaux colorées (coagulation, oxydation chimique avancée, adsorption sur charbon actif, etc.), mais les coûts assez élevés de ces procédés limitent leur utilisation et stimulent la recherche d'un procédé moins onéreux [4].

Cependant, la technologie électrochimique peut intervenir comme une étape de purification de différents effluents industriels (gaz, liquide et solide) afin d'en diminuer les concentrations en composés toxiques tel que les colorants.

L'électrocoagulation (EC) est une technique électrochimique qui présente les avantages de la coagulation chimique par la formation in situ d'un agent coagulant qui permet d'éviter l'ajout de produit chimique tout en agissant directement sur l'effluent, même si celui-ci est fortement chargé. Cette méthode de traitement présente des propriétés de désinfection et permet une diminution des odeurs liées aux effluents industriels. En effet, L'EC comme méthode alternative a été développée pour minimiser les inconvénients des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées textiles [5].

Notre travail de recherche a comme objectif la décoloration d'un effluent textile synthétique par l'application de l'électrocoagulation. Dans ce contexte, l'étude a porté sur l'optimisation d'un système d'EC permettant la décoloration des effluents textiles synthétiques. En effet, l'optimisation a été effectuée pour un seul colorant anthraquinonique à savoir : le Bleu Cibacette (BC) en solution synthétique en utilisant deux types d'électrodes en fer et en Aluminium.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les performances du traitement par électrocoagulation, en utilisant deux types d'électrodes en Fe et en Al.

La comparaison est basée sur les paramètres qui ont une influence significative sur le traitement électrochimique. En effet et dans notre cas, les paramètres étudiés sont : la densité électrique et le pH. Les paramètres fixés : la vitesse d'agitation, la concentration initiale du colorant, la conductivité initiale.

Dans les conditions de l'optimisation pour chaque type d'électrode, on va comparer la consommation d'énergie

Durant l'optimisation le temps de traitement préalable est de 90 min et ça uniquement pour la distance inter-électrode, par la suite le temps de traitement est de 60 min.

IV-1. Effets de la distance inter-électrode

La distance inter électrode est un paramètre tout comme l'intensité appliquée, que nous pouvons imposer au système et qui n'est pas imposé par le système.

Nous avons fait varier ce paramètre de 2 à 6 cm lors de notre étude expérimentale. Les Figures IV-1 et IV-2 illustre l'influence de la distance inter-électrode sur le taux d'abattement de BC.

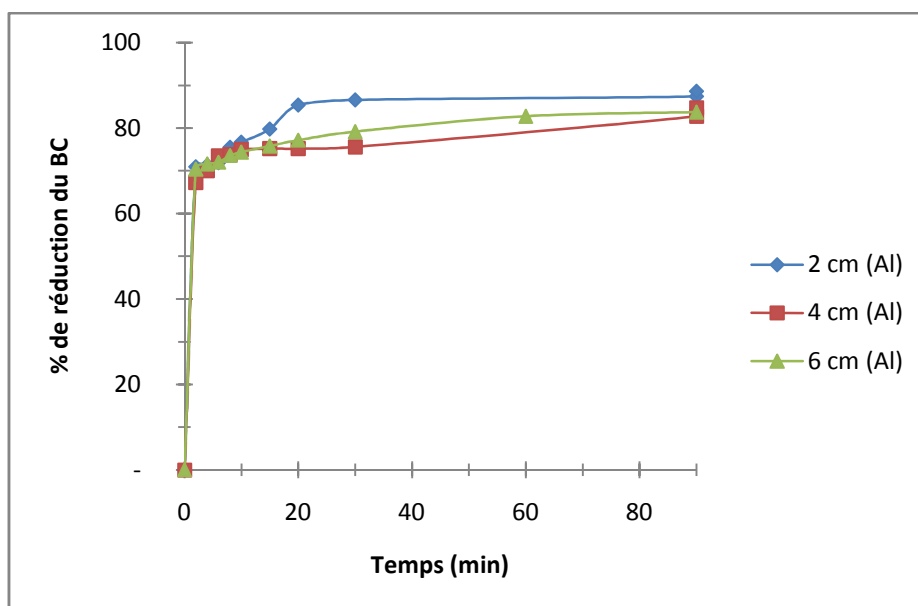


Figure IV-1: Influence de la distance inter-électrodes sur le taux d'élimination du colorant BC. électrode Al.

(Électrode en Aluminium ; distance inter-électrode = 2 à 6 cm ; vitesse d'agitation = 660 tr min⁻¹ ; densité de courant = 250 A/m² ; pH initial = de la solution entre 6 et 7,5 ; Conductivité = 2,7 mS.cm⁻¹ (2g NaCl) ; Concentration initial du colorant = 0,05g l⁻¹ ; Volume initiale de la solution = 0,8l ; Température ambiante).

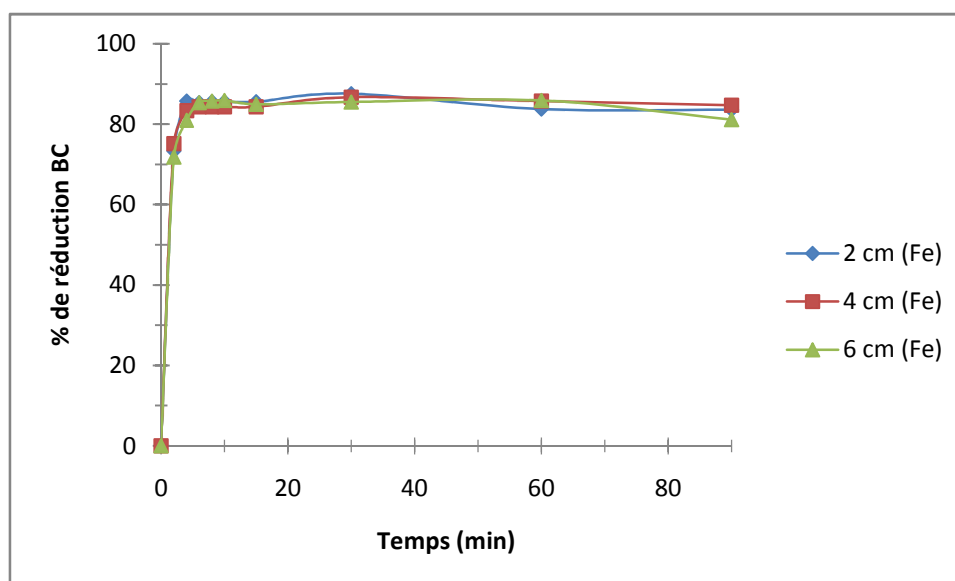


Figure IV-2 : Influence de la distance inter-électrodes sur le taux d'élimination du colorant BC. électrode Fe.

(Électrode en Fer ; distance inter-électrode = 2 à 6 cm ; vitesse d'agitation = 660 tr min⁻¹ ; densité de courant = 250 A/m² ; pH initial = de la solution entre 6 et 7,5 ; Conductivité = 2,7 mS.cm⁻¹ (2g NaCl) ; Concentration initial du colorant = 0,05g l⁻¹ ; Volume initiale de la solution = 0,8l ; Température ambiante).

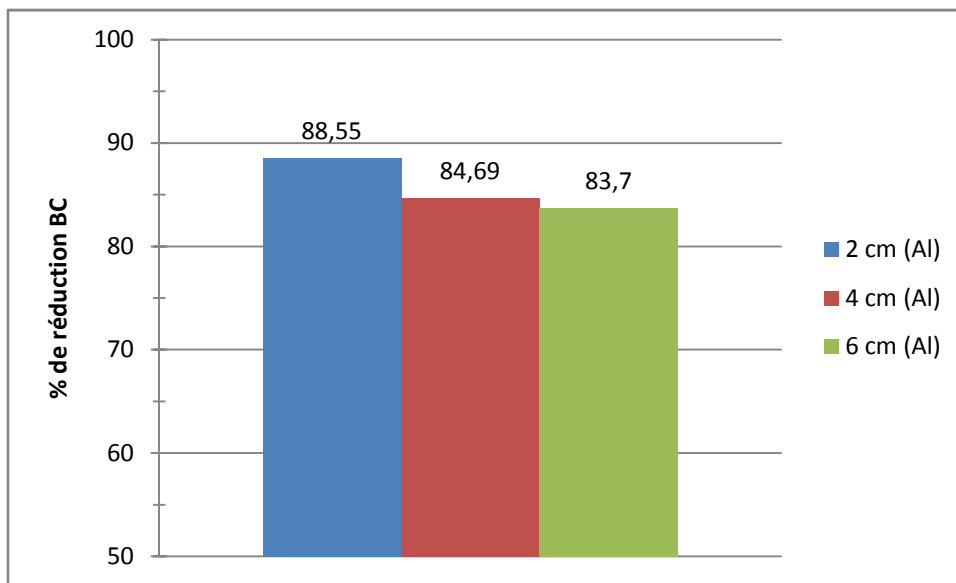


Figure IV-3: Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la distance inter-électrodes (cm) à t= 90min. électrode Al.

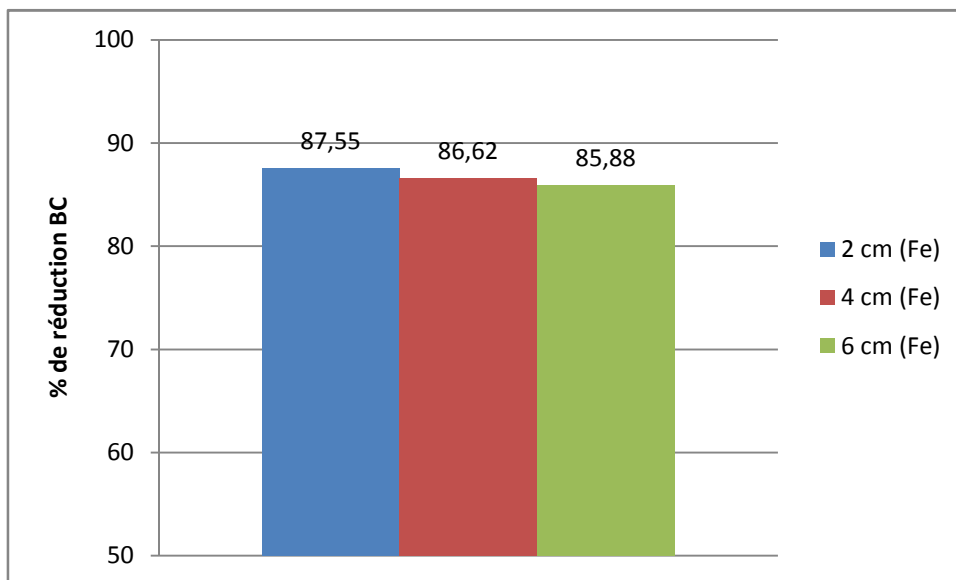


Figure IV-4: Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la distance inter-électrodes (cm) à t= 90min. électrode Fe.

D'après les Figures IV-1 et IV-2, et pour les deux types des électrodes les cinétiques de la décoloration de BC pour les différentes distances ont des allures similaires. En comparant le % de réduction du BC pour chaque distance et pour chaque type d'électrode, la différence non significative, avec un avantage à la distance 2 cm (Figure IV-3, IV-4).

La distance inter-électrode de 2 cm est maintenue pour la suite des expériences.

La distance inter-électrodes est en relation étroite avec la conductivité et la section de l'électrode [73]. Dans le dispositif où les électrodes planes sont placées en parallèle à une distance l'une de l'autre, nous avons :

$$R_s = \frac{d}{Ak}$$

Avec A qui représente la surface géométrique d'une face d'électrode et K la conductivité de l'électrolyte. En effet, la résistance ohmique de l'électrolyte R_s est en relation étroite avec la distance inter-électrode. Daneshvar et al., avancent l'hypothèse qu'avec l'augmentation de la distance inter-électrodes, il y aurait peu d'interactions possibles des ions avec les polymères hydroxydes [76]. Ainsi le taux d'oxydation anodique est empêché par l'augmentation de la conséquent la perte ohmique (résistance d'IR) [77].

Mameri et al., expliquent qu'au cours du procédé d'EC, lorsque les distances inter-électrodes sont faibles, la densité de courant devient très élevée et pourrait causer un court-circuit. La distance de 2 cm est généralement recommandée par plusieurs auteurs [78].

IV-2. Effets de la densité de courant

Les Figure IV-5, IV-6 , montrent l'évolution du taux l'élimination du colorant BC de la solution synthétique sous l'influence de la densité de courant au cours du traitement.

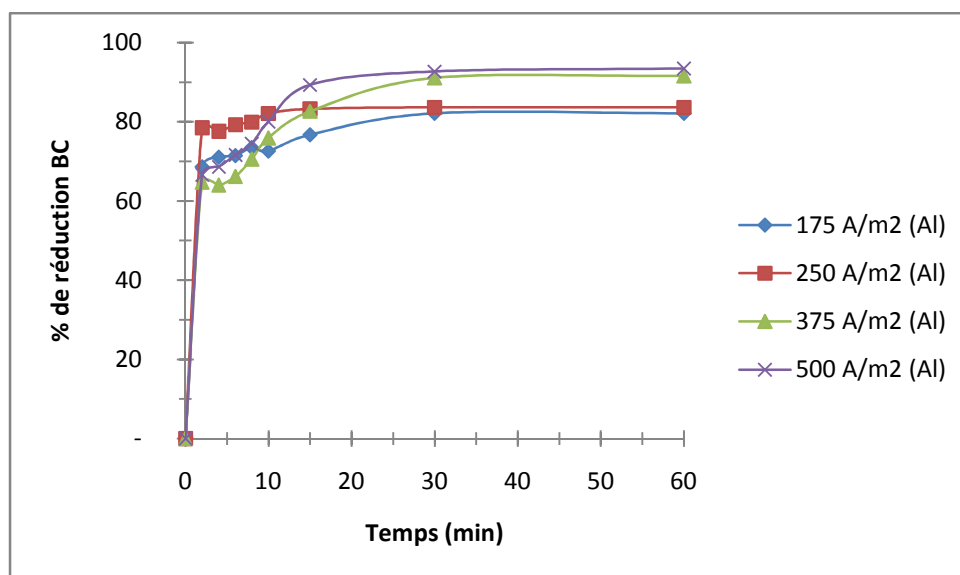


Figure IV-5: Influence de la densité de courant sur le taux d'élimination du colorant BC.

(Électrode en Aluminium ; distance inter-électrode= 2 cm ; vitesse d'agitation= 660 tr.min⁻¹ ; densité de courant de 175 à 500 A/m² ; pH initial= de la solution entre 6 et 7,5 ; Conductivité= 2,7 mS.cm⁻²(2g NaCl) ; Concentration initial du colorant= 0,05g l⁻¹ ; Volume initiale de la solution=0,8l ; Température ambiante).

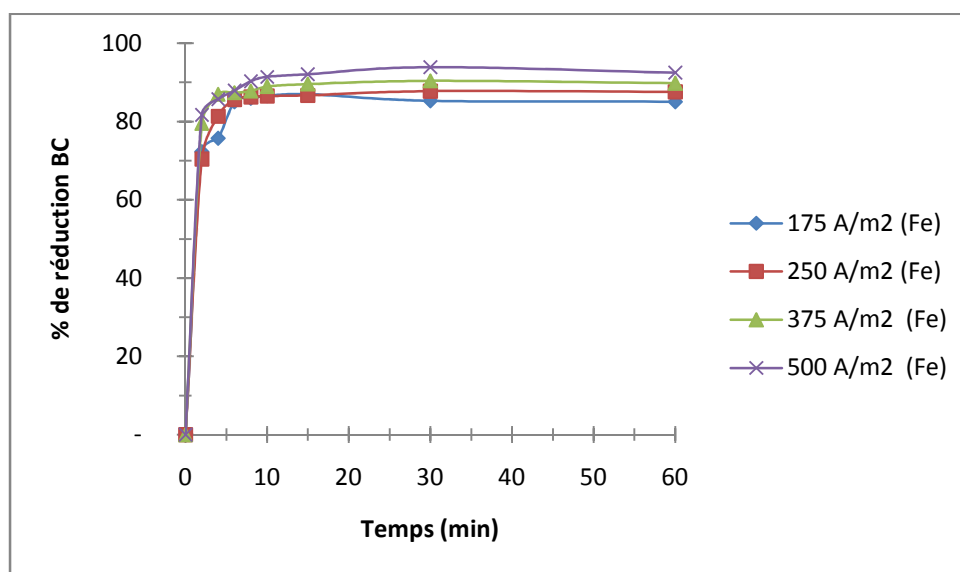


Figure IV-6: Influence de la densité de courant sur le taux sur le taux d'élimination du colorant BC. électrode Al.

(Électrode en Fer ; distance inter-électrode= 2 cm ; vitesse d'agitation= 660 tr.min⁻¹ ; densité de courant de 175 à 500 A/m² ; pH initial= de la solution entre 6 et 7,5 ; Conductivité= 2,7 mS.cm⁻²(2g NaCl) ; Concentration initial du colorant= 0,05g l⁻¹ ; Volume initiale de la solution=0,8l ; Température ambiante).

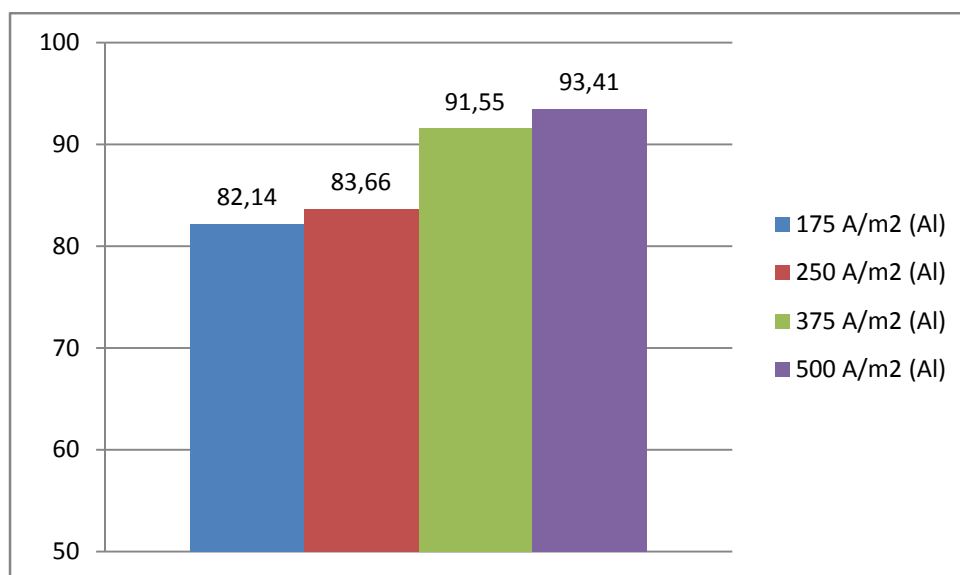


Figure IV-7 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la densité de courant (A/m²) à t=60min. électrode Al.

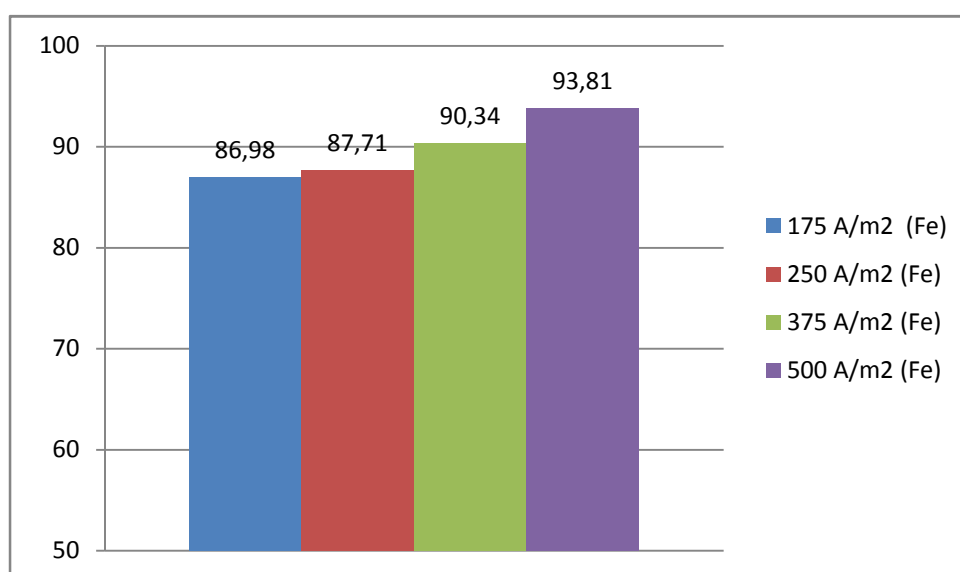


Figure IV-8 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction de la densité de courant (A/m²) à t=60min. électrode Fe.

Nous constatons que la cinétique du taux d'élimination du colorant BC varie en fonction du temps et de la densité de courant. Plus la densité de courant est élevée et plus le taux de décoloration est important. Au bout de 20 min nous constatons le premier palier ; après, les grandes densités de courant ont donné les meilleurs rendements Les Figure IV-5, IV-6.

Néanmoins, au bout de 30 minutes de traitement la décoloration se ralentit: pour les différentes densités étudiées (175 à 500 A/m²) le taux d'élimination atteint est de 82 à 93 % pour les électrodes aluminium et de 86 à 93% pour les électrodes fer (Figure IV-7, IV-8).

Une différence d'environ 10% ce qu'il indique la grande influence de la densité de courant sur le traitement. Plus la densité de courant est élevée et plus cette réduction est rapide et importante.

Ainsi, à des densités de courant élevées, la dissolution anodique de l'aluminium augmente, entraînant un taux plus important de précipités nécessaires pour l'élimination des polluants [44].

Il est à noter que le niveau de la production de bulles de gaz augmente, leurs tailles diminuent avec l'augmentation de l'intensité du courant appliqué, ce qui peut être bénéfique pour une grande performance d'élimination du polluant par flottation à l'hydrogène [79].

Les électrons étant les principaux réactifs impliqués dans les réactions électrochimiques, la vitesse des réactions électrochimiques est proportionnelle à la densité de courant appliquée. Ainsi, l'augmentation du courant circulant dans la cellule, et par le fait même de la densité de courant, augmente généralement le rendement chimique en accélérant les échanges d'électrons entre les électrodes et le milieu.

Toutefois, cette augmentation du courant peut favoriser d'autres réactions secondaires, ce qui a pour conséquence de diminuer le rendement faradique. En effet, les réactions secondaires, principalement l'évolution de H₂ sont alors augmentées.

Nous avons retenu pour la suite des expériences, la densité de courant de $i = 250 \text{ A/m}^2$ qui correspond à l'intensité de courant de 1A.

IV-3. Effet du pH

Dans l'électrocoagulation/électroflotation, le pH de la solution est connu pour jouer un rôle important dans l'élimination des polluants [80]. La variation du taux d'élimination du BC à différentes valeurs initiales de pH, est présentée dans les Figures IV-9 et IV-10 Où nous avons fait varier le pH dans une gamme allant de 2 à 12, tout en gardant les autres facteurs constants.

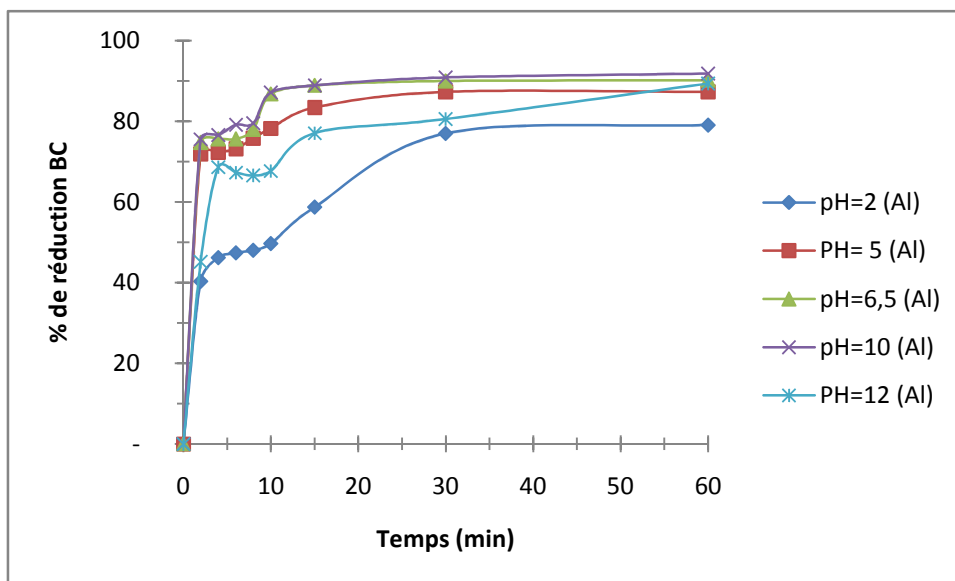


Figure IV-9 : Influence du pH sur le taux d'élimination du colorant BC.

(Électrode en Aluminium ; distance inter-électrode= 2 cm ; vitesse d'agitation= 660 tr.min⁻¹, densité de courant= 250 A/m² ; **pH initial de 2 à 12** ; Conductivité= 2,7 mS.cm⁻¹(2g NaCl) ; Concentration initial du colorant= 0,05g l⁻¹ ; Volume initiale de la solution=0,8l ; Température ambiante).

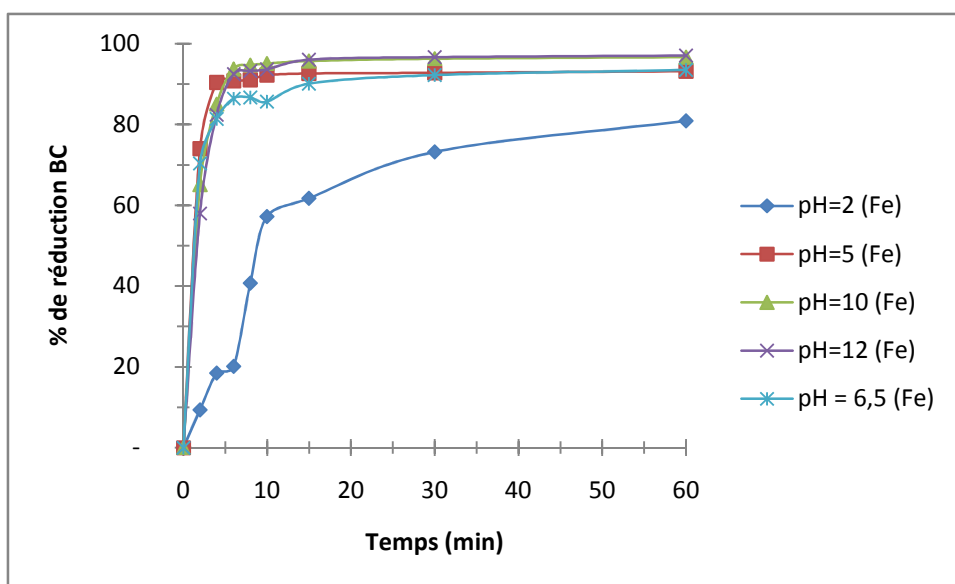


Figure IV-10 : Influence du pH sur le taux d'élimination du colorant BC.

(Électrode en Fer ; distance inter-électrode= 2 cm ; vitesse d'agitation= 660 tr.min⁻¹, densité de courant= 250 A/m² ; **pH initial de 2 à 12** ; Conductivité= 2,7 mS.cm⁻¹(2g NaCl) ; Concentration initial du colorant= 0,05g l⁻¹ ; Volume initiale de la solution=0,8l ; Température ambiante).

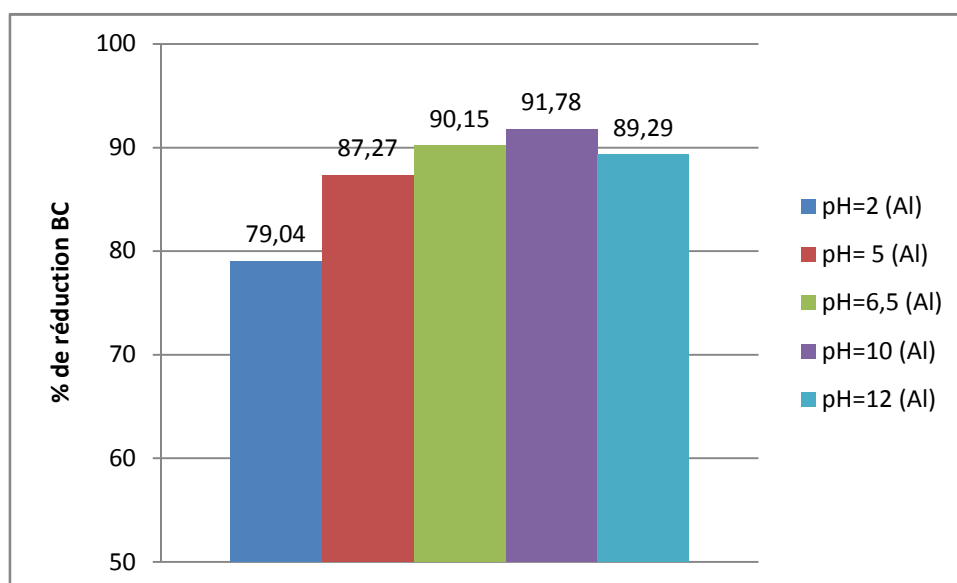


Figure IV-11 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction du pH initial.60 min. électrode Al.

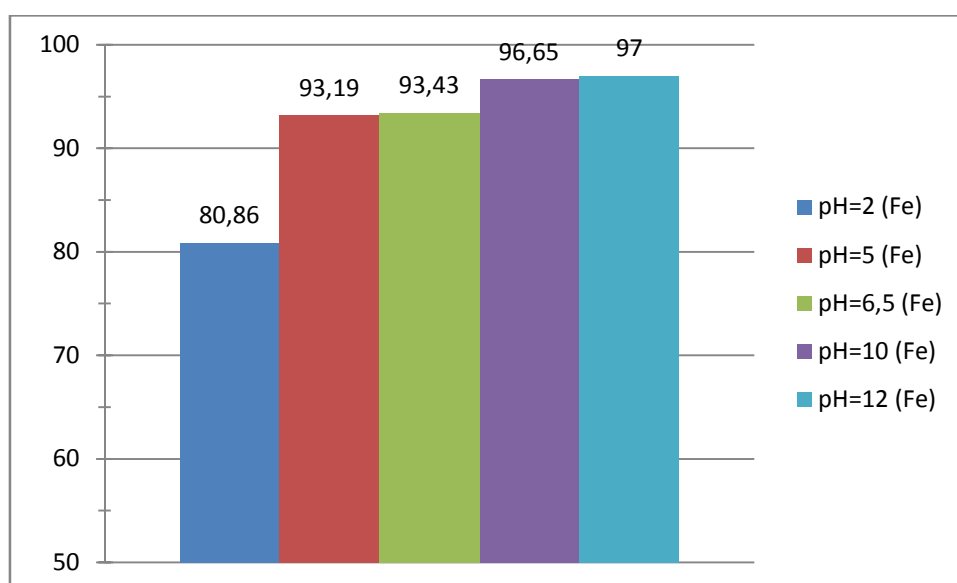


Figure IV-12 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction du pH initial.60 min. électrode Fer.

Le taux de décoloration maximum est d'environ 79%, 87%, 90 %, 91%, et 89%, Dans le cas des électrodes en Aluminium. Et il est d'environ 80%, 93%, 93%, 96% et 97% dans le cas des électrodes en Fe. Et ça pour pH de 2 ; 5 ; 6,5; 10 et 12, respectivement(de la solution) .

A la lecture de ces résultats, l'EC en utilisant le Fer donne les meilleurs taux de décoloration par rapport l'EC en utilisant l'Aluminium où la différence est significative surtout à des pH basiques (Figures IV-11, IV-12).

On va garder le pH initial de la solution sans ajout d'un acide ou base puisque les taux de décoloration BC sont acceptables pour les deux types des électrodes.

L'ampleur de l'hydrolyse d' Al^{3+} dépend du pH. À un pH faible, Al^{3+} est favorisé dans la solution. L'effet de coagulation n'est pas significatif, ce qui se traduit par un faible rendement d'élimination du BC [80, 73].

Le pH augmente au cours du traitement et que cette augmentation est d'autant plus importante que la densité de courant est élevée. Cette augmentation du pH quel que soit le matériau d'électrode est due à la production d'ions OH^- par la cathode. [73]

un diagramme d'hydrolyse de l'aluminium en fonction du pH a également été proposé ; il est représenté sur la figure IV-13:

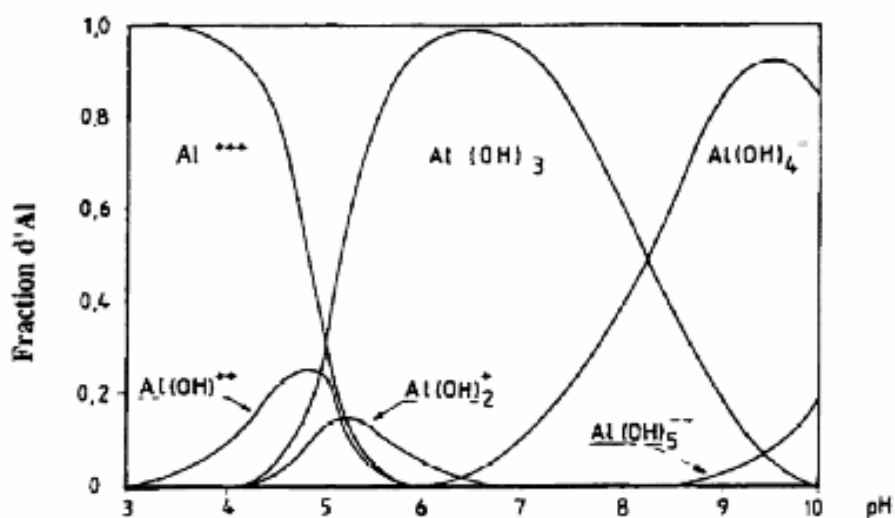


Figure VI-13: Hydrolyse de l'aluminium en fonction du pH [81].

Des mécanismes d'interactions sont possibles simultanément entre les molécules de colorants et les produits d'hydrolyse, et les niveaux dépendent du pH du milieu et les types d'ions présents. Deux mécanismes majeurs sont considérés: précipitation et adsorption ; chacun est proposé pour un intervalle de pH différent [82].

- Précipitation :

Colorant + Al- monomérique \rightarrow [Colorant- Al- monomérique] _(s) pH=4,0-5,0

Colorant + Al- polymérique \rightarrow [Colorant – Al- polymérique] _(s) pH=5,0-6,0

- Adsorption :

Colorant +Al (OH)₃ _(s) \rightarrow [particule]

[Colorant- Al- polymérique] + Al (OH)₃ _(s) $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ [particule] pH>6.5

IV-4. Consommation d'énergie

Afin d'évaluer énergétiquement notre unité d'électrocoagulation, nous avons procédé au début à la détermination de la dissolution des électrodes par le biais de la notion du rendement faradique. Et après on a estimé la consommation d'énergie.

Mais avant ça, et dans les conditions d'optimisation, et selon les résultats en dessus on a diminué le temps à 30 min au lieu de 60 min, et on a travaillé avec une intensité de courant 1,5 A qui correspond à la densité de courant 375 A/m².

IV-4.1. Les essais optimums

Les résultats montrent (figures VI-14, VI-15) un taux d'élimination du bleu cibacette similaire entre l'Aluminium et fer ainsi que le milieu basique ou sans ajustement de pH.

Le taux de décoloration est entre 94% à 96% durant 30 min de traitement.

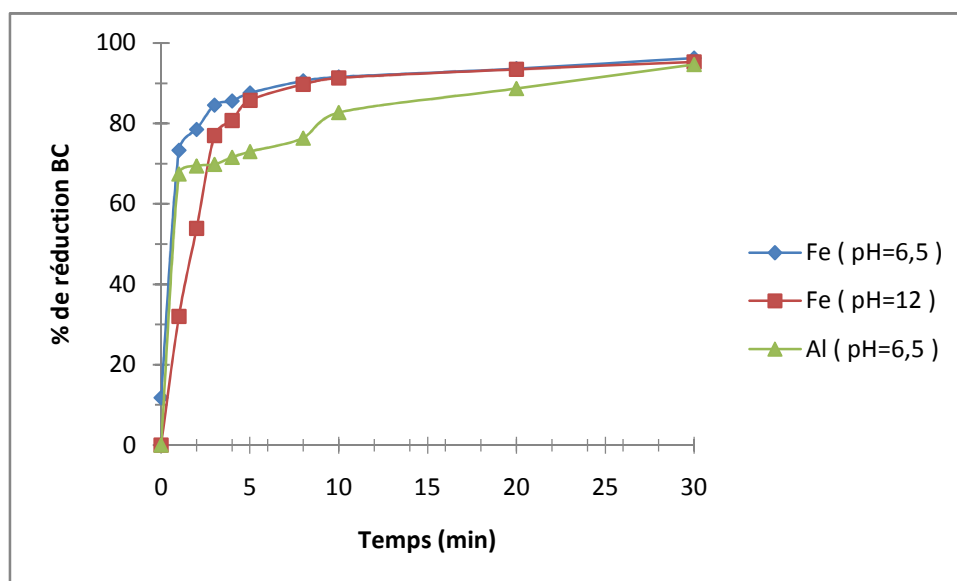


Figure IV-14 : Influence du pH sur le taux d'élimination du colorant BC.

(Électrode en Fer et aluminium ; distance inter-électrode= 2 cm ; vitesse d'agitation= 660 tr.min⁻¹, densité de courant= 375 A/m² ; pH initial; Conductivité= 2,7 mS.cm⁻¹(2g NaCl) ; Concentration initial du colorant= 0,05g/l ; Volume initiale de la solution=0,8l ; Température ambiante).

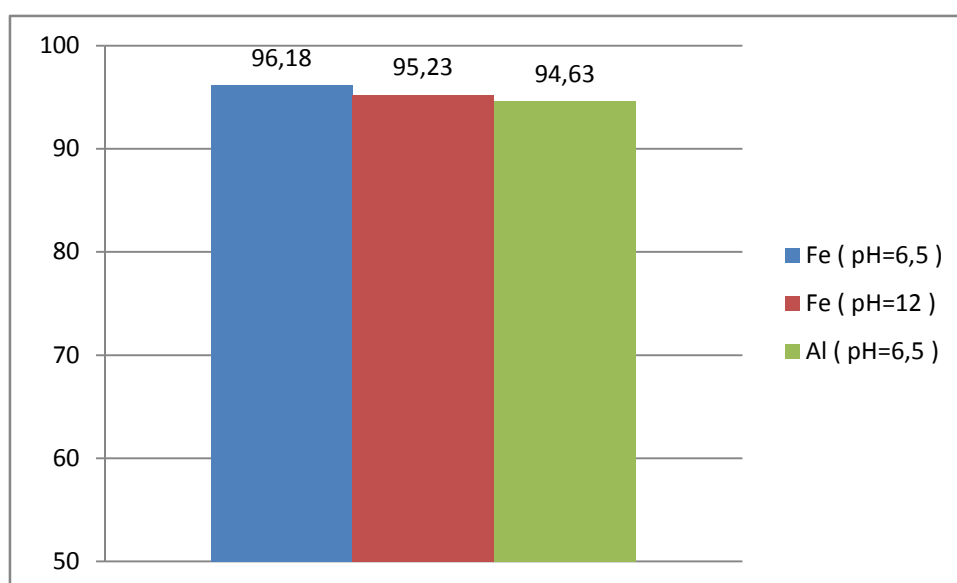


Figure IV-15 : Evolution du taux d'élimination du colorant BC en fonction du pH initial.30 min. électrode Fer et Al.

IV-4.2. Rendement faradique

L'histogramme suivant (Figure IV-16) présente une comparaison entre les électrodes de fer et d'aluminium dans le sens du rendement faradique (anodique).

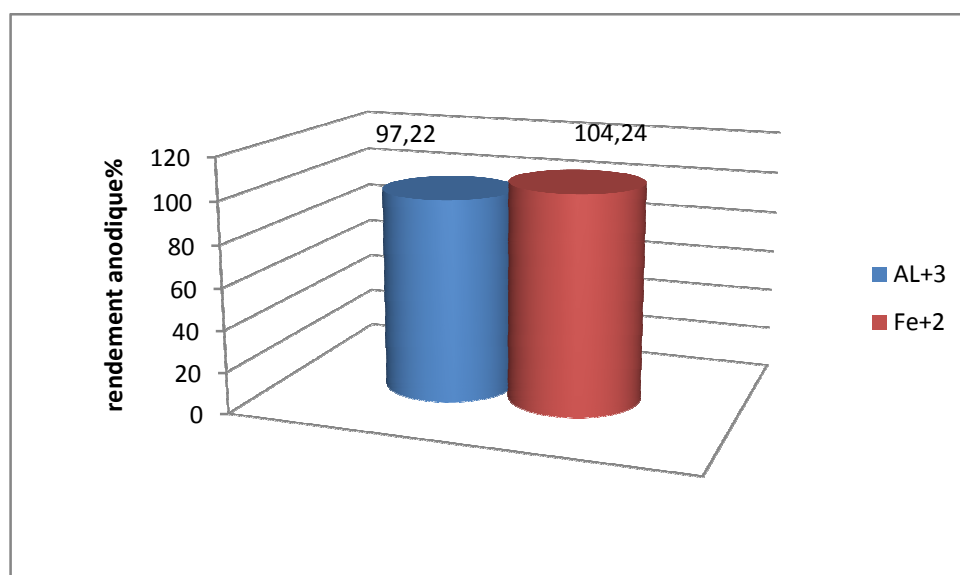
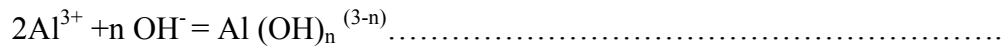


Figure VI- 16 : Comparaison entre aluminium (Al³⁺) et le Fer (Fe²⁺) en le sens du rendement faradique.

Nous avons un rendement faradique supérieur à 100% pour l'électrode Fe, et autour de 97% pour l'électrode Aluminium. Picard et al. (2000), Affirme qu'un rendement d'environ 120% et attribue à la production d'ions Al⁺) [83]. Ainsi que, la sur-dissolution anodique à la corrosion par piquation suites à la présence des ions chlorure [84].

Pour les deux types d'électrodes, nous pouvons expliquer ces observations par les relations suivantes :

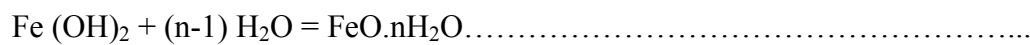
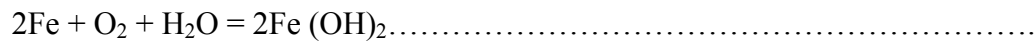
Dans l'eau l'ion trivalent Al³⁺ se présente sous la forme hydratée Al(H₂O)₆³⁺ mais on l'écrit sous la forme Al³⁺ pour simplifier l'écriture. L'ion Al³⁺ réagit avec l'eau en attirant les ions OH⁻ pour former des complexes anioniques, cationiques ou neutres selon la réaction suivante :



Selon les différents stades d'oxydation, le fer présente des couleurs différentes (Moreno et al., 2007) [91] :

- l'oxyde ferreux hydraté ou l'hydroxyde ferreux

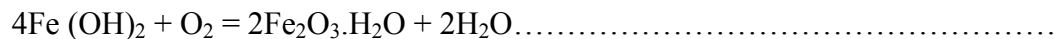
Ce composé consiste en une oxydation de fer en présence d'eau pour former dans un premier temps l'hydroxyde ferreux puis ensuite la réaction se poursuit en présence d'eau toujours pour donner l'oxyde ferreux hydraté. Les réactions sont les suivantes :



Les sels ferreux ont une couleur verte mais du fait de la présence de l'oxygène, l'oxyde prend une couleur verte très sombre.

- l'oxyde ferrique hydraté ou l'hydroxyde ferrique

À la surface extérieure soumise aussi à la corrosion, l'exposition à l'air par la présence d'oxygène convertit l'oxyde ferreux en oxyde ferrique selon la réaction suivante :



Cet oxyde est de couleur orange à tendance rouge-brune pouvant être très sombre. Donc, le fer possède l'avantage d'avoir les deux mécanismes de réaction d'oxydation que ça soit avec Fe^{+2} ou Fe^{+3} ce qui favorise la complexation avec les polluants.

IV-5.1. Consommation d'énergie du procédé d'électrocoagulation

Nous avons procédé au calcul de la consommation d'énergie ou le coût énergétique. Les résultats obtenus par l'aluminium et le fer sont présentés sur les Figures VI- 17 :

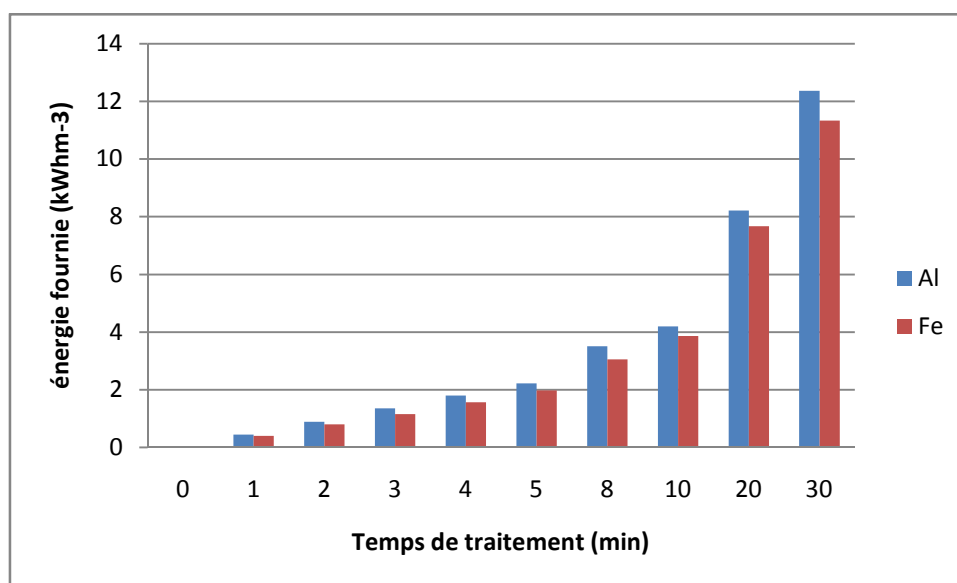


Figure VI-17 : Consommation de l'énergie (kWhm-3)

D'après ces résultats nous observons que l'évolution de la consommation d'énergie présente la même allure de variation pour les deux types des électrodes (Fer et Aluminium). Il apparaît d'après la figure 17a que lors de traitement, les électrodes en aluminium sont plus énergivores que celle du fer avec des taux de décoloration de 94% Al et 96% Fe. Ces résultats sont confirmés par Bayramoglu, qui ont obtenu que le fer induit une plus faible consommation d'énergie alors que l'aluminium conduit à une plus faible consommation des électrodes mais plus cher en coût d'utilisation [85].

En effet la consommation d'énergie est pratiquement la même pour les deux types d'électrodes, avec un avantage aux électrodes en fer, elle est de l'ordre de 12 kWh/m^3 (Al) et de 11 kWh/m^3 (Fe) à la fin du traitement.

Durant le traitement, on a remarqué l'augmentation de la température pour les deux électrodes (Figure VI-18).

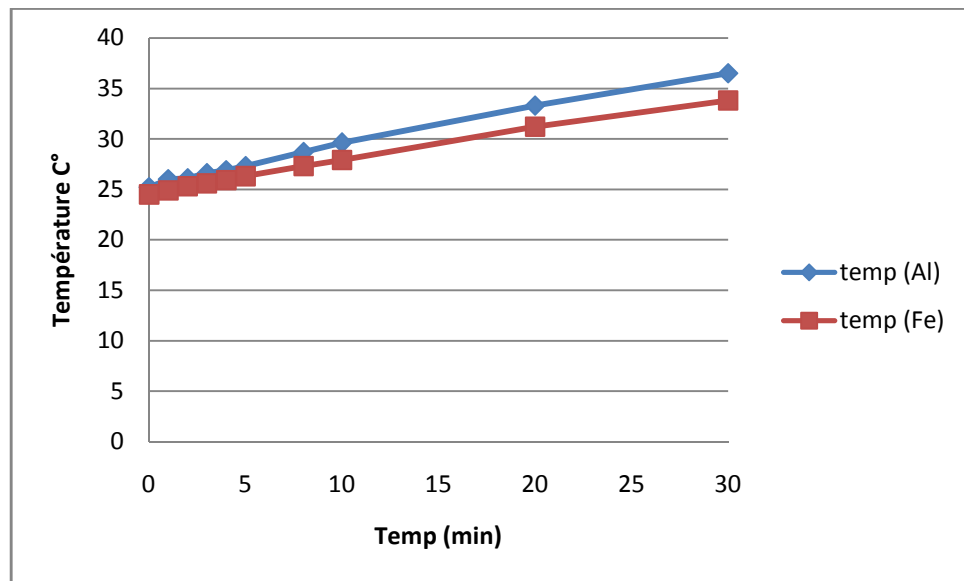


Figure VI-18 : Evolution de la température C°.

Cette figure montre que les températures varient de 11,3 C° pour l'aluminium et de 9,3 C° pour le fer.

Afin de comprendre les variations de la température pour chaque intervalle du temps, on a tracé les courbes suivantes (**Figure VI-19**).

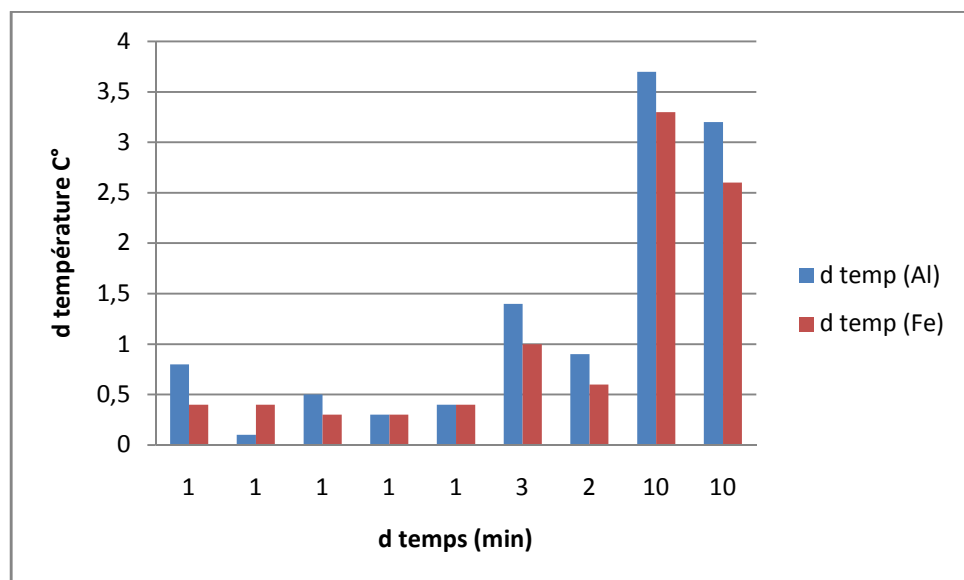


Figure VI-19 : Variation des températures pour chaque intervalle du temps. (Temps de traitement 30 min).

En effet, le traitement avec les électrodes en Al dégage plus de chaleur par rapport au fer.

Afin d'expliquer la consommation d'énergie, on a calculé les variations de la consommation d'énergie en basant sur la dérivée. En effet, pour chaque intervalle de temps (Δt) on a estimé le (ΔE) où E c'est l'énergie totale.

La **Figure VI-20** montre les variations de la consommation d'énergie entre chaque intervalle de temps.

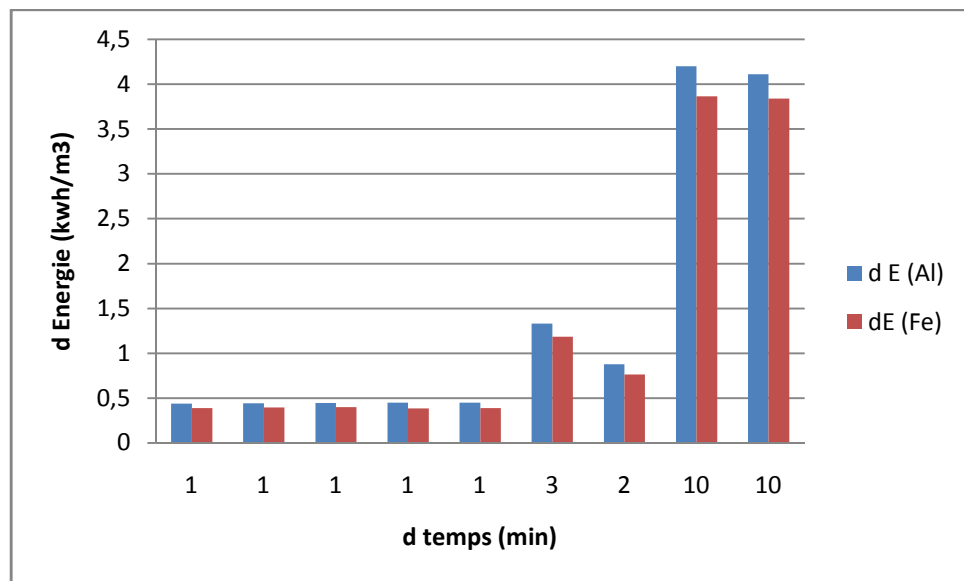


Figure VI-20 : Variations de la consommation d'énergie entre chaque intervalle de temps. (Temps de traitement 30 min).

D'après la figure en dessus on a remarqué une augmentation stable de l'énergie entre chaque intervalle de temps à savoir $0,4 \text{ kWh/m}^3$ pour les première 5 min pour l'Al et $0,3 \text{ kWh/m}^3$ pour les première 5 min pour l'Al.

D'après les **Figures VI-19, VI-20** on a remarqué une relation étroite entre la consommation d'énergie et la température.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Le traitement par l'électrocoagulation d'une solution contenant un colorant textile le bleu cibacette en utilisant deux types des électrodes en aluminium et en fer, est l'objectif de ce travail.

En premier lieu, un travail d'optimisation et de comparaison entre les électrodes en fer et en aluminium des paramètres du procédé de l'électrocoagulation a été réalisé. Ça par le suivie des cinétiques des taux de décoloration, durant le traitement, d'une solution synthétique préparée à partir du Bleu Cibacette (BC) à raison de 0,05g/l.

Les résultats obtenus montrent que la distance inter-électrode 2 cm donne meilleur taux de décoloration et ça pour Al et Fer. La densité de courant et le pH ont un effet très significatif sur les performances du procédé d'électrocoagulation. La comparaison entre les électrodes est basée sur ces deux paramètres.

Les paramètres optimum de l'électrocoagulation sont : densité de courant =375 à 500 A/m², pH initial 6 à 7 (de l'eau distillée)

a la gamme basique du pH. On a remarqué que le fer donne meilleur résultats à pH basique par rapport au l'aluminium.

En effet, Le taux de décoloration du Bleu Cibacette obtenu est d'environ 97% à pH =12, dans le milieu basique au bout de 60 min, et ça avec le Fer. Pour l'aluminium un taux de décoloration autour de 90%.

En deuxième lieu, les essais optimums et dans les conditions du pH de la solution et la densité de courant 375 A/m² et durant 30 min, donnent des résultats similaires pour les deux types des électrodes, environ 95%.

Dans les conditions de ces essais optimums, le rendement faradique indique que le fer à la meilleure dissolution par rapport à l'aluminium. La consommation d'énergie est de 12 kWh /m³ pour l'aluminium et de 11 kWh /m³ pour le fer.

Nous pouvons dire que notre réacteur d'EC est efficace à 95% en moyenne pour le traitement des solutions contenant BC, avec un avantage en utilisant les électrodes en fer par rapport aux électrodes en Aluminium.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] T. Rana, S. Gupta, D.Kumar, S. Sharma, M. Rana, VS. Rathore, Ben M.J. Pereira, « Toxic effects of pulp and paper-mill effluents on male reproductive organs and some systemic parameters in rats », *Environ. Toxicol. Pharmacol*, 18 (2004) 1-7.
- [2] A. Reffas, « Étude de l'adsorption de colorants organiques (rouge nylosan et bleu de méthylène) sur des charbons actifs préparés à partir du marc de café », Thèse de Doctorat, Université Mentouri-Constantine, (2010).
- [3] S. Hemsas, « Contribution à l'étude de la decoloration des eaux sur grignons d'olives valorisés », Etude dynamique, Mémoire de magister, Université M'hamed Bougara Boumerdès, (2008).
- [4] B. Wang, W. Kong, H. Ma, « Electrochemical treatment of paper mill wastewater using three-dimensional electrodes with Ti/Co/SnO₂-Sb₂O₅ anode », *J. Hazard Mater B* 146 (2007) 295–301.
- [5] S. Benchaita, « Contribution au traitement des effluents textiles par electrocoagulation monopolaire et bipolaire », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach-Alger, (2007) 1-2.
- [6] R. Perrin, JP. Scharff, « Chimie Industrielle ».Tome2. Edition Masson, Paris 1995.
- [7] M.N. CREPY, « Dermatoses professionnelles aux colorants ». DMT, fiche d'allergologie-dermatologie professionnelle, INRS, 4e trimestre, 2004.
- [8] M. Falandrin-Bletty « Technologie et chimie des textiles ».
- [9] CAR/PP, « Prévention de la pollution dans l'industrie textile dans la région méditerranéenne », Centre d'Activités Régionales pour la Production Propre, (CAR/PP), (2002).
- [10] Wikipedia, « Industrie textile », <http://fr.wikipedia.org>. (2011).
- [11] A. Benbekhma, « Influence de l'ennoblissement des articles de coton sur le dégagement du formaldéhyde ». Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougera Boumerdès, (2008).
- [12] UNIVERSALIS, « Les colorants », Encyclopédie , (2003).
- [13] M. Capon, V. Courilleu, C. Valette, « Chimie des couleurs et des odeurs », Nantes, Culture et technique, (1999).
- [14] U. Pagga, D. Brown, « The degradation of dyestuffs part II: behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests ». *Chemosphere* 15 (1986) 479-491.

- [15] L. Zhenwang, L. Zhenluc, L.jranjan, « The pat dye molecular structure and its chromophoric lumnescentes mechanisme ». 15th word conference on non-destructive testing 15-21 october (2000), Rome.
- [16] M. Dore, « Chimie des oxydants et traitement des eaux ». Paris. Edition (1989).
- [17] INRS, « Colorants réactifs dans le secteur de l'ennoblissement textile : pathologie allergique liées à leur utilisation », Document pour le médecin de travail, N°85, 1er trimestre, (2001).
- [18] INRS, « Dermatoses professionnelles aux colorants », Document pour le médecin de travail, N°100, 4ème trimestre, (2004).
- [19] A.B. Dos Santos, « Reactive decolourisation of deys by thermophilic anaerobic granular sludge », Thèse de Doctorat, Wageningen University, (Pays-Bas), (2005).
- [20] N. Mathur, P. Bhatnagar, P. Bakre, « Assessing mutagenicity of textile dyes from Pali (Rajasthan) using ames bioassay ». Applied Ecology and environmental Research , 2005, 111-118.
- [21] E. Z. Guivarch, « Traitement des polluants organiques en milieu aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée, électro-Fenton, application à la minéralisation des colorants synthétiques », Thèse de Doctorat, Université de Marne- La- Vallée, (2004).
- [22] S. Barclay, C. buckley, « Waste minimization guide for the textile industry, astep towards cleaner production », The pollution research group, University of Natal Durban, South Africa, For the South African: Water Research Commission, V 1 (2000).
- [23] P.C. Vendevivere, Bianchi, W. Vertraete, « Treatment and creuse form the textile wet-processing industry: review of emerging technologies », J. Chem. Techn. Biotechn, V 72 (1998) 289-302.
- [24] J.S. Taylor, et E.P. Jacobs, « Water treatment membrane processes » , New York: McGrew-Hill, V.P (1996) 01-9.
- [25] A. Kesraoui-Abdeessalem, N. Oturan, N. Bellakhal, M. Dachraoui, M. A. Oturan, « Experimental design methodology applied to electro-Fenton treatment for degradatoion of herbicide chlortoluron », Appl. Catal. B:Environ, V 78 (2007) 334-341.
- [26] B. Van der bruggen, L. Lejon, C. Vandecasteele, « Reuse, Traitement and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes », Environ. Sci. Techn, V 37, n° 17, (2003) 3733-3738.

- [27] C. Anselme, E.P. Jacobs, « Water treatment membrane processes », New York: McGraw-Hill, (1996) 401-1087.
- [28] C. Raghavacharya, « Colour removal from industrial effluents-a comparative review of available technologies », Chem. Eng. World, V 32 (1997) 53-54.
- [29] O.J. Hao, H. Kim, P.C. Chiang, « Decolorization of wastewater », Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. V 30, n° 4 (2000) 449-505.
- [30] E. Neyens, J. Baeyens, M. Weemaes, B. De heyder, « Pilot-scale peroxidation(H_2O_2) of sewage sludge », J. Hazard. Mat. B, (2003) 91-106.
- [31] K. Hamada, M. Nishizawa, D. Yoshida, M. Mitsuishi, « Degradation of an azo dye by sodium hypochlorite in aqueous surfactant solutions », Dyes and Pigments, V.33 (1998) 313-322.
- [32] M. Adnosinda, M. Martins, L.J.D. Nelson, M.J Queiroz « Comparative studies of fungal degradation of single or mixed bioaccessible reactive azo dyes », Chromosphere, V.52 (2003) 967-973.
- [33] A.G. Lopez, Valade, B. Combourieu, I. Mielgo, B. Bouchon, J.M. Lema, « Mechanism of the enzymatic degradation azo dyes », Chromosphere, V 52 (2003) 967-973.
- [34] R.C. Loher, « Pollution control for agriculture », New York, NY, (1997) 382.
- [35] R. Tafer, « photodegradation directe et induite de micro-polluants organiques (cas d'un colorant azoïque) », Mémoire de Magister, université Mentouri-Constantine, (2007).
- [36] T. Picard, « Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation », thèse de doctorat, universités de Limoges (2000).
- [37] P.K. Holt, G. W. Barton, C. A. Mitchell « The future of electrocoagulation as a localised water treatment technology », Chemosphere, 59,13, (2005) 355-367.
- [38] R. Lewandowski, « l'elcoflot ou l'électro-coagulo-flottation », Cebedeau Belgique Octobre, N° 407 (1977) 351-363.
- [39] F. Ghribi, « Traitement des rejets de papeterie par procédé électrochimique », Mémoire de Magister, école nationale polytechnique d'Alger, (2011), p 23.
- [40] M.A.Y. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga, D.L. Cocke, « Electrocoagulation (EC) — science and applications », Journal of Hazardous Materials, B84 (2001) 29–41.
- [41] M. J. Matteson, R.L. Dobson, R.W. Glenn Jr., N.S. Kukunoor, W.H. Waits, E.J. Clayfield, « Electrocoagulation and separation of aqueous suspension of ultrafine particles », Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspect, V 104 (1995) 101-109.

- [42] M.Y. Mollah, P. Morkovsky, J.A.G. Gomes, M. Kesmez, J. Parga, D.L. Cocke, « Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation », *J. Hazard. Mater.*, B114 (2004)199–210.
- [43] P.K. Holt, G.W. Barton, M. Wark, C.A. Mitchell, « Electrocoagulation as a wastewater treatment », *The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event.*, (1999), pp.23-26.
- [44] J. Labanowski, « Matière organique naturelle et anthropique : vers une meilleure compréhension de sa réactivité et de sa caractérisation », Thèse de Doctorat, Université De Limoges, (2004).
- [45] M. Kobya, O.C. Taner, M. Bayramoglu, « Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes », *J. Hazard. Mater.*, B100 (2003)163–178.
- [46] F. Bouhezila, « Traitement des eaux polluées d'un nouveau type de reacteurs électrochimiques ». Mémoire de Magister, école nationale polytechnique d'Alger, (2007), p 26.
- [47] M. D. Trong « Mise au point du fonctionnement d'un réacteur pilote à anode en lit fluidise pour les traitements des effluents industriels par oxidation électrochimique », Thèse de maîtrise, Université de Moncton, (1999).
- [48] M. Murugananthan, R. Bhaskar, S. Prabhaskar, « Separation of pollutants from tannery effluents by electroflotation », *Sep. Purif. Technol.*, (2004) 69-75.
- [49] O. Annane, « Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire », Mémoire de Magister, Université Mouloude Mammeri de Tizi-ouzou, (2008), p 43.
- [50] G. Feuillade, S. Gueraude, Y. Brizard, C. Lahitte, « L'électrocoagulation et la production d'eau potable : faisabilité, intérêt et performance », 4eme congrés international GRUTTEE 22-23 novembre, Limoges (2001).
- [51] S. Demim, « Traitement de l'ultrafiltrat de margine par combinaison de l'électrocoagulation et de la boue activée », Mémoire de Magister, école nationale polytechnique d'Alger, (2007), p 32.
- [52] T. H. Kim, C. Park, E. B. Shin, S. Kim, « Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process », *Desalination* 150 (2002) 165- 175.
- [53] V. Laforest, Technologies propres, « Méthodes de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents », Application aux ateliers de traitement de surface. Institut national des sciences appliquées de Lyon, Thèse de doctorat, (1999).

- [54] R. Bejankiwar, J.A. Lalman, R. Seth, N. Biswas, «Electrochemical degradation of 1,2-dichloroethane (DCA) in a synthetic groundwater medium using stainless-steel electrodes, *Wat. Res.*, 39 (2005) 4715- 4724.
- [55] J Q. Jiang. N. Graham, C. André, G.H. Kelsall, N. Brandon, « Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment, *Wat. Res.*, 36 (2002) 4064- 4078.
- [56] C. Tsouri, D.W. De Paoli, T.J. Shor, T-Y. Ying, M Z-C. Hu, « Electrogoagulation for magnetic seeding of colloidal particles ». *Colloids Surface, A : Physicochem. Engi. Aspects* 177 (2001)223- 233.
- [57] M. Bayramoglu, M. Kobya, O.T. Can, M. Sozbir, « Operating cost of electrocoagulation of textile dye wastewater », *Sep. Purif. Technol.*, 37 (2004) 117- 125.
- [58] M. Murugananthan, G.B. Raju, S. Prabhakar, «Separation of pollutants from tannery effluents by electroflotation», *Separ. Purif. Technol.*, 40 (2004) 69- 75.
- [59] K. Jumpatong, W. Phutdhawong, D. Buddhasukh, « Dechlorophyllation by Electrocoagulation », (2006) 156-162.
- [60] M. Ugurlu, A. Gurses,C. Dogar,M. Yalcin, « The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation», *J. Environ. Manag.*, (2007).
- [61] S. Khoufi, F. Feki, S. Sayadi, «Detoxification of olive mill wastewater by electrocoagulation and sedimentation processes», *J. Hazard. Mater.*, (2007) 58-67.
- [62] C.A. Martínez-Huitle, E. Brillas, « Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods», a general review, *Appl. Catal, B* 87 (2009) 105–145.
- [63] I. Ayhan Şengil, M. Özacar, «The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes», *J. Hazard. Mater.*, 161 (2009) 1369–1376.
- [64] P. Durango-Usuga, F. Guzmán-Duque, R. Mosteo, M. Vasquez, G. Peñuela, R. Torres-Palma, «Experimental design approach applied to the elimination of crystal violet in water by electrocoagulation with Fe or Al electrodes», *J. Hazard. Mater.*, 179 (2010) 120–126.
- [65] N. Daneschvar, H. Ashassi-Sorkhabi, A. Tizpar, «Decolourization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*»,(2003), 153-162.
- [66] A. Aleboye, N. Daneshvar, M.B. Kasiri, « Optimization of C.I. acid red 14 azo dye removal by electrocoagulation batch process with surface response methodology », *Chem. Eng. Process.* 47 (2008) 827–832.

- [67] N. Daneshvar, A.R. Khataee, A.R. Amani Ghadim, M.H. Rasoulifard, « Decolorization of C.I acid yellow 23 solution by electrocoagulation process», investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption, *J. Hazard. Mater.* 148 (2007) 566–572.
- [68] M. Zaied, N. Bellakhal, « Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry », *J. Hazard. Mater.* 163 (2009) 995–1000.
- [69] Y. Meas, J. Ramirez, M. Villalon, T. Chapman, « Industrial wastewaters treated by electrocoagulation, *Electrochimical*», 55 (2010) 8165–8171.
- [70] I. Kabdaşlı, B. Varda, I. Arslan-Alaton, O. Tünay, «Effect of dye auxiliaries on color and COD removal from simulated reactive dye bath effluent by electrocoagulation», *Chem. Eng. J.*, 148 (2009) 89–96.
- [71] J.Q. Jiang, N. Graham, C. André, G.H. Kelsall, N. Brandon «Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment». *Wat. Res.*, 36 (2002) 4064- 4078
- [72] M. Bennajah, « Electrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse .N° d'ordre : 2558 (2007) Pp: 201.
- [73] I. Zongo, « Etude expérimentale et théorique du procédé d'EC: Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie ». Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Lorraine.INP: NANCY., (2009) p 224.
- [74] M D. Trong «Mise au point du fonctionnement d'un réacteur pilote à anode en lit fluidise pour les traitements des effluents industriels par oxidation électrochimique», Thèse de maîtrise, Université de Moncton, (1999).
- [75] E.-S.Z. El-Ashtoukhya, N.K Amina, O. Abdelwahabb « Treatment of paper mill effluents in a batch-stirred electrochemical tank reactorv». *Chemical Engineering Journal*, (2009). 146, 205–210.
- [76] N. Daneschvar, H. Ashassi-Sorkhabi, A. Tizpar, «Decolourization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*»,(2003), 153-162.
- [77] D. Ghosh, C.R. Medhi, H. Solanki, M. K. Purkait, «Decolorization of Crystal Violet Solution by Electrocoagulation», *Journal of environmental protection science*, V 2 (2008) pp. 25 – 35.
- [78] N. Mameri, A.R. Yeddou, H. Lounici, D. Belhocine , H. Grib, B. Bariou, «Defluoridation of septentrional Sahara water of north Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes», *Water Research*, (1998), 1604-1612.

- [79] N. Adhoum, L. Monser, N. Bellakhal, J.E. Belgaied, « Treatment of electropolating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr^{3+} by electrocoagulation», J. Hazardous. Mater., (2004) 207-213
- [80] P.K. Holt, G.W. Barton, M. Wark, C.A. Mitchell, «A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, Colloïds Surface., A 221(2002) 248-223
- [81] F. Edeline, « L'épuration physico- chimique des eaux». Editions Cebedoc, Liège, (1996).
- [82] O.T. Can, M. Bayramoglu, M. Kobay, « Decolourisation of reactive dye solutions by electrocoagulation using aluminium electrodes», Industrial and engineering chemistry research, (2003) 3391-3396
- [83] T. Picard, Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application l'électrocoagulation, *thèse de doctorat*, universités de Limoges (2000).
- [84] H.A. Moreno, D.L. Cocks, J.A.G. Gomes, P. Morkovsky, J.R. Parga, E. Peterson, C. Garcia, « Electrochemistry behind electrocoagulation using iron electrodes » . ECS Transactions, (2007). 61-15.
- [85] 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).

ANNEXE

ANNEXE

A-1. Spectres d'absorbance du Bleu Cibacette, brun Solophényle et Rouge Citrylon

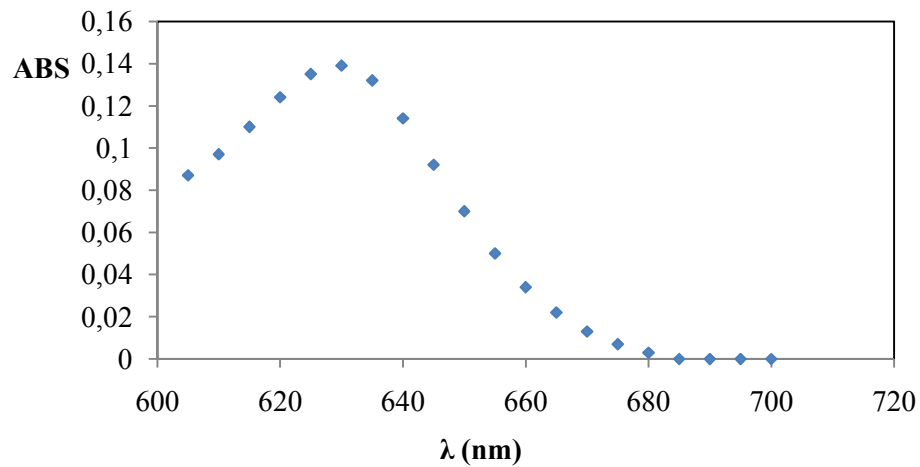


Figure A-1-1: Spectres d'absorbance du Bleu Cibacette

A-2. Courbe d'étalonnage du Bleu Cibacette

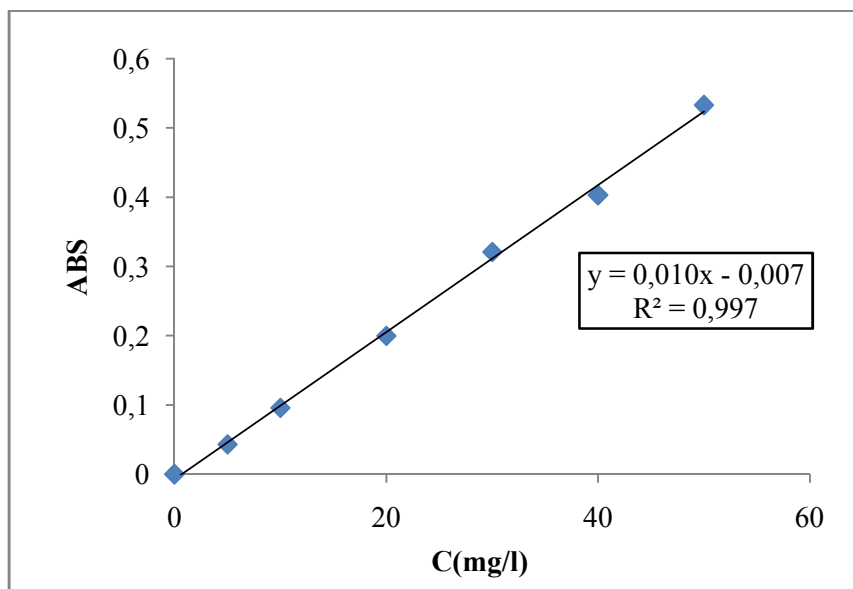


Figure A-2-1: Courbe d'étalonnage de Bleu Cibacette.