

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département du génie de l'environnement
Laboratoire des Biotechnologies Environnementales et Génie des Procédés
(BIOGEP)



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



MEMOIRE DE MAGISTER

Pour l'obtention du grade de
Magister en génie de l'environnement

Option : Biotechnologie

Thème :

**Contribution au traitement des effluents textiles par
Electrocoagulation Monopolaire et Bipolaire**

Etudié par :

M^{elle} Samira BENCHAITA
Ingénieur en Biologie (USTHB)

Président du jury :	R.KERBACHI	Professeur	E.N.P.
Directeurs de mémoire :	N.MAMERI	Professeur	E.N.P.
	R.BOUARAB	Maître de conférences	E.N.P.
Examineurs :	K.MOUSSAOUI	Professeur	E.N.P.
	H.LOUNICI	Maître de conférences	E.N.P./U.M.M.TO
	M.DROUCHE	Maître de conférences	E.N.P.

Année Universitaire 2006 – 2007

DEDICACES

A ma famille,

A mes amis, ici et ailleurs,

A ceux qui m'ont aidé à comprendre,

Sans vous tous, ma vie serait sans couleurs ...

Remerciements

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur Hakim LOUNICI, Directeur du Laboratoire des Biotechnologies Environnementales BIOGEP de l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur le Professeur Nabil MAMERI, pour leur accueil au sein du laboratoire, leurs conseils et leur suivi durant mes années à l'école polytechnique.

Je remercie mes deux directeurs de mémoire, Monsieur le Professeur Nabil MAMERI et Monsieur Rabah BOUARAB Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour leur suivi durant la réalisation de ce travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le professeur KERBACHI pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ma soutenance.

Je suis très honorée de compter parmi les membres du jury Madame le professeur MOUSSAOUI de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Monsieur DROUCHE Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Monsieur LOUNICI, Maître de Conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Je remercie profondément Madame ABDI et Madame DJABRI pour leur soutien moral.

Mes remerciements vont également à Monsieur AHMED ZAID, Monsieur Nadjib DROUCHE et Madame Hassiba LARIBI.

Enfin, je suis heureuse de remercier mes camarades du département de l'environnement, en particulier du laboratoire des biotechnologies, pour les bons moments passés ensemble.

A la mémoire de Madame Djamil BELHOCINE-MAMERI.

SOMMAIRE

Introduction.....	1
Partie Théorique	
Chapitre I- L'eau, « l'or bleu », sa pollution !.....	3
I-1- Introduction	3
I-2- Principales sources de pollution de l'eau.....	3
I-2-1- Effluents urbains.....	4
I-2-2- Effluents industriels.....	4
I-2-3- Pollution d'origine agricole.....	4
I-2-4- Phénomènes naturels.....	4
I-3- Conséquences de la pollution.....	5
I-3-1- Conséquences sanitaires.....	5
I-3-2- Conséquences écologiques.....	5
I-3-3- Conséquences esthétiques.....	5
I-3-4- Conséquences industrielles.....	6
I-3-5- Conséquences agricoles.....	6
I-4- Les polluants présents dans l'eau.....	6
I-4-1- Les sels minéraux.....	6
I-4-2- Les acides et alcalis.....	6
I-4-3- Les matières en suspension.....	6
I-4-4- Les matières organiques.....	7
I-4-5- Les matières inhibitrices.....	7
I-4-6- Les déchets solides divers.....	7
I-4-7- Les détergents synthétiques.....	7
I-4-8- Les matières colorantes.....	8
I-4-9- La pollution thermique.....	8
Chapitre II- La pollution industrielle textile.....	9

II-1- Description de l'industrie textile.....	9
II-1-1- L'activité mécanique.....	9
II-1-2- La finition textile.....	9
II-2- Utilisation de l'eau dans l'industrie textile.....	11
II-3- Caractéristiques des effluents industriels textiles.....	11
Chapitre III- Les colorants.....	12
III-1- Introduction.....	13
III-2- Utilisation des colorants	13
III-3- Les colorants employés dans l'industrie textile.....	14
III-3-1- Généralités.....	14
III-3-2- Nature des colorants.....	14
III-3-3- Classification des colorants synthétiques.....	15
III-3-3-1- Classification chimique.....	16
III-3-3-2- Classification tinctoriale.....	18
III-4- Colorants textiles, environnement et santé humaine.....	22
III-4-1- Eutrophisation.....	22
III-4-2- Couleur, turbidité, odeur.....	22
III-4-3- La persistance.....	23
III-4-4- La bioaccumulation.....	23
III-4-5- Toxicité pour différentes espèces.....	23
III-4-6- Santé humaine.....	24
Chapitre IV- Traitements des colorants.....	25
IV-1- Introduction.....	25
IV-2- Méthodes physiques.....	26
IV-2-1- Filtration sur membrane	26
IV-2-2- Adsorption.....	26
IV-3- Méthodes chimiques : Procédés d'oxydation avancée.....	27
IV-3-1- L'ozonation.....	28
IV-3-2- L'oxydation Fenton.....	28

IV-3-3- Procédés d'oxydation photocatalytiques.....	29
IV-4- Méthodes biologiques.....	30
Chapitre V- Coagulation et Electrocoagulation.....	31
V-1- Introduction.....	31
V-1-1- Type des colloïdes.....	31
V-1-2- Structure des colloïdes (théorie de la double couche).....	32
V-2- La Coagulation- Flocculation.....	33
V-2-1- La coagulation.....	33
V-2-2- La flocculation.....	33
V-3- Electrocoagulation.....	35
V-3-1- Définition.....	35
V-3-2- Théorie de l'électrocoagulation.....	35
V-3-3- Description de la technique d'électrocoagulation.....	36
V-3-3-1- Electrodes monopolaires.....	37
V-3-3-2- Electrodes bipolaires.....	38
V-3-4- Avantages de l'électrocoagulation.....	39
V-3-5- Inconvénients de l'électrocoagulation.....	40
V-3-6- Utilisation de l'électrocoagulation	40
Partie Expérimentale	
Chapitre VI- Matériels et Méthodes.....	42
VI-1- Matériels.....	42
VI-1-1- Effluent synthétique.....	42
VI-1-2- Effluent réel.....	43
VI-1-3- Dispositif expérimental.....	43
VI-2- Méthodes.....	44
Chapitre VII- Résultats et Discussion.....	47

VII-1- Application de l'électrocoagulation.....	47
VII-1-1- Expériences « tests ».....	47
VII-1-2- Effet de la salinité.....	49
VII-1-3- Effet de la densité de courant.....	58
VII-1-4- Effet du pH initial.....	63
VII-1-5- Effet de la concentration initiale du colorant.....	72
VII-1-6- Effet de la distance inter- électrodes.....	76
VII-1-7- Effet du nombre d'électrodes, EC bipolaire.....	81
VII-2- Application de l'électrocoagulation à un rejet réel.....	87
Conclusion.....	96
Références Bibliographiques.....	98
Annexe.....	105

Liste des abréviations :

BH : Bleu Hydrone.

BC : Bleu Cibacrone

BS : Bleu Sandocryl

JS : Jaune Sandocryl

RS : Rouge Sandocryl

C_i : Concentration initiale

I : intensité de courant (Ampère)

i : densité de courant (intensité par unité de surface)

A : Absorbance

λ : longueur d'onde

nm : nanomètre

d_i : distance inter- électrodes

cm : centimètre

N : nombre d'électrodes

E% : pourcentage d'élimination.

ECM : électrocoagulation monopolaire

ECB : électrocoagulation bipolaire

PM : poids moléculaire

Liste des figures :

Figure 1 : Aperçu synoptique des différentes matières textiles.....	10
Figure 2 : Représentation du colloïde hydrophile.....	31
Figure 3 : Distribution ionique autour d'un colloïde.....	32
Figure 4 : Schéma du procédé d'électrocoagulation	36
Figure 5 : Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires	37
Figure 6 : Connexion en série d'électrodes monopolaires	38
Figure 7 : Connexion des électrodes bipolaires	39
Figure 8 : Montage du dispositif d'électrocoagulation.....	43
Figure 9 : Spectres d'absorbance du Bleu Hydrone et du Bleu cibacrone	44
Figure 10 : Spectres d'absorbance du Bleu Sandocryl, Jaune Sandocryl et Rouge Sandocryl.....	45
Figure 11 : Cinétique de traitement d'une solution de BH par ECM.....	48
Figure 12 : Cinétique de traitement d'une solution de BC par ECM.....	48
Figure 13 : Influence de la concentration en NaCl sur l'élimination du BH.....	50
Figure 14 : Influence de la concentration en NaCl sur l'élimination du BC.....	51
Figure 15 : Evolution du taux d'élimination du BH en fonction de la teneur en sel.....	52
Figure 16 : Evolution du taux d'élimination du BC en fonction de la teneur en sel.....	52
Figure 17 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction du sel	57
Figure 18 : Evolution des temps nécessaires pour 80% et 90% d'élimination du BC en fonction du sel.....	57
Figure 19 : Influence de I sur l'élimination du BH.....	59
Figure 20 : Influence de I sur l'élimination du BC.....	60
Figure 21 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de l'intensité de courant.....	62
Figure 22 : Evolution des temps nécessaires pour 90% et 95% d'élimination du BC en fonction de l'intensité de courant.....	62
Figure 23 : Influence du pH initial sur l'élimination du BH.....	64
Figure 24 : Influence du pH initial sur l'élimination du BC.....	65
Figure 25 : Pourcentage d'élimination du BH selon pH initial.....	66
Figure 26 : Pourcentage d'élimination du BC selon pH initial.....	66
Figure 27 : Répartition molaire du fer II en fonction du pH.....	67
Figure 28 : Répartition molaire du fer III en fonction du pH.....	68

Figure 29 : Hydrolyse de l'aluminium en fonction du pH.....	69
Figure 30 : Evolution du pH_f en fonction du pH_i du BH et du BC.....	70
Figure 31 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH, en fonction du pH_i	71
Figure 32 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BC en fonction du pH_i .	71
Figure 33 : Influence de la concentration initiale en colorant BH.....	73
Figure 34 : Influence de la concentration initiale en colorant BC.....	74
Figure 35 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de sa concentration initiale.....	75
Figure 36 : Evolution des temps nécessaires pour 95% et 80% d'élimination du BC en fonction de sa concentration initiale.....	76
Figure 37 : Influence de la distance inter- électrodes sur l'élimination du BH.....	77
Figure 38 : Influence de la distance inter- électrodes sur l'élimination du BC.....	78
Figure 39 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de la distance inter- électrodes.....	79
Figure 40 : Evolution des temps nécessaires pour 80% et 95% d'élimination du BC en fonction de la distance inter- électrodes.....	80
Figure 41 : Influence du nombre d'électrodes sur l'élimination du BH.....	82
Figure 42 : Influence du nombre d'électrodes sur l'élimination du BC.....	83
Figure 43 : Pourcentage d'élimination du BH et densité de courant en fonction de la surface des électrodes	84
Figure 44 : Pourcentage d'élimination du BC et densité de courant en fonction de la surface des électrodes	85
Figure 45 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction du nombre d'électrodes.....	86
Figure 46 : Evolution des temps nécessaires pour 95% et 80% d'élimination du BC en fonction du nombre d'électrodes.....	86
Figure 47 : Evolution du taux d'élimination des colorants du rejet ($I=0.5A$, $pH_i=5.2$).....	88
Figure 48 : Evolution du taux d'élimination des colorants du rejet ($I=1A$, $pH_i=5.2$).....	89
Figure 49 : Evolution du taux d'élimination des colorants du rejet ($I=1A$, $pH_i=4$).....	90
Figure 50 : Taux d'élimination des colorants du rejet.....	92
Figure 51 : Evolution du pH du rejet en fonction du temps ($I=0.5A$, $pH_i=5.2$).....	93
Figure 52 : Evolution du pH du rejet en fonction du temps ($I=1A$, $pH_i=5.2$).....	94
Figure 53 : Evolution du pH du rejet en fonction du temps ($I=1A$, $pH_i=4$).....	94

Liste des tableaux :

Tableau I : Les principaux groupes chromophores et auxochromes	15
Tableau II : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants.....	25
Tableau III : Caractéristiques des colorants chimiques employés.....	42
Tableau IV : Composition de l'effluent réel.....	43

INTRODUCTION

En l'espace d'un siècle, la consommation mondiale d'eau a considérablement augmenté. Estimée à 400 milliards de m³ en 1990, elle s'élevait à 7000 milliards de m³ en 2001 (Zawlotzki, 2004).

Les établissements industriels reçoivent une quantité importante d'eau qui, tout en restant absolument nécessaire à leur bonne marche, n'est qu'en très faible partie réellement consommée. Une bonne part (dans la plupart des cas) sert de fluide de refroidissement, une autre sert à entraîner les déchets qu'il est nécessaire d'éliminer au cours du déroulement des processus en cause. Le développement prodigieux de l'activité industrielle, la multiplicité de son domaine d'intervention, l'apparition de nouveaux corps de synthèse ignorés de la nature font de l'industrie un générateur redoutable, puissant et diversifié de pollution (Gomella et Gherrée, 1978).

Les eaux résiduaires industrielles (ERI) ont généralement une composition spécifique et directement liée au type d'industrie considéré (Koller, 2004).

L'industrie textile est une des industries les plus polluantes en terme de volume et complexité de composition de ses effluents, surtout les effluents de bains de teinture ; Ces derniers sont caractérisés par des pH extrêmes (acides ou alcalins), une température très élevée, une grande concentration en matières colorantes...

Le rejet des agents colorants dans l'eau est particulièrement indésirable non seulement à cause de leur aspect inesthétique et leur impact sur la photosynthèse des plantes aquatiques, mais aussi parce que plusieurs colorants utilisés dans l'industrie textile et leurs métabolites sont toxiques (mutagènes, carcinogènes, tératogènes...) pour les êtres vivants. Sans traitement adéquat, ces colorants resteraient dans l'environnement pendant de très longues périodes.

Les méthodes traditionnelles de traitement des eaux usées textiles consistent en de nombreuses combinaisons de procédés biologiques, physiques et chimiques. Les procédés biologiques de traitement sont souvent inefficaces pour l'élimination des colorants qui sont des polymères superstructurés et peu biodégradables.

Différentes techniques physicochimiques sont aussi valables pour le traitement des eaux colorées (coagulation, oxydation chimique avancée, adsorption sur charbon actif...), mais les coûts assez élevés de ces procédés limitent leur utilisation et stimulent la recherche d'un procédé moins onéreux.

Ainsi, l'électrocoagulation (EC) comme méthode alternative a été développée pour minimiser les inconvénients des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées textiles.

L'objectif de notre travail est d'appliquer l'EC bipolaire au traitement des eaux colorées (d'abord synthétisées au laboratoire, ensuite issues d'un rejet réel) ainsi qu'étudier les paramètres influençant ce procédé.

Au cours des différents chapitres de cette étude, il sera présenté ce qui suit :

- Dans une partie bibliographique, une description de l'industrie textile, la classification des colorants textiles et la nécessité de les traiter...
- Dans une partie expérimentale, l'étude spectrophotométrique des colorants choisis pour nos expériences, l'influence des conditions opératoires sur l'élimination de ces colorants par EC, ainsi que les mécanismes de réactions.
- Enfin, le procédé d'EC bipolaire sera appliqué pour le traitement d'un effluent textile réel.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

***L'EAU, « L'OR BLEU »
...SA POLLUTION !***

I-1- Introduction :

Source et milieu de vie, solvant de lavage et de transport de minéraux, régulateur thermique, l'eau possède des propriétés remarquables et essentielles à tous les êtres vivants. La majeure partie de l'eau se trouve dans les océans (97%), le reste est dans la glace et la neige notamment aux pôles (2%) et dans les nappes phréatiques (moins de 1%). Les lacs et les fleuves ne contiennent qu'un dix millièmes et l'atmosphère un cent millièmes de l'eau libre (Ngô et Regent, 2004).

Bien que nous, êtres humains, reconnaissons l'importance de l'eau, nous la dégradons en polluant nos rivières, lacs et océans. Ainsi, doucement mais sûrement, nous altérons notre planète au point où des organismes meurent à un taux très alarmant (Krantz et Kifferstein, 2005).

Les déversements polluants peuvent modifier profondément les composantes physico-chimiques des milieux aquatiques récepteurs. La définition de la pollution soulève cependant quelques difficultés et désaccords.

Les eaux naturelles ont en effet un degré de pureté très variable, depuis les eaux de fonte de neige ou de glace jusqu'aux eaux issues de marécages très chargées en matière organique. D'autre part, une eau chimiquement pure n'est pas favorable au développement de la vie.

La notion de pollution ne se réfère donc pas à la « pureté » des eaux, mais aux modifications de leurs caractéristiques dues aux actions humaines (Pesson, 1980).

La pollution de l'eau est donc une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques, elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu aquatique (Lenntech, 2004).

I-2- Principales sources de pollution de l'eau :

On peut utiliser divers critères de classification, reposant sur l'origine, la nature des polluants, la nature des nuisances créées (répercussions sur la santé publique, sur l'équilibre écologique en rivière ou en lac...).

Le critère reposant sur l'origine de pollution aquatique nous permet de distinguer quatre sources principales :

I-2-1- Effluents urbains :

Ils proviennent des eaux de ruissellements (essentiellement les eaux de pluies et de lavage des chaussées..), des eaux résiduaires d'origine domestique (eaux de cuisine, de lavage des locaux...etc.) et des eaux résiduaires d'activités artisanales (exemple : rejets divers provenant de petites entreprises) (Roques, 1979).

I-2-2- Effluents industriels :

Trois grands groupes peuvent être considérés :

*Eaux à caractère minéral dominant (eaux de lavage des gravières et toutes activités d'extraction de minéraux, eaux des usines chimiques minérales...).

*Eaux à caractère organique dominant (surtout le cas des industries agro-alimentaires, abattoirs, conserveries, laiteries et fromageries, brasseries, sucreries ...).

*Eaux de caractéristiques mixtes (effluents des industries textiles, papeteries et industries du bois, industries pharmaceutiques, industries mécaniques...).

I-2-3- Pollution d'origine agricole :

Ce type de pollution intéresse les eaux de ruissellement et concerne deux familles de composés : les pesticides et les engrais.

*Pollution par les pesticides : regroupe les herbicides, les fongicides, les insecticides...

*Pollution par les fertilisants, entraînant une augmentation nette des teneurs en nitrates et en phosphates dans les eaux courantes et les eaux de nappe (Roques, 1979).

I-2-4- Phénomènes naturels :

Certains auteurs considèrent que divers phénomènes naturels sont aussi à l'origine de pollution (par exemple, une irruption volcanique, un épanchement sous-marin d'hydrocarbures, le contact avec des filons géologiques (métaux, arsenic), une source thermo minérale...etc. (Gaujous, 1993).

I-3- Conséquences de la pollution :

Les conséquences d'une pollution peuvent être classées en trois catégories principales :

I-3-1- Conséquences sanitaires :

Les conséquences sanitaires sont celles à prendre en compte en priorité. Elles peuvent être liées à l'ingestion d'eau, de poissons...etc., mais aussi, au simple contact avec le milieu aquatique (cas de nombreux parasites).

A noter qu'il ne s'agit pas toujours de problèmes de toxicité immédiats, les conséquences sanitaires pouvant intervenir au travers de phénomènes complexes.

La conséquence sanitaire d'une pollution est variable dans le temps en fonction de l'usage de l'eau : par exemple, la pollution d'une nappe non exploitée n'a aucune conséquence sanitaire immédiate, mais peut en avoir longtemps après, si on utilise cette eau pour l'alimentation en eau potable (A.E.P.) (Gaujous, 1993).

I-3-2- Conséquences écologiques :

Les conséquences écologiques se mesurent en comparant l'état du milieu pollué par rapport à ce qu'il aurait été sans pollution. Ceci n'a rien d'évident, la pollution se traduisant parfois uniquement par l'accentuation d'un phénomène naturel. D'une manière générale, les conséquences écologiques sont à considérer au travers de la réduction des potentialités d'exploitation du milieu (pêche, aquaculture, tourisme, promenade...) (Gaujous, 1993).

I-3-3- Conséquences esthétiques :

Il s'agit de pollutions n'ayant pas de conséquences sanitaires ou écologiques importantes, mais perturbant l'image d'un milieu (par exemple, des bouteilles plastiques). Les conséquences esthétiques sont, par définition, les plus perceptibles, et c'est donc celles dont les riverains et le grand public auront, en premier, conscience (Gaujous, 1993).

On peut également distinguer deux autres conséquences liées à l'utilisation de l'eau comme produit :

I-3-4- Conséquences industrielles :

L'industrie est un gros consommateur d'eau : il faut par exemple 1m³ d'eau pour produire 1kg d'aluminium. La qualité requise pour les utilisations industrielles est souvent très élevée, tant sur le plan chimique (pour limiter la minéralisation, corrosion, entartrage), que biologique (problème de *biofouling*, c'est-à-dire d'encrassement des canalisations par des organismes). Le développement industriel peut donc être stoppé par la pollution (Gaujous, 1993).

I-3-5- Conséquences agricoles :

L'eau est, dans certaines régions, largement utilisée pour l'arrosage ou l'irrigation sous forme brute (non traitée). La texture du sol (complexe argilo humique), sa flore bactérienne, les cultures et le bétail, sont sensibles à la qualité de l'eau. De même, les boues issues du traitement des eaux usées pourront, si elles contiennent des toxiques (métaux lourds) être à l'origine de la pollution des sols (Gaujous, 1993).

I-4- Les polluants présents dans l'eau : On distingue plusieurs catégories de polluants tels que :

I-4-1- Les sels minéraux :

Ils représentent, à la fois par les masses mises en cause et par leurs effets biologiques, des polluants majeurs. Ils nuisent à la potabilité des eaux superficielles et même aux usages industriels si leur concentration est importante (Borcard, 2006).

I-4-2- Les acides et alcalis :

Déchargés par l'industrie chimique et d'autres installations industrielles, ils sont indésirables non seulement pour les activités récréatives (nage, pêche, navigation), mais aussi pour la vie aquatique. Il est généralement admis que pour la survie des poissons, le pH doit se situer dans une fourchette comprise entre 4,5 et 9,5. Le fonctionnement d'une station d'épuration est également perturbé par la présence de ces polluants (Koller, 2004).

I-4-3- Les matières en suspension (MES) :

Elles désignent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Les MES confèrent à l'eau un aspect trouble au fur et à mesure que les sédiments se déposent au fond ; elles diminuent la luminosité dans l'eau, donc freinent la photosynthèse.

Les espèces végétales se développent plus difficilement, l'oxygène qu'elles produisent diminue dans le milieu, et les espèces animales en souffrent (Lowe, 1995).

I-4-4- Les matières organiques (Mat O):

Ce sont tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre et le lactosérum des industries agroalimentaires. A l'inverse des MES, ces matières constituent une nourriture de choix pour les micro-organismes (μO) de l'eau et provoquent leur prolifération. Les μO se mettent alors à vider le milieu de son oxygène, ce qui s'avère fatal pour la vie aquatique. Lorsque le milieu se retrouve totalement vidé de son oxygène, les μO vont le chercher dans les sulfates dissous (SO_4^{-2}), qu'elles réduisent en sulfure, qui se dégage sous forme de sulfure d'hydrogène en engendrant une odeur d'œufs pourris (Koller, 2004).

I-4-5- Les matières inhibitrices (MI) :

Elles s'avèrent toxiques pour les daphnies (zooplancton). On y trouve des métaux ou métalloïdes (mercure, plomb), des pesticides, notamment les organochlorés (lindane), certaines huiles minérales et certains hydrocarbures. Les MI présentent des risques d'effets toxiques immédiats ou différés par accumulation dans les chaînes alimentaires et des risques d'effets cancérogènes (Koller, 2004).

I-4-6- Les déchets solides divers :

Ce sont des objets divers d'origines variées, posent des problèmes d'esthétique (rejet sur les rives et plages) et de gêne (avarie à des engins de pêche) et peuvent, en se déposant sur les fonds, causer préjudice à la faune et à la flore aquatique (Koller, 2004).

I-4-7- Les détergents synthétiques :

Ils comprennent un groupe de produits qui sont à la fois émulsionnants et moussants. Ils ont plusieurs inconvénients tels que la formation de mousse sur les rivières qui apparaît à partir de 0,3 à 1 mg.L^{-1} . Leur dégradation par les bactéries peut aboutir à des molécules non moussantes mais non biodégradables qui peuvent s'accumuler dans les organismes. De même, en AEP, le goût de savon peut apparaître à des doses très faibles (quelques $\mu\text{g.L}^{-1}$) (Gaujous, 1993).

I-4-8- Les matières colorantes :

Leur déversement dans le milieu aquatique même, à de très faibles concentrations, a un grand impact. Elles modifient la transparence et l'éclairement du milieu. L'action chlorophyllienne s'en trouve ralentie, la production d'oxygène en est diminuée et il y a tendance à l'installation des conditions anaérobies (Tauber et *al.*, 2005).

I-4-9- La pollution thermique :

Elle est dûe au rejet des eaux utilisées pour le refroidissement d'installations industrielles diverses. Cet échauffement engendre de nombreux inconvénients tels que appauvrissement des eaux en oxygène, action stimulante sur la vitesse de multiplication d'algues, croissance de l'activité bactérienne...etc. (Lowe, 1995).

CHAPITRE II

***LA POLLUTION
INDUSTRIELLE TEXTILE***

II-1- Description de l'industrie textile :

L'industrie textile rassemble de très nombreux métiers tout au long d'une chaîne de transformation partant de matières fibreuses jusqu'à des produits semi-ouverts ou entièrement manufacturés (Wikipedia, 2007). Elle présente l'avantage de représenter une filière complète qui va de la matière brute au produit fini livrable au consommateur (Flandrin-Bletty, 2002).

Les fibres textiles sont des substances susceptibles d'être transformées en fil, puis en tissu, bonneterie, dentelle, corde et ficelle. Elles peuvent provenir du règne animal, végétal, minéral ou chimique (Brossard, 1997). La figure 1 présente un aperçu synoptique des différentes matières textiles avec leur origine et leurs appellations (Flandrin-Bletty, 2002).

L'industrie textile comprend essentiellement deux types d'activité:

II-1-1- L'activité mécanique :

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

- **Filature** : on désigne sous le nom de filature, l'ensemble des opérations industrielles qui transforment la matière textile en fil.
- **Tissage** : est l'opération qui consiste à entrecroiser les fibres perpendiculairement les unes aux autres pour en former des tissus (Brossard, 1997).

II-1-2- La finition textile (ou ennoblissement) :

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

- **Blanchiment** : est une opération ou un ensemble d'opérations industrielles qui ont pour but de décolorer les fibres textiles.
- **Teinture** : est destinée à donner à un fibre, un fil ou un tissu dans toute sa longueur et dans toute son épaisseur une teinte uniforme, différente de sa teinte habituelle. Elle s'obtient en fixant un colorant sur la fibre d'une manière durable.
- **Impression** : a pour but d'obtenir des dessins blancs ou colorés à la surface des tissus.
- **Apprêts** : on donne le nom d'apprêts aux divers traitements mécaniques ou chimiques que l'on fait subir aux fils et aux tissus avant ou après les opérations de blanchiment, teinture et impression (Brossard, 1997).

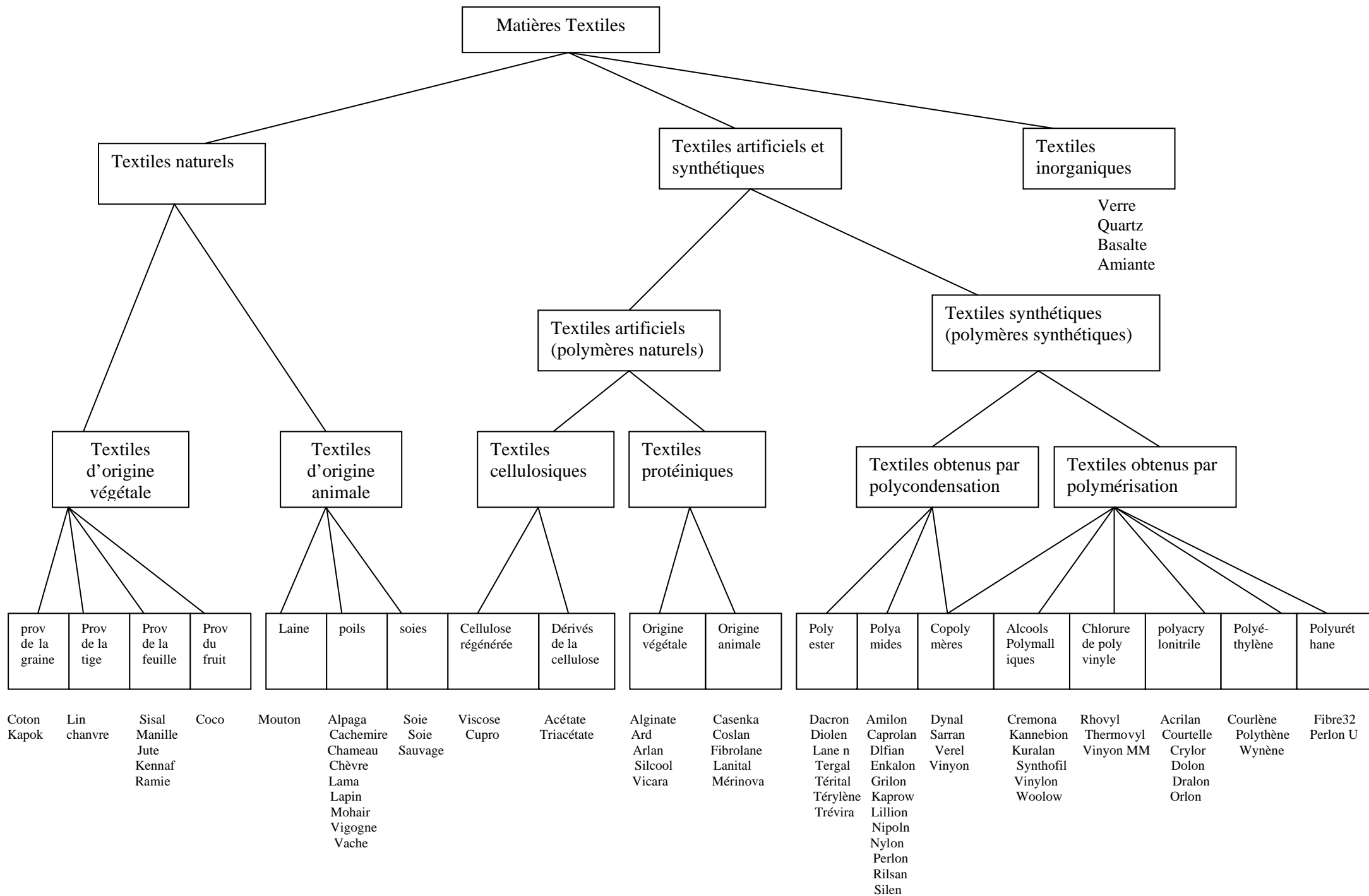


Figure 1 : Aperçu synoptique des différentes matières textiles

II-2- Utilisation de l'eau dans l'industrie textile :

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

- adoucissement ou déminéralisation des eaux destinées à la préparation du fil, spécialement lorsqu'il s'agit de textile artificiel.
- adoucissement, souvent précédé de décarbonatation, des eaux destinées au blanchiment et à la teinture des fibres.
- traitement des eaux d'alimentation des chaudières, dont les volumes d'appoint sont souvent importants.
- déminéralisation des eaux destinées au conditionnement de l'air des salles de filature ou de tissage (osmose inverse, échange d'ions) (Degrémont, 1978).

II-3- Caractéristiques des effluents industriels textiles :

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

*L'activité mécanique n'engendre qu'une très faible pollution à l'exception des ateliers de peignage et de lavage des laines (Degrémont, 1978). En effet, les procédés utilisant la laine peuvent libérer des bactéries et d'autres agents pathogènes.

Les pesticides sont parfois utilisés pour la préservation des fibres naturelles et ceux-ci sont transférés dans les rejets d'eau durant les opérations de lavage et de récuration (M.I.G.A., 1996).

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

AOX : Tous les produits plus ou moins halogénés sont considérés comme dangereux. Ils peuvent donner des composés qui appartiennent à la classe des AOX. On parle d'halogènes adsorbables type trihalométhane. Ces AOX proviennent des produits auxiliaires de teinture, de certains colorants, des produits de blanchiment, surtout la javel et à moindre titre du chlorite (Dupont, 2002).

Urée : Pour dissoudre de grandes quantités de colorants, teinture par foulardage ou pâtes d'impression, l'ennoblisseur peut utiliser des produits hydrotropes comme l'urée et plus rarement la thiourée. Rejetés dans les cours d'eau, ces produits, comme les nitrates et phosphates, favorisent la prolifération des algues. Ces algues consomment énormément d'oxygène qu'elles puisent dans l'eau et ceci au détriment des espèces animales (phénomène d'eutrophisation) (Dupont, 2002).

Electrolytes : Une salinité excessive des eaux peut perturber la vie aquatique. Pour mesurer la teneur en électrolytes, on mesure la conductivité de l'eau (Lowe, 1995).

Réducteurs : Rejetés dans les cours d'eau, les réducteurs, utilisés en teinture des colorants de cuve et au soufre, consomment l'oxygène du milieu (Dupont, 2002).

Les colorants : La couleur des rejets textiles est due aux colorants employés (Blánquez et al., 2004), ils seront détaillés au chapitre suivant (chapitre III).

Les autres polluants comprennent :

- 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. ;
- des adjuvants (mouillants et détergents) et des émulsifiants (alginates et white-spirit utilisés pour la préparation des pâtes d'impression) ;
- des produits de mercerisage et d'apprêt (amidon, alginates, enzymes...) (Degrémont, 1978).

Les rejets des eaux de teinture peuvent contenir des métaux lourds tels que : le cuivre et le chrome (M.I.G.A., 1996).

Les effluents textiles se caractérisent par une demande biologique en oxygène (DBO), une demande chimique en oxygène (DCO) et une température élevées (Zaroual et al., 2006).

CHAPITRE III
LES COLORANTS

III-1- Introduction :

Les peintures rupestres, les hiéroglyphes égyptiens, les enluminures et étoffes du Moyen Age, attestent de l'importance de la couleur dans toutes les époques de l'histoire. 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 (Perrin et Scharff, 1995).

Les colorants synthétiques représentent aujourd'hui un groupe relativement large de composés chimiques organiques rencontrés dans pratiquement toutes les sphères de notre vie quotidienne (Zawlotzki, 2004).

La production mondiale est estimée à 700 000 tonnes /an dont 20% sont rejetés dans les effluents au cours des différentes étapes d'application et de confection (Azbar et *al.*, 2004).

III-2- Utilisations des colorants :

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 alimentaires...) (Crepy, 2004).

III-3- Les colorants employés dans l'industrie textile :

III-3-1- Généralités :

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 (Perrin et Scharff, 1995).

La teinture des textiles a été effectuée depuis les temps les plus anciens. On employait alors uniquement des colorants naturels, mais, ces composés ont été presque totalement remplacés par des colorants de synthèse (Nozet, 1976).

Une teinture consiste à faire **absorber**, **diffuser** des colorants par les fibres textiles, puis ensuite à les **fixer** à l'intérieur de celles-ci (Flandrin- Bletty, 2002). Elle est possible grâce à des réactions de base telles que :

- L'affinité spécifique du colorant pour la fibre grâce à des liaisons chimiques qui sont créées par des réactions de type acide base.
- L'existence de forces électrostatiques du type liaison hydrogène, cas qui se rencontre souvent entre des atomes d'électronégativités différentes.
- L'absorption du colorant par la fibre, celui-ci se fixant dans les zones amorphes de la fibre.
- La rétention physique du colorant par la fibre, après que celle-ci ait été absorbée par la fibre.

III-3-2- Nature des colorants :

Les colorants sont des composés organiques comportant dans leur molécule certains groupes d'atomes appelés CHROMOPHORES. La molécule qui les contient devient CHROMOGENE et celle-ci n'a des possibilités tinctoriales que par l'adjonction d'autres groupements d'atomes appelés : AUXOCHROMES (Flandrin- Bletty, 2002).

Les principaux groupes chromophores et auxochromes sont donnés dans le tableau I :

Tableau I : Les principaux groupes chromophores et auxochromes (Perrin et Scharff, 1995).

Groupes chromophores			
-N=N-	azo	>C=O	carbonyle
-CH=	méthine	>C=S	thiocarbonyle
-CR=			
-CH=N-	azométhine N substitué	-NO ₂	nitro
-CH=NH-	azométhine	-N=O	nitroso
Groupes auxochromes			
-NR ₂	amine tertiaire	-OCH ₃	méthoxy
-NHR	amine secondaire	-I	iodo
-NH ₂	amine primaire	-Br	bromo
-OH	hydroxyle	-Cl	chloro

III-3-3- Classification des colorants synthétiques :

Depuis la découverte de la « mauvéine » par Perkin en 1856 et la « fuchsine » par Verguin en 1858, de très nombreux colorants ont été élaborés. On en dénombre aujourd'hui plus de 10 000 en production industrielle et il a été nécessaire d'avoir un système de classification. Celui-ci constitue l'**index des couleurs** (en anglais *colour index* noté **C.I.**), qui répertorie la majorité des colorants mis sur le marché. Dans ce système, chaque colorant est classé selon son nom générique de « *colour index* » (C.I.) qui décrit ses caractéristiques essentielles telles que : formule chimique, couleur et nuance, résistance à la lumière, aux solvants, à la chaleur, à différents agents chimiques ainsi qu'une description des principaux domaines d'utilisations (Perrin et Scharff, 1995). Chaque colorant dans le *colour index*, porte un numéro de référence (Crepy, 2004).

Les principes de classification les plus couramment rencontrés dans les industries textiles, sont basés sur les structures chimiques des colorants synthétiques et sur les méthodes d'application aux différents substrats (textiles, cuir, matières plastiques...etc.) (Zawlotzki, 2004).

III-3-3-1- Classification chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (tableau I). Les classes chimiques les plus utilisées dans les colorants textiles sont principalement les colorants azoïques, puis les colorants anthraquinoniques et les phtalocyanines (Crepuy, 2004).

* Les colorants azoïques :

Les colorants azoïques ont pour chromophore le groupe $-N=N-$. Ce chromophore a été découvert par P.Griess en 1858. Suivant le nombre de chromophores « azo » rencontrés dans la molécule, on distingue les monoazoïques, les biazoïques et les polyazoïques (Perrin et Scharff, 1995). Ils constituent la famille la plus importante, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes (Zee, 2002).

Ils se répartissent en plusieurs catégories : les colorants basiques, acides, directs et réactifs solubles dans l'eau, les azoïques dispersés et à mordant non ioniques insolubles dans l'eau (Kulkarni et *al.*, 1985).

Il est estimé que 10-15% des quantités initiales sont perdues durant les procédures de teinture et sont évacuées sans traitement préalable dans les effluents (Tauber et *al.*, 2005).

* Les colorants anthraquinoniques :

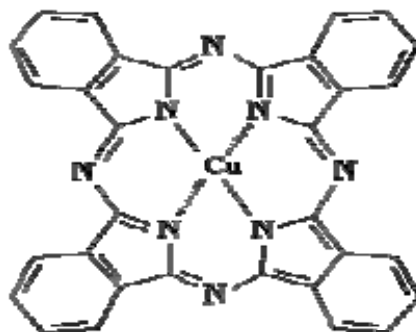
Les colorants anthraquinoniques représentent, après les colorants azoïques, le plus important groupe de matières colorantes.

La molécule de base de ce groupe de colorants est l'anthraquinone qui présente le groupe chromophore carbonyle $>C=O$ sur un noyau quinonique qui est le chromogène ; cela veut dire que le chromogène est l'arrangement complet d'atomes qui donne naissance à la couleur observée.

Malgré leurs méthodes complexes de synthèse, les colorants anthraquinoniques trouvent une grande variété d'application notamment lorsque leur stabilité de coloration est supérieure à celle des colorants azoïques de prix similaires. Ils constituent en effet, la classe de colorants présentant la plupart du temps les meilleures stabilités à la lumière et aux agents chimiques (Perrin et Scharff, 1995). Ils représentent 20 à 25% du marché des colorants textiles (Crepy, 2004).

*** les phtalocyanines :**

Ces colorants ont une structure complexe basée sur l'atome central de cuivre. Parmi ces colorants, le plus utilisé parce que le plus stable est la phtalocyanine de cuivre. Les applications les plus importantes concernent le domaine des pigments (Perrin et Scharff, 1995).

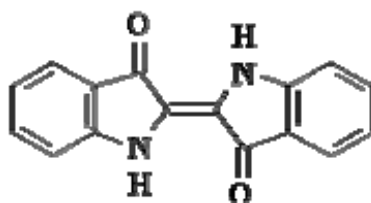


Phtalocyanine de cuivre

*** Les colorants indigoïdes :**

Ils tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. En effet, le plus ancien représentant de cette famille est l'indigo lui-même, utilisé déjà par les égyptiens il y a plus de cinq mille ans.

Ils sont caractérisés par le chromophore $\begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ -\text{C} - \text{C} = \end{array}$ faisant la jonction entre noyaux aromatiques par l'intermédiaire d'un groupe $-\text{NH}-$ (Hedayatullah, 1976).



Indigo

Des quantités importantes de ce colorant (indigo) sont utilisées pour la fabrication des « *blue jeans* ». La couleur obtenue est beaucoup plus délavée que brillante, ce qui est recherché (Perrin et Scharff, 1995).

*** Les colorants au soufre :**

Beaucoup de colorants contiennent du soufre dans leur molécule. Cependant, seront appelés colorants au soufre, les colorants insolubles qui sont transformés en « leuco » solubles par un réducteur alcalin, le sulfure de sodium (Dupont, 2002).

Par action des solutions diluées de sulfures alcalis, ils se réduisent et passent en solutions qui possèdent une certaine affinité pour la cellulose (Hedayatullah, 1976). Donc, ils sont principalement utilisés pour la coloration des fibres cellulosiques (Kulkarni et *al.*, 1985), surtout pour la teinture du coton et notamment dans les tons noirs, bleus et verts (Hedayatullah, 1976).

La plupart de ces colorants sont amorphes. Ils sont insolubles dans l'eau, dans les acides et généralement dans les alcalis. Leur solidité au lavage et à la lumière est bonne, en revanche, ils résistent mal au chlore à l'exception des produits tels que le « bleu hydrone » et les « indocarbones » (Hedayatullah, 1976).

Les colorants au soufre sont des composés à PM élevé dans lesquels la nature des cycles et leur mode d'enchaînement ne sont pas établis avec certitude. Les colorants au soufre représentent 15% de la production globale des colorants (Zee, 2002).

*** Les colorants nitrés et nitrosés :**

Ils forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés) (Zawlotzki, 2004).

III-3-3-2-Classification tinctoriale :

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. Cette classification, appelée aussi classification technologique, permet à l'utilisateur de connaître le mode d'application du colorant, ses propriétés (solubilité, affinité pour tel type de fibres, nature de la fixation...) et donc ses domaines d'utilisation (Crepuy, 2004).

On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes :

*** Les colorants acides ou anioniques :**

La plus grande classe de colorants dans le système **C.I.** est celle concernant les colorants acides ; près de 2300 colorants cités, avec près de 40% sont utilisés en production actuellement (Zee, 2002).

Les colorants acides sont des molécules organiques qui présentent des groupes sulfonates NaSO_3^- ou carboxylates NaOOC^- (Perrin et Scharff, 1995) grâce auxquels ils sont solubles dans l'eau . 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 (Zawlotzki, 2004).

L'adjectif « acide » réfère au pH du bain des colorants acides plutôt qu'à la présence de groupes acides (sulfonates, carboxyle) dans la structure moléculaire de ces colorants (Zee, 2002).

*** Les colorants basiques ou cationiques :**

Ce sont des sels de composés organiques présentant des groupes amino $-\text{NH}_2$ ou imino $=\text{NH}$ (Perrin et Scharff, 1995). Ils ont une bonne solubilité dans l'eau (Kulkarni et *al.*, 1985). Ils appartiennent à des classes chimiques très différentes telles que les azoïques, les dérivés du di et triphénylméthane (Perrin et Scharff, 1995).

Les liaisons se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres (Kulkarni et *al.*, 1985). La soie teinte avec de telles substances présente des couleurs très variées mais peu solides (Perrin et Scharff, 1995).

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 (Zawlotzki, 2004). Les colorants basiques représentent 5% du total des colorants classés dans le *colour index* (Zee, 2002).

*** Les colorants de cuve :**

Les colorants de cuve sont des colorants insolubles dans l'eau. Cependant, sous l'action d'un réducteur, le dithionite de sodium $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, un colorant de cuve, donne son **leucodérivé** c'est-à-dire le produit de réduction incolore ou blanc et soluble dans l'eau. Le leucodérivé présente de l'affinité pour certaines fibres textiles telles que le coton, le lin, la laine et la soie. Par oxydation à l'air ou à l'aide d'un agent oxydant, le colorant initial insoluble dans l'eau est régénéré au sein de la fibre. Les colorants de cuve appartiennent à la classe chimique des anthraquinones et à celle des indigoïdes (Perrin et Scharff, 1995).

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 ou denim, qui constitue un exemple très ancien des colorants de cuve, avec près de 5000 ans d'histoire d'application (Zee, 2002).

*** Les colorants directs :**

Ils 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 cellulosiques sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule (Zawlotzki, 2004).

Dans le *colour index*, près de 1600 colorants directs sont cités, avec 30% qui sont actuellement utilisés (Zee, 2002).

*** Les colorants à mordants (ou à complexe métallique) :**

Appartenant à la classe des azoïques et des anthraquinoniques, ce sont des composés organiques qui présentent des groupes suffisamment voisins pour former des complexes par chélation avec des sels de chrome, de cobalt, de calcium, d'étain ou d'aluminium. Ces sels sont appelés **mordants**. Un mordant est donc un produit chimique, habituellement un sel métallique ou un acide avec lequel est traitée avant teinture la fibre à teindre. Durant le processus de teinture il se forme un complexe insoluble au sein des pores de la fibre, ce qui aide à retenir le colorant sur cette fibre (Perrin et Scharff, 1995).

Au lieu de former le complexe métallique sur la fibre elle-même, ce qui augmente le nombre d'opérations à effectuer, on « métallise » c'est-à-dire on incorpore le métal lors de la synthèse. Ceci permet de teindre directement le coton et les autres fibres en solution aqueuse à une température d'environ 100°C. Ces substances de faible prix constituent notamment les

colorants vendus dans le commerce de détail pour effectuer des teintures à domicile (Perrin et Scharff, 1995).

La teinture à mordants est probablement une des plus anciennes façons de teindre. L'utilisation des colorants à mordants a diminué graduellement : seulement 23% des 600 différents colorants à mordants cités dans le *colour index* sont actuellement utilisés.

* Les colorants réactifs :

La synthèse de colorants aptes à se fixer solidement au substrat a préoccupé les chercheurs depuis fort longtemps (Hedayatullah, 1976).

Avant que les colorants réactifs ne viennent sur le marché, le teinturier ne possédait qu'un seul moyen pour obtenir des nuances solides. En effet, après adsorption et absorption, il s'efforçait de retenir « mécaniquement » le colorant. Il n'y avait pas de réaction chimique entre la fibre et le colorant (Dupont, 2002).

L'idée d'une réaction chimique entre le colorant et la fibre remonte à la fin du XIX^{ème} siècle. En 1895 Cross et Bevan, avaient réussi à greffer un colorant sur le coton après une succession de réactions chimiques. Le procédé n'était pas industriel (Dupont, 2002), il ne fut jamais appliqué à cause de sa complication et de la fragilité de la liaison colorant-cellulose.

Après Cross et Bevan, de nombreux travaux ont été effectués en vue de fixer chimiquement le colorant aux fibres textiles. Mais c'est l'année 1956 qui est la date marquante de l'histoire des colorants réactifs, date correspondant à l'apparition sur le marché des colorants Procion fabriqués par la société ICI (*Imperial Chemical Industries* -Grande Bretagne) (Hedayatullah, 1976).

Les colorants réactifs contiennent des groupes chromophores issus essentiellement des familles azoïques, anthraquinoniques et phtalocyanines (Kulkarni et *al.*, 1985). 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 groupes OH-, NH-, ou SH- des fibres (coton, laine, soie et nylon).

Il est estimé que 10 à 50% des colorants réactifs ne réagiront pas avec la fibre et resteront dans la phase aqueuse. Ainsi, le problème des effluents colorés est majoritairement identifié à l'utilisation des colorants réactifs.

Dans le *colour index*, les colorants réactifs constituent la seconde plus grande classe. 600 des 1050 différents colorants réactifs cités sont actuellement utilisés (Zee, 2002).

*** Les 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 (Zawlotzki, 2004). La plupart sont utilisés pour la teinture des fibres de polyester, nylon, acétate et triacétate (Kulkarni et al., 1985).

Les colorants dispersés forment le troisième plus grand groupe des colorants dans le *colour index* : près de 1400 différents composés sont cités, parmi lesquels 40% sont actuellement utilisés. En général, il s'agit de petits composés azo ou nitro (jaune et rouge), anthraquinones (Bleu et vert) ou azo à complexe métallique (toutes les nuances) (Zee, 2002).

III-4- 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 (Mathur et al., 2005).

III-4-1- Eutrophisation :

Sous l'action des micro-organismes, 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 algues 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 (U.S.G.S., 2006).

III-4-2- Couleur, turbidité, odeur :

La couleur est souvent le premier contaminant à être reconnu dans un effluent, et une faible quantité de colorants dans l'eau ($10-20 \text{ mg.L}^{-1}$) est hautement visible et affecte la transparence de l'eau (Sanromán et al., 2004). Ainsi, les effluents textiles typiquement chargés en colorants avec des concentrations allant de 10 à 200 mg.L^{-1} sont en général, hautement colorés et leur déversement dans l'eau présente un problème esthétique (Zee, 2002).

L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvais goûts, prolifération bactérienne, odeurs pestilentielles et colorations anormales (Zawlotzki, 2004). De plus, les colorants absorbent la lumière du soleil, les plantes dans les courants d'évacuation peuvent périr ; ainsi l'écosystème des courants pourrait être sérieusement affecté (Barrera-Diaz et *al.*, 2003).

III-4-3- La persistance :

Vu que les colorants textiles sont désignés comme étant stables chimiquement et photolytiquement, ils sont très persistants dans les environnements naturels et leur élimination est difficile (Blánquez et *al.*, 2004).

III-4-4- La bioaccumulation :

C'est un terme qui désigne en général, l'accumulation dans l'organisme ou une partie de l'organisme de substances telles que, les pesticides (exemple DDT), méthyle mercure, ou d'autres substances chimiques organiques. Le processus d'accumulation implique une adsorption biologique des substances qui entrent dans l'organisme à travers la respiration, l'incorporation d'aliments, contact épidémiologique (la peau) avec les substances ...et/ou d'autres moyens (U.S.G.S., 2006).

Le rejet des colorants pourrait présenter un risque écotoxique et introduire le danger potentiel de la bioaccumulation qui pourrait éventuellement affecter l'homme via la chaîne alimentaire (Zee, 2002).

III-4-5- Toxicité pour différentes espèces :

La toxicité des colorants a été le but de nombreuses recherches. Les études ont porté sur la mortalité, la génotoxicité, la mutagénicité et la carcinogénicité, et les tests ont été réalisés sur différentes espèces : des organismes aquatiques (poissons, algues, ...etc.), des mammifères (souris, rats, lapins...etc.), des cellules bactériennes, des cellules sexuelles (des spermatozoïdes)...etc.

Toutes ces études ont montré des degrés variables de toxicité selon les espèces et la classe des colorants (Klemola et *al.*, 2006). Par exemple, les colorants responsables de la toxicité la plus aigue chez les algues sont les colorants basiques ou cationiques ; les poissons semblent être relativement sensibles à différents colorants acides (Zee, 2002).

III-4-6- Santé humaine :

En teinture, les niveaux d'exposition aux dangers changent avec les postes de travail. C'est au niveau « cuisine » à couleurs que le maximum de précautions doit être pris. Le peseur de colorants est le plus exposé (Dupond, 2002). Bien que la plupart des colorants ne soient ni corrosifs, ni irritants pour la peau, ils peuvent causer des réactions allergiques et même être responsables de cancer :

Réactions allergiques :

Les allergies peuvent être du type dermique et/ou du type respiratoire (Dupont, 2002). En effet, plusieurs cas d'allergie respiratoire, de rhinite allergique, d'eczéma, de dermatite allergique de contact, de rhinite avec conjonctivite, d'asthme, d'urticaire...etc. chez des sujets travaillant dans l'industrie textile, en particulier les manipulateurs des colorants, ont été rapportés suite à des observations cliniques et quelques enquêtes épidémiologiques transversales menées sur des employés (cas professionnels) de ce type d'industries (Rosenberg, 2004).

Cancer :

Si la plupart des colorants ne sont pas toxiques directement, une portion significative de leurs métabolites le sont. Leurs effets mutagène, tératogène ou cancérigène apparaissent après dégradation de la molécule initiale. Les colorants azoïques sous leur forme pure sont rarement directement mutagène ou carcinogène, à l'exception de ceux possédant des groupes amines libres. Cependant, la réduction de ces colorants par exemple, clivage des liaisons azo, entraîne la formation d'amines aromatiques dont de nombreux sont connus pour leur effet mutagène et carcinogène (Tauber et *al.*, 2005).

L'Agence Internationale de Recherche sur le Cancer (IARC) a associé des cas de cancer chez l'homme à différents colorants (Mathur et *al.*, 2005) ; par conséquent, leur production a été interdite (Zee, 2002) .

CHAPITRE IV

***TRAITEMENTS DES EFFLUENTS
COLORES***

IV-1- Introduction :

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 II) , et à cause de leurs toxicités précédemment décrites , ces effluents nécessitent un traitement préalable avant d'être déversés dans le milieu naturel.

Tableau II : Taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants, (Zawlotzki, 2004) :

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

Plusieurs techniques physiques, chimiques ou biologiques peuvent être utilisées comme prétraitement, traitement majeur ou post traitement pour éliminer les colorants textiles des effluents. Les techniques physiques incluent principalement : filtration sur membrane (Capar et *al.*, 2006), coagulation (Shi et *al.*, 2007), adsorption (Lorghinotti et *al.*, 1998), les techniques chimiques : principalement les procédés d'oxydation avancée tels que : ozonation (Soares et *al.*, 2006), oxydation Fenton (Azbar et *al.*, 2004)...etc. Les techniques biologiques incluent les biosorptions bactériennes (Alinsafi et *al.*, 2006), fongiques (Blanquez et *al.*, 2004), par les levures (Pajot et *al.*, 2007), la biodégradation aérobie (Lsik et Sponza, 2003) ou anaérobie (Bell et Buckley, 2003) ...etc. Nous pouvons en citer les méthodes suivantes :

IV-2- Méthodes physiques :**IV-2-1- Filtration sur membrane :**

Selon la taille des espèces retenues par le filtre, l'ensemble des techniques séparatives à membranes se décline en : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse (Brun, 1989). Parmi les quatre types de procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse sont les plus adaptées à la réduction partielle de la couleur et des petites molécules organiques (Zawlotzki, 2004).

La nanofiltration permet de retenir les colorants solubles et ioniques tels que : les colorants acides, basiques, directs et réactifs (Akbari et *al.*, 2007). La filtration avec de plus grandes membranes telle que : l'ultrafiltration et la microfiltration est plutôt souhaitable pour l'élimination des colorants colloïdaux et de cuve, car le diamètre des pores est large.

La filtration sur membrane est une méthode rapide ne nécessitant pas de grands espaces. Cependant, les techniques membranaires présentent plusieurs inconvénients tels que : la diminution du flux et l'infection des membranes, nécessitant un nettoyage fréquent et un remplacement régulier des modules (Zee, 2002) ; par exemple, la plupart des membranes de nanofiltration sont à base de polyamides, ces derniers étant des polymères de fibres textiles, ils peuvent se colorer par la majorité des colorants lors du procédé de filtration, entraînant l'infection des membranes et la diminution du flux (Akbari et *al.*, 2007).

Un autre inconvénient important est la production de concentrats d'effluents textiles qui nécessitent un traitement plus important ; par conséquent, les coûts capitaux de filtration sur membranes sont plutôt élevés (Dos Santos, 2005).

IV-2-2- Adsorption :

L'adsorption est un phénomène de surface consistant en la fixation de certains ions ou molécules du corps adsorbé sur les molécules du corps adsorbant (Degrémont, 1978). En fait, l'adsorption n'est pas uniforme sur toute la surface des particules. Elle se fait de façon préférentielle dans des endroits appelés « sites actifs », caractérisés par la présence de groupements fonctionnels susceptibles de réagir de façon plus ou moins réversible avec les molécules ou ions des corps adsorbés (Degrémont, 1978).

Les procédés d'adsorption ont été utilisés pour le traitement des effluents colorés (Oliveira et *al.*, 2007).

Le charbon activé est l'adsorbant le plus communément utilisé pour la réduction de la couleur (Gerçel et *al.*, 2007), en raison de sa haute capacité d'adsorption (grande surface et structure poreuse des grains) (Dinçer et *al.*, 2007), mais son application n'est efficace que sur certaines catégories de colorants (cationiques, à mordants, colorants dispersés et de cuve) (Hao et *al.*, 2000). Le charbon actif est cher, et sa réutilisation est parfois limitée par les pertes lors du procédé de régénération (Oliveira et *al.*, 2007), ceci a engendré la recherche d'autres adsorbants plus économiques utilisés alternativement pour le traitement des eaux colorées (Ong et *al.*, 2007).

Parmi les matériaux utilisés comme adsorbants nous pouvons citer : argiles (Oliveira et *al.*, 2002), épluchures d'orange (Sivaraj et *al.*, 2001), sciure (Özacar et Sengil, 2005), coton (Bouzaida et Rammah, 2002), chitine (Longhinotti et *al.*, 1998), déchets de cuir (Oliveira et *al.*, 2007), coque du riz (Ong et *al.*, 2007), cendres (Dinçer et *al.*, 2007)...etc.

Certains de ces adsorbants ont montré de grandes capacités d'élimination des colorants (en particulier les colorants dispersés) comparés au charbon actif. Cependant, l'application de l'adsorption pour traiter les effluents textiles est limitée, car la capacité des adsorbants à retenir les colorants dépend de la classe des colorants (Zee, 2002), de même que cette technique requiert des opérations postérieures onéreuses de régénération et de post traitement des déchets solides (Zawlotzki, 2004).

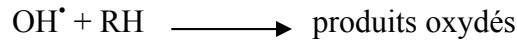
IV-3- Méthodes chimiques :

Procédés d'Oxydation Avancée (POA)

L'oxydation avancée pourrait être définie comme l'oxydation par les composants dont le potentiel d'oxydation (E^0) est supérieur à celui de l'oxygène (1,23 eV), tels que : le peroxyde d'hydrogène ($E^0=1,78$ eV), l'ozone ($E^0=2,08$ eV) et les radicaux hydroxydes ($E^0=2,80$ eV).

Les procédés d'oxydation avancée (POA) sont surtout basés sur la génération d'espèces radicales hautement réactionnelles (en particulier les radicaux hydroxydes OH^{\bullet}) qui peuvent réagir avec un grand nombre de composés, même avec ceux qui sont difficilement dégradables tels que : les colorants et les pesticides.

Plusieurs recherches ont permis de proposer un mécanisme de dégradation des molécules organiques par les radicaux OH^\bullet (Huang et al., 2007) :



Parmi les procédés d'oxydation avancée (POA), nous pouvons citer :

IV-3-1- L'ozonation :

C'est un des POA appliqués dans le traitement des eaux depuis plusieurs années. A cause de sa grande capacité oxydative, l'ozone peut dégrader des polluants organiques et détruire des microbes (Hsing et al., 2007). Dans le procédé d'ozonation, les radicaux hydroxydes sont formés lors de la décomposition de O_3 dans l'eau (Dos Santos, 2005).

L'ozone décolore rapidement les colorants solubles dans l'eau mais les colorants insolubles tels que : colorants de cuve et dispersés, réagissent plus lentement. De plus, les eaux résiduaires textiles contiennent plusieurs produits réfractaires en plus des colorants (exemple : surfactants) qui réagissent avec l'ozone, ce qui augmentera la demande en ozone. Il est donc conseillé de prétraiter l'effluent avant d'appliquer l'ozonation.

L'ozonation permet le traitement de gros volumes ainsi que la diminution nette de la coloration mais les coûts de fonctionnement sont très élevés et l'efficacité pour certains colorants est limitée ; de plus les produits d'oxydation sont inconnus (Zawlotzki, 2004).

IV-3-2- L'oxydation Fenton :

C'est une méthode POA populaire dans la décoloration qui combine Fe^{2+} et H_2O_2 avec production de OH^\bullet ; elle est aussi une des applications industrielles les plus pratiquées. La réaction Fenton est basée sur la formation des ions OH^\bullet , oxydant non spécifique avec E° élevé qui peut dégrader les polluants efficacement. Une formation typique de OH^\bullet est démontrée selon la réaction suivante:



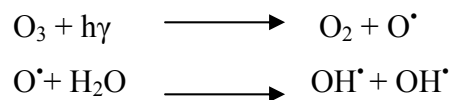
La décoloration parvient à travers la réaction de OH^\bullet avec les colorants (Hsing et al., 2007).

Parmi les avantages des procédés Fenton, il faut signaler la décoloration rapide. En effet, une élimination des colorants résiduels et une diminution de 85% de DCO des effluents textiles sont possibles en un temps de réaction entre 20 et 40 min (Hsing et al., 2007), opération simple, oxydant puissant...etc. Cependant, les coûts élevés et les produits d'oxydation inconnus, constituent les inconvénients majeurs de ce type de procédés (Zawlotzki, 2004).

IV-3-3-Procédés d'oxydation photocatalytique (UV/ H_2O_2 , UV/ TiO_2 , UV/ O_3 et autres) sont tous basés sur la formation de radicaux libres due à l'irradiation UV.

*** Ozone- UV :**

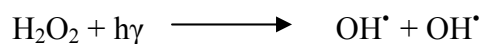
Le procédé O_3 -UV implique l'utilisation des photons UV pour activer les molécules d'ozone, facilitant ainsi la formation des radicaux hydroxydes. Le mécanisme de réaction commence par activation de la molécule d'ozone par les UV pour former les radicaux d'oxygène, qui vont se combiner avec l'eau pour donner les radicaux OH^\bullet :



Les radiations UV peuvent mener à l'excitation directe de quelques composés organiques. Les composés excités vont réagir avec les molécules d'ozone pour former différents produits dégradables (Zhou et Smith, 2002).

*** Peroxyde d'hydrogène- UV :**

Sous irradiation UV, H_2O_2 sera photolysée en deux radicaux hydroxydes. Ceux-ci peuvent alors réagir avec les contaminants organiques (Zhou et Smith, 2002).



Ce procédé est le plus largement utilisé pour le traitement des polluants réfractaires présents dans les eaux usées, car il n'y a pas formation de boues et une haute réduction de DCO est achevée. De plus, il a été appliqué avec succès pour l'élimination de la couleur : plus

de 95% de décoloration a été obtenue dans le traitement des colorants réactifs, basiques, acides et directs, alors que les colorants dispersés et de cuve ont été partiellement éliminés. Cependant, dans certains cas, H₂O₂/UV présente une faible efficacité de réduction de DCO et de couleur due à l'utilisation inefficace de la lumière UV (surtout dans le cas des effluents très concentrés en colorants) (Dos Santos, 2005).

*** Procédés photocatalytiques hétérogènes : (TiO₂ / UV)**

Ces procédés utilisent certains oxydes de métal qui peuvent facilement générer des radicaux hydroxydes à la surface des particules lors de l'absorption des radiations UV. Les plus importants procédés photocatalytiques incluent TiO₂ - UV et TiO₂ -H₂O₂ – UV (Zhou et Smith, 2002).

Les méthodes UV en présence d'un catalyseur tel que : TiO₂ , ont permis une augmentation intéressante de l'élimination des colorants. Ainsi, les différentes combinaisons telles que : ozone/TiO₂, ozone/TiO₂/H₂O₂ et TiO₂/H₂O₂ ont été utilisées, mais sont énormément influencées par le type de colorant, sa concentration et le pH (Dos Santos, 2005).

Vu que la lumière UV ne traverse pas suffisamment les effluents hautement colorés, l'application du procédé photocatalytique est limitée à l'étape de post traitement. Un des inconvénients de ces procédés est leur coût élevé (Dos Santos, 2005).

IV-4- Méthodes biologiques :

Un grand nombre de micro-organismes sont capables de métaboliser la matière organique et par conséquent, de conduire à l'épuration des eaux usées chargées en matières organiques biodégradables (Eckenfelder, 1982).

Les techniques biologiques incluent la biosorption bactérienne et fongique, et la biodégradation aérobie et anaérobie. Ces techniques, dans le cas des colorants, sont basées sur la biotransformation microbienne de ceux-ci. Mais, vu que les colorants textiles sont désignés comme étant stables et persistants, ils sont en général pas facilement biodégradables (Azbar et al., 2004).

Les méthodes de bio- traitement conventionnelles sont sans effet sur la plupart des colorants synthétiques à cause de leur structure polyaromatique complexe et leur nature réfractaire (Zaroual et al., 2006). On a estimé à seulement 10- 20 % la réduction de coloration par les procédés biologiques (Tauber et al., 2005).

CHAPITRE V

COAGULATION
et
ELECTROCOAGULATION

Les colloïdes de nature hydrophile sont responsables de la coloration des eaux.

*Les colloïdes hydrophobes sont en général de nature minérale. Ils n'ont aucune affinité pour les molécules d'eau, la formation d'une couche d'hydratation est impossible.

Ce type de particules est en partie responsable de la turbidité (Cardot, 1999).

V-1-2- Structure des colloïdes (théorie de la double couche) : Une particule colloïdale dans l'eau est porteuse de charges électriques qui se répartissent comme suit :

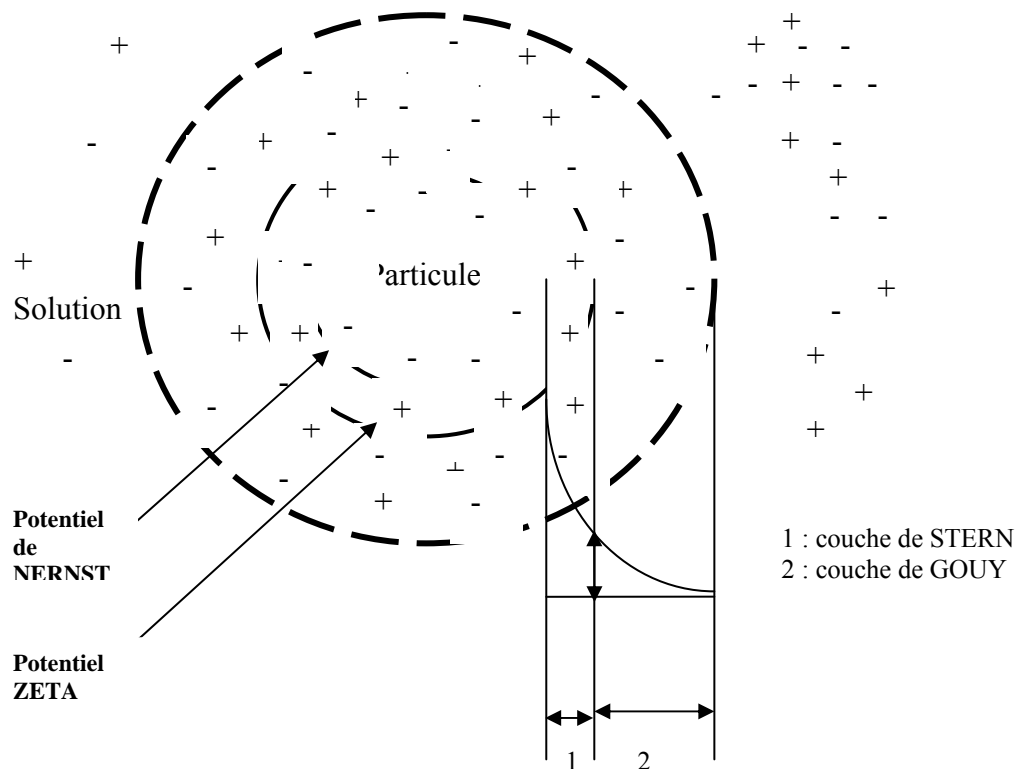


Figure 3 : Distribution ionique autour d'un colloïde (Eckenfelder, 1982)

L'ensemble des charges négatives constitue la charge primaire de la particule. Ces charges négatives attirent les ions positifs en solution dans l'eau. Ceux-ci sont étroitement collés et forment la couche liée ou la couche de STERN.

La couche de STERN attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité de cations. Cette nouvelle formation comporte une alternance d'anions et de cations. C'est la couche diffuse ou couche de GOUY, il y a donc formation d'une couche ionique présente au niveau de tout colloïde (Cardot, 1999).

Le potentiel mesuré au niveau de la périphérie interne de la particule est négatif et s'appelle potentiel de NERNST ; il est bien sûr propre à chaque particule. Le potentiel mesuré à la partie externe de la couche d'hydratation est la résultante des charges négatives de la particule et des charges positives de la couche d'hydratation. Le résultat est également négatif et il a reçu le nom de potentiel ZETA (ζ) (Vilaginès, 2003).

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquent à les stabiliser dans la solution (Des Jardins, 1988).

L'élimination des colloïdes ne peut se baser sur la simple décantation. En effet, leur vitesse de sédimentation est extrêmement faible (le temps nécessaire pour parcourir 1m en chute libre peut être de plusieurs années).

La coagulation et la floculation sont les processus qui permettent l'élimination des colloïdes (Gomella et Guerrée, 1978).

V-2- La coagulation- Floculation :

V-2-1- La coagulation :

La coagulation est par définition le phénomène de déstabilisation des particules colloïdales, qui peut notamment être obtenu par neutralisation de leurs charges électriques. Le produit utilisé pour cette neutralisation est appelé : coagulant (Degrémont, 1978).

Les coagulants les plus communément employés dans la pratique se limitent au : sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, polychlorure d'aluminium $Al_nOH_mCl_{3n-m}$, chlorure ferrique $FeCl_3$, sulfate de fer $FeSO_4 \cdot nH_2O$ et sulfate ferrique $Fe_2(SO_4)_3$. Dans des cas particuliers, il est fait appel à : l'aluminate de soude $NaAlO_2$, la chaux $CaO, Ca(OH)_2$ pour attaquer la structure des matières à précipiter et favoriser ainsi la création d'un système moins stable susceptible d'être définitivement précipité par les réactifs précédents (Gomella et Guerrée, 1978).

V-2-2- La floculation :

C'est l'agrégation des particules déchargées par transport et mise en contact les unes avec les autres. Elle conduit à la formation des flocons ou floes, capables d'être retenus dans une phase ultérieure du traitement de l'eau.

On peut distinguer les flocculants par leur nature (minérale ou organique), leur origine (synthétique ou naturelle) et le signe de leur charge électrique (anionique, cationique, non ionique), parmi les flocculants, on peut citer :

- **Silice activée** : c'est le premier flocculant employé ; C'est encore actuellement celui qui peut donner les meilleurs résultats, principalement si on l'utilise conjointement avec du sulfate d'aluminium.
- **Autres flocculants minéraux** : on peut citer, certains argiles, le blanc de Meudon ou le carbonate de calcium précipité , le charbon actif en poudre, le sable fin...etc.
- **Flocculants organiques** : certains sont fabriqués à partir de produits naturels, ce sont les alginates (extraits d'algues), les amidons (extraits de graines végétales), certains dérivés de la cellulose, certaines gommes...etc. D'autres flocculants sont entièrement synthétisés. On distingue d'une part, les polyacrylamides à longue chaîne et à haute masse molaire (2 à $4 \times 10^6 \text{ g.mol}^{-1}$), et d'autre part, les polyamines qui ont en général des chaînes plus courtes et des masses molaires plus basses ($1 \times 10^6 \text{ g.mol}^{-1}$) (Degrémont, 1978).

La séparation solide- liquide du floc formé et de l'eau peut se faire par filtration, par décantation ou flottation (Degrémont, 1978).

Les coagulants inorganiques tels que l'alun donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et au soufre, mais sont totalement inefficaces pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques. Par ailleurs, la coagulation- floculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. D'importantes quantités de boues sont formées avec ce procédé : leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires (Zawlotzki, 2004).

Récemment, des polymères organiques développés ont été très efficaces en tant que coagulants des colorants même pour les colorants réactifs, avec une faible production de boues. Cependant, la majorité des polymères utilisés pour l'élimination des colorants sont cationiques et peuvent être très toxiques pour la vie aquatique à de faibles concentrations (moins de 1 mg.L^{-1}) (Zee, 2002).

V-3- Electrocoagulation :**V-3-1- Définition :**

Durant le phénomène de la coagulation, le coagulant est ajouté sous forme de substances chimiques adéquates. Lors du procédé d'électrocoagulation, le coagulant est généré *in situ* par l'oxydation électrolytique d'une anode solide appropriée (Mollah et *al.*, 2001).

L'électrocoagulation (EC) est une technologie qui résulte de l'interaction de trois technologies fondamentales qui sont : l'électrochimie, la coagulation et la flottation (Holt et *al.*, 2005). Elle est basée sur le fait que la stabilité des colloïdes, suspensions et émulsions, soit influencée par les charges électriques (Savaş Koparal et Öğütveren, 2002).

Dans l'électrocoagulation, la déstabilisation des colloïdes se fait suite au champ électrique entre les électrodes et l'action des composés coagulants produits par oxydation de l'anode. Ces composés sont chargés électriquement, ils déstabilisent le système colloïdal dans lequel des particules solides sont initialement présentes et forment des floccs de particules qui peuvent être facilement séparables par flottation. La flottation est améliorée par la formation des bulles de gaz durant l'électrolyse du solvant (eau) (Szpyrkowicz, 2005).

V-3-2- Théorie de l'électrocoagulation :

L'EC est un procédé complexe impliquant plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui utilisent des électrodes consommables (sacrificielles) pour fournir des ions dans l'effluent d'eau. Trois étapes successives principales sont impliquées durant l'EC :

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

Le mécanisme de déstabilisation des contaminants, suspension particulaire et rupture des émulsions peut être résumé comme suit :

*Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.

*Neutralisation de la charge des espèces ioniques présentes dans le rejet d'eau à l'encontre des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle. Ces ions réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van der Waals prédominent, causant ainsi la coagulation.

*Formation du floc : le floc formé suite à la coagulation crée les boues qui piègent et relient les particules colloïdales restant dans le milieu aqueux (Mollah *et al.*, 2001).

V-3-3- Description de la technique d'électrocoagulation :

Dans sa forme la plus simple, un réacteur d'EC est formé d'une anode et d'une cathode. Quand un courant est appliqué à partir d'une source externe, le matériel anodique subira une oxydation, pendant que la cathode fera l'objet d'une réduction (Holt *et al.*, 2005).

Les interactions ayant lieu dans un réacteur d'EC (*batch mode*) sont montrées sur la figure 4 :

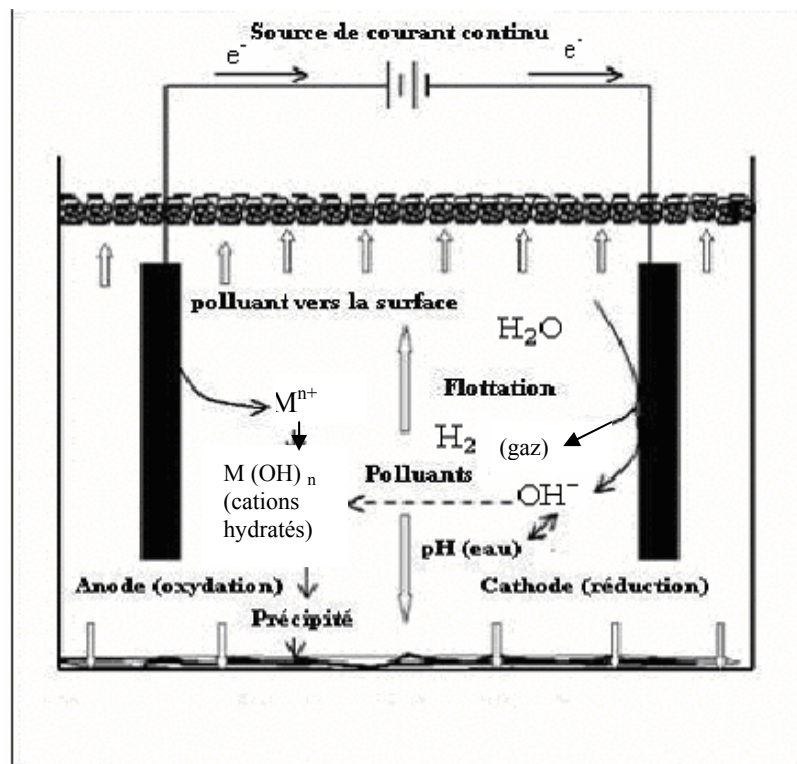
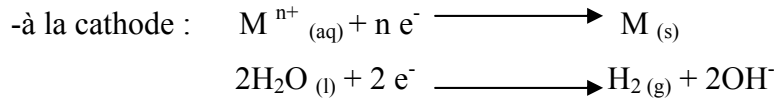
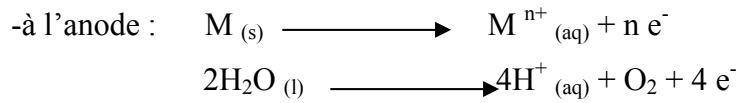


Figure 4 : Schéma du procédé d'électrocoagulation (Daneshvar *et al.*, 2006)

Les réactions électrochimiques avec un métal M comme anode peuvent être résumées comme suit :



Les gaz produits aux électrodes peuvent entraîner la flottation des matières coagulées (Szpyrkowicz, 2005).

Cependant, une cellule d'EC à deux électrodes ne convient pas pour le traitement des eaux usées, du fait que la vitesse de dissolution du métal n'est pas exploitable et il est alors nécessaire d'utiliser des électrodes présentant de grandes surfaces (Mollah *et al.*, 2001). Ceci est rendu possible par utilisation d'électrodes supplémentaires monopolaires ou bipolaires :

V-3-3-1- Electrodes monopolaires :

Les électrodes monopolaires peuvent être connectées soit en parallèle, soit en série ;

* Connexion en parallèle :

La figure 5 montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle. Cette cellule EC consiste essentiellement en paires de plaques de métal conducteur placées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu:

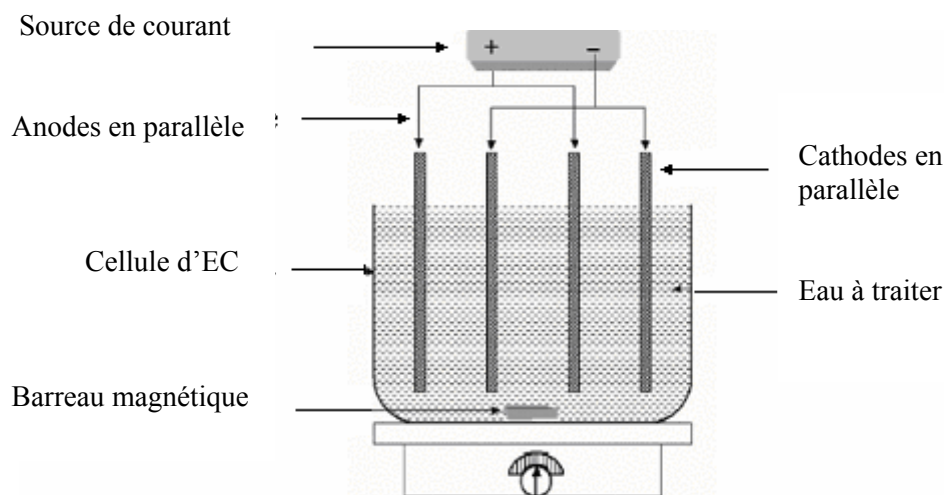


Figure 5 : Connexion en parallèle d'électrodes monopolaires (Mollah *et al.*, 2004)

Les plaques métalliques conductrices sont appelées communément « électrodes sacrificielles ». L'anode sacrificielle abaisse le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être constituées des mêmes matériaux que l'anode ou de matières différentes (Mollah et *al.*, 2004).

*** Connexion en série :**

Comme le montre la figure 6, chaque paire d'électrodes sacrificielles est interconnectée l'une avec l'autre, et n'a donc pas d'interconnexions avec les électrodes externes. Cette disposition de cellules EC avec des électrodes monopolaires en série est similaire du point de vue électrique à une simple cellule avec plusieurs électrodes et des interconnexions.

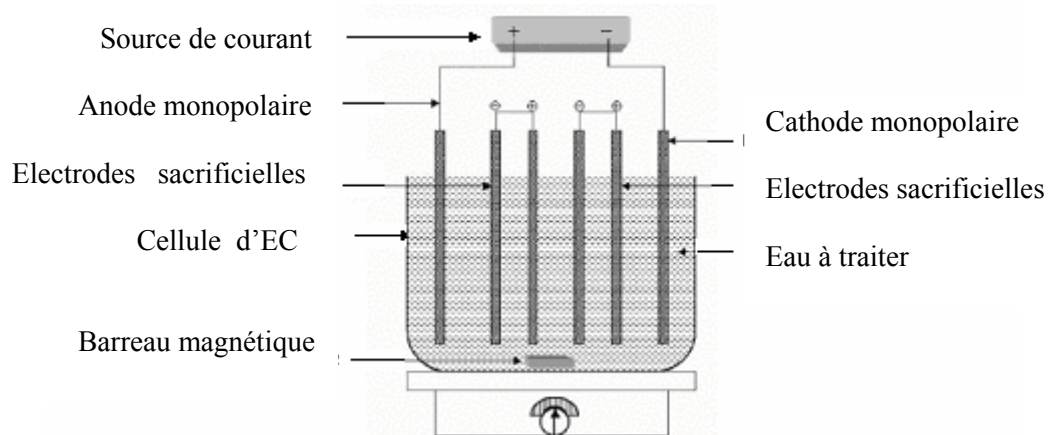


Figure 6 : Connexion en série d'électrodes monopolaires (Mollah et *al.*, 2004)

Dans un montage en série, pour une intensité de courant, on a besoin d'une différence de potentiel plus élevée car les cellules connectées en série ont une résistance plus élevée. Cependant, une même intensité de courant traverse toutes les électrodes.

V-3-3-2- Electrodes bipolaires :

Dans ce cas, les électrodes sacrificielles sont placées entre deux électrodes parallèles sans aucune connexion électrique, comme le montre la figure 7. Seules les deux électrodes monopolaires sont connectées à la source de courant sans aucune interconnexion entre les électrodes sacrificielles.

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

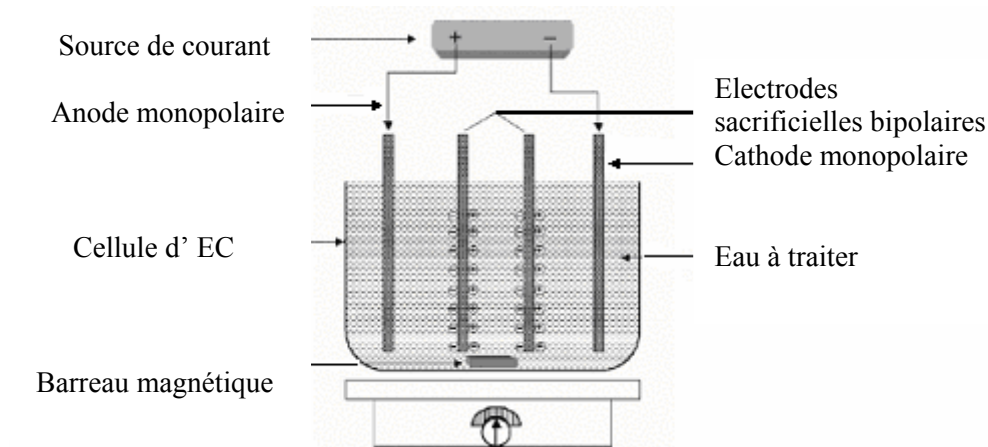


Figure 7 : Connexion des électrodes bipolaires (Mollah *et al.*, 2004)

V-3-4- Avantages de l'électrocoagulation :

- Elle nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile.
- L'eau traitée par EC a des propriétés appréciables : l'eau a un goût acceptable, elle est claire, incolore et inodore.
- Les floccs formés par EC sont similaires aux floccs chimiques, sauf que les floccs EC ont tendance à être plus grands, qu'ils contiennent moins d'eau liée, sont résistants aux acides et plus stables, et peuvent être ainsi séparés plus rapidement par filtration (Mollah *et al.*, 2001).
- Comparée à la coagulation- floculation traditionnelle, l'EC a en théorie l'avantage d'éliminer les particules colloïdales les plus petites : les particules chargées les plus petites ont une plus grande probabilité d'être coagulées à cause du champ électrique qui les met en mouvement.
- Une pollution secondaire peut être causée par les substances chimiques ajoutées à grandes concentrations quand la coagulation chimique est appliquée pour traiter les effluents textiles. L'addition excessive des coagulants peut être évitée dans le cas de l'EC car la génération des coagulants se fait par électro oxydation de l'anode sacrificielle (Gürses *et al.*, 2002).

- La technique EC peut être utilisée facilement en milieu rural où l'électricité pourrait ne pas être disponible, puisqu'un panneau solaire relié à l'unité peut suffire pour mener à bien le procédé d'EC (Mollah et *al.*, 2001).

V-3-5- Inconvénients de l'électrocoagulation :

- Les électrodes « sacrificielles » sont dissoutes dans l'eau usée par suite de leur oxydation, ce qui nécessite le remplacement régulier de ces électrodes.
- L'utilisation de l'électricité peut revenir chère en certains lieux.
- Il peut se former un film imperméable d'oxyde sur la cathode, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d'EC.
- La technique EC nécessite que la suspension d'eau usée traitée ait une conductivité élevée (Mollah et *al.*, 2001).

V-3-6- Utilisation de l'électrocoagulation :

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

Mameri et *al.* (1998) ont étudié l'élimination des ions fluorures dans les eaux du Sud Algérien par électrocoagulation bipolaire en utilisant des électrodes en aluminium. Ils sont arrivés à diminuer la concentration en fluorures de 6,0 à moins de 0,8 mg.L⁻¹ enregistrant ainsi un taux d'abattement de l'ordre de 90%.

L'EC a été utilisée pour l'élimination des nitrates (Savaş Koparal et Ögütveren, 2002) et des phosphates (Irdemez et *al.*, 2006) retrouvés dans les eaux de surfaces et le sol, surtout dans les zones où l'agriculture est la principale industrie, sachant qu'ils sont responsables d'un problème majeur qui est l'eutrophisation.

Le traitement d'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières en suspensions, une DCO supérieure à 500 mg.L⁻¹, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg.L⁻¹...etc. a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et 75% de DCO par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium (Chen et Sheng, 2003).

On a utilisé le procédé d'EC pour le traitement de solutions colorées par différentes substances telles que le bleu de méthylène et le jaune éosine (Golder et *al.*, 2005)...etc.

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 (Jumpatong et *al.*, 2006).

Kobyra, Hiz et *al.* (2006) ont traité par EC des rejets d'usine de pomme de terre très chargés en composés organiques incluant des carbohydrates, amidon, protéines, vitamines, pectines et sucres qui sont responsables de grande DCO, DBO et matières en suspension.

Les résultats obtenus suite à l'élimination de la lignine et du phénol des effluents de papeteries par EC ont prouvé que celle-ci pouvait être une alternative efficace pour le traitement de ce genre d'effluents (Uğurlu et *al.*, 2007).

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 (Khoufi et *al.*, 2007).

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

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE VI

MATERIELS et METHODES

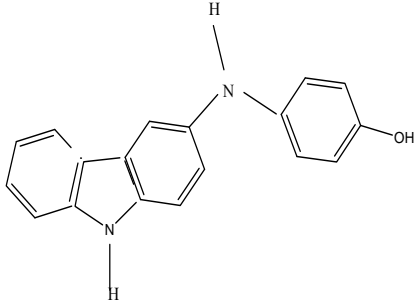
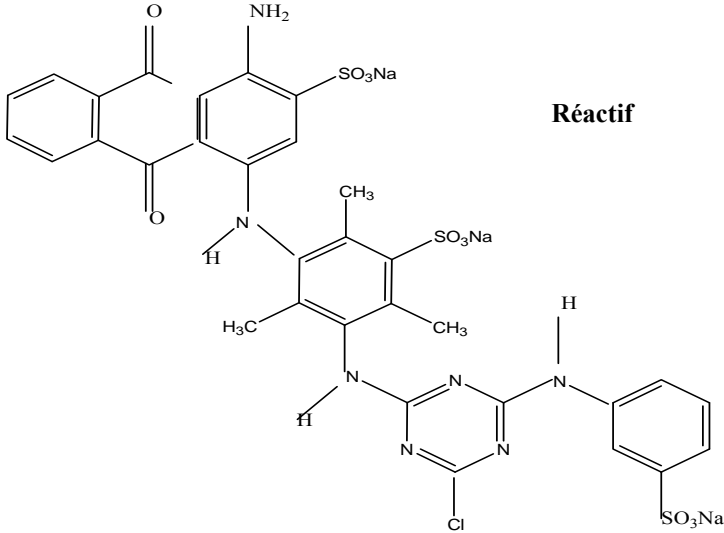
VI-1- Matériels :

VI-1-1- Effluent synthétique :

Il a été préparé au laboratoire par dissolution dans de l'eau distillée des colorants Bleus appartenant à deux classes largement utilisées en industrie textile : les colorants au soufre et les colorants réactifs.

Les colorants que nous avons utilisés, nous ont été gracieusement fournis par l'entreprise des textiles **COTITEX** de Draa Ben Khedda ; leurs caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Tableau III : Caractéristiques des colorants chimiques employés

Type de colorant	N° de réf.(C.I.)	Structure	Classe Chimique	M (g.mol ⁻¹)	λ (nm)
Bleu Hydrone (BH)	43		Au soufre	259	620
Bleu Cibacrone (BC)	49		Réactif	867.5	585

VI-1-2- Effluent réel :

Le rejet réel que nous avons traité en deuxième partie de notre étude a été prélevé dans une unité de production de textiles à Alger ; il s'agit de l'entreprise **FITAL**, et ceci juste après le procédé de teinture par un mélange de trois colorants appartenant à la classe des cationiques : Bleu Sandocryl (BS), Jaune Sandocryl (JS) et Rouge Sandocryl (RS) en plus d'autres composés chimiques comme il est indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV : Composition de l'effluent réel

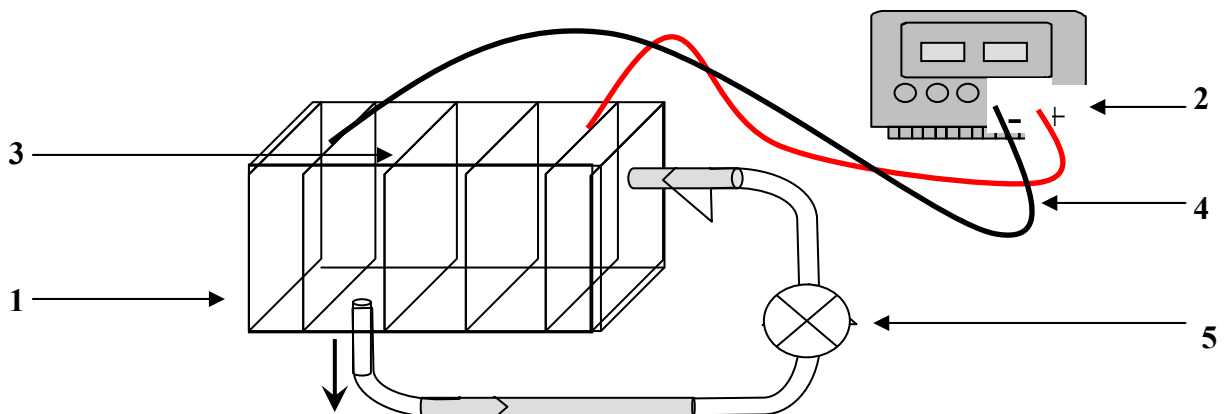
Composé	Valeur
Jaune Sandocryl	0,6%
Rouge Sandocryl	0,3%
Bleu Sandocryl	0,225%
Acide Formique (85%)	2,5 L
Sel (NaCl)	25 Kg
Belfasin (adoucissant)	5 L

Le pH du rejet au prélèvement était de 5,2 et sa température de 89°C, mesurés par un appareil de type : pH 330 i WTW.

Les structures chimiques des colorants employés dans cette entreprise sont protégées par le fournisseur.

VI-1-3- Dispositif expérimental :

Le dispositif a été monté au laboratoire, et il est schématisé sur la figure 8 :

**Figure 8 : Montage du dispositif d'électrocoagulation**

Les numéros sur le schéma permettent de légénder le montage comme suit :

1-**réacteur** en plexiglas de dimensions 15x12,5x12 cm³.

2-**générateur** de courant électrique de type ERMS.

3-**électrodes** en métal (fer ou aluminium).

3-fils électriques de connexion.

5-**pompe** de type KNF pour faire circuler et homogénéiser la solution (le travail se fait en Batch Mode).

Le réacteur est rempli avec 1L de l'effluent (synthétique ou réel) à traiter et ceci dans des conditions opératoires choisies. La conductivité de la solution est ajustée avec du NaCl (Cheminova, Espagne), le pH est réglé avec des solutions à 1N de NaOH ou H₂SO₄ (Merck, Allemagne).

VI-2- Méthodes :

Les spectres d'absorbance des différents colorants ont été obtenus par spectrophotomètre de type UV- VIS Shimadzu entre 400 et 800 nm (lumière visible), ce qui a permis de déterminer la longueur d'onde optimale à laquelle leur absorbance est maximale ; les spectres pour les concentrations initiales en chaque colorant de 50 mg.L⁻¹ ont été retenus et sont représentés sur les figures 9 et 10 :

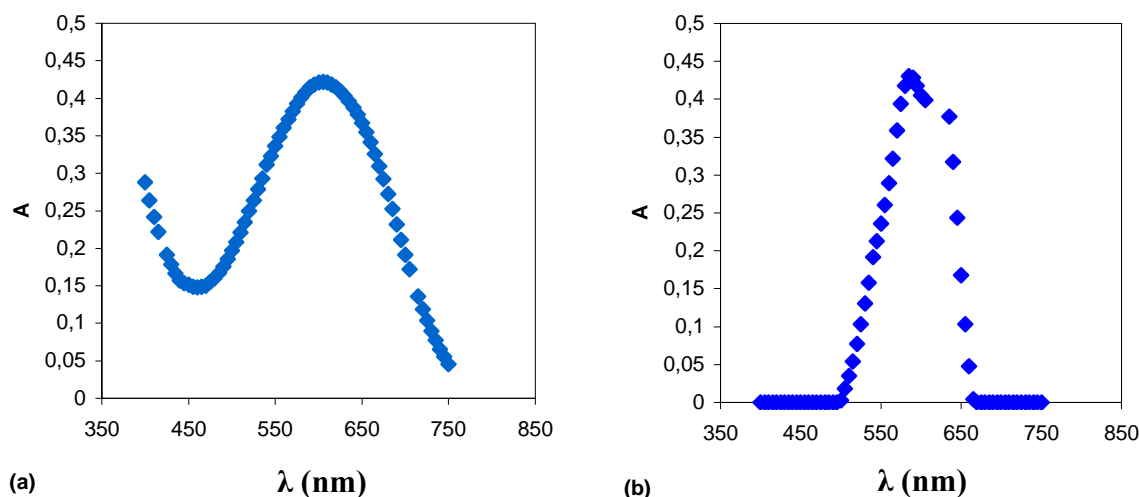


Figure 9 : Spectres d'absorbance du Bleu Hydrone (a) et Bleu Cibacrone (b)

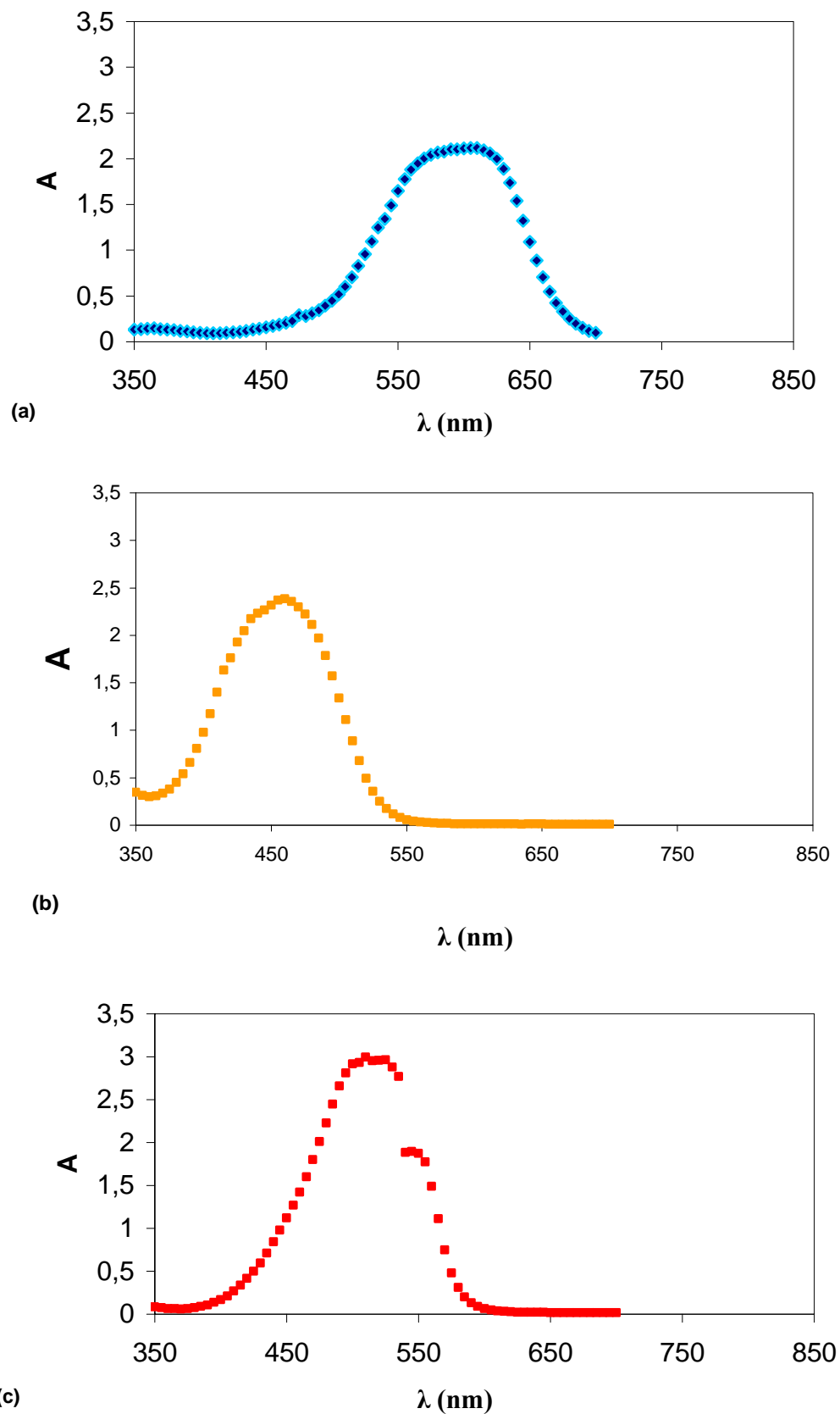


Figure 10 : Spectres d'absorbance du Bleu Sandocryl (a), Jaune Sandocryl (b) et Rouge Sandocryl (c)

A partir des différents spectres, nous avons enregistré les longueurs d'ondes (λ) optimales suivantes :

colorants	λ (nm)
Bleu Hydronne (BH)	620
Bleu Cibacrone (BC)	585
Bleu Sandocryl (BS)	605
Jaune Sandocryl (JS)	457
Rouge Sandocryl (RS)	525

Suite à la détermination des λ optimales pour une absorbance maximale des colorants étudiés, une courbe d'étalonnage pour chaque colorant a été tracée (voir annexe) afin de pouvoir estimer sa concentration en solution.

Le pourcentage d'élimination des colorants 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) des colorants (en mg.L^{-1}).

Au cours du procédé d'électrocoagulation, des échantillons de la solution en traitement sont prélevés, leur pH est mesuré par un pH mètre de type Metrohm 691, ils sont filtrés ensuite dosés par le même spectrophotomètre à la longueur d'onde qui convient.

La conductivité des solutions est mesurée à l'aide d'un conductimètre de type EC 214 (Hanna Instruments).

CHAPITRE VII

RESULTATS et DISCUSSION

VII-I- Application de l'électrocoagulation à un effluent synthétique :

L'électrocoagulation est une méthode physicochimique qui dépend des paramètres suivants :

- La conductivité ;
- La densité de courant ;
- Le pH de la solution ;
- La concentration en colorants ;
- La distance inter- électrodes ;
- Le nombre d'électrodes ;
- La nature des électrodes ;

VII-1-1- Expériences « tests » :

Avant d'étudier l'influence des différents paramètres venant d'être cités, nous avons mené au préalable un pré-test de traitement par ECM (Electrocoagulation Monopolaire) de solutions synthétiques préparées par dissolution de 50 mg de colorant par litre d'eau distillée, sans rajout de sel, sans ajustement du pH et avec une intensité de courant basse.

Nous rappelons que le régime monopolaire signifie que nous avons appliqué deux électrodes dont l'une est sacrificielle. Nous avons testé deux types d'électrodes, celles en fer et celles en aluminium ainsi que deux colorants, le Bleu Hydrone (BH) et le Bleu Cibacrone (BC).

Durant toute la durée des manipulations, nous avons effectué des prélèvements, et avant d'être analysés par spectrophotométrie Visible, les échantillons ont subi des filtrations pour éliminer toutes traces de précipités.

Les résultats obtenus, exprimés en pourcentage d'élimination (E%) et portés en fonction du temps de traitement (minutes), sont représentés sur les figures 11 et 12 :

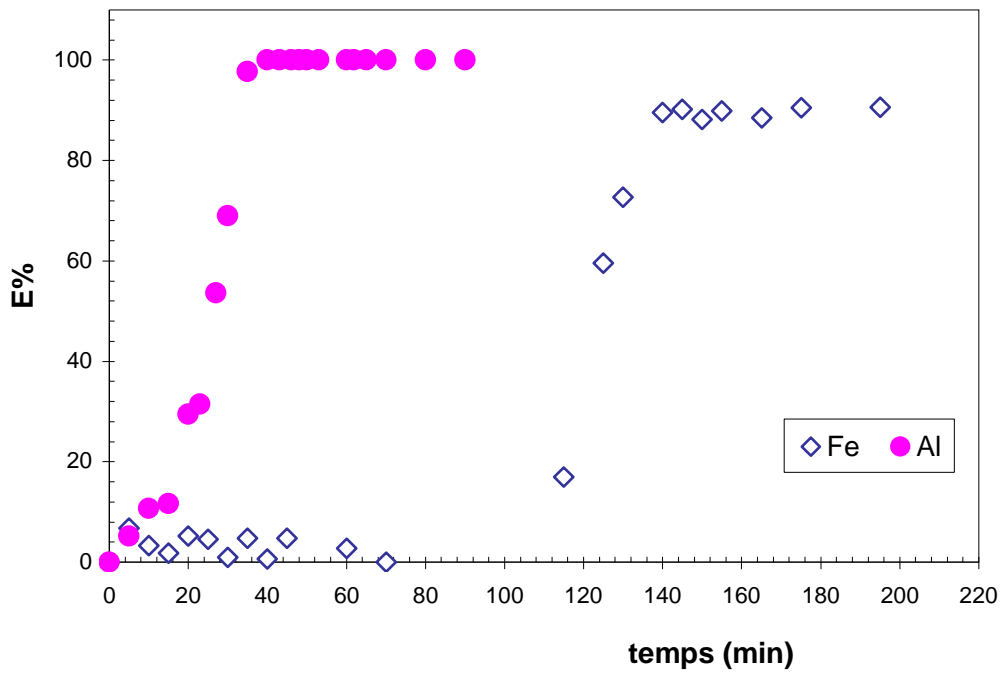


Figure 11 : Cinétique de traitement d'une solution de BH par ECM
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, absence de sel, pH_i de la solution, $I=0,03\text{A}$, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$

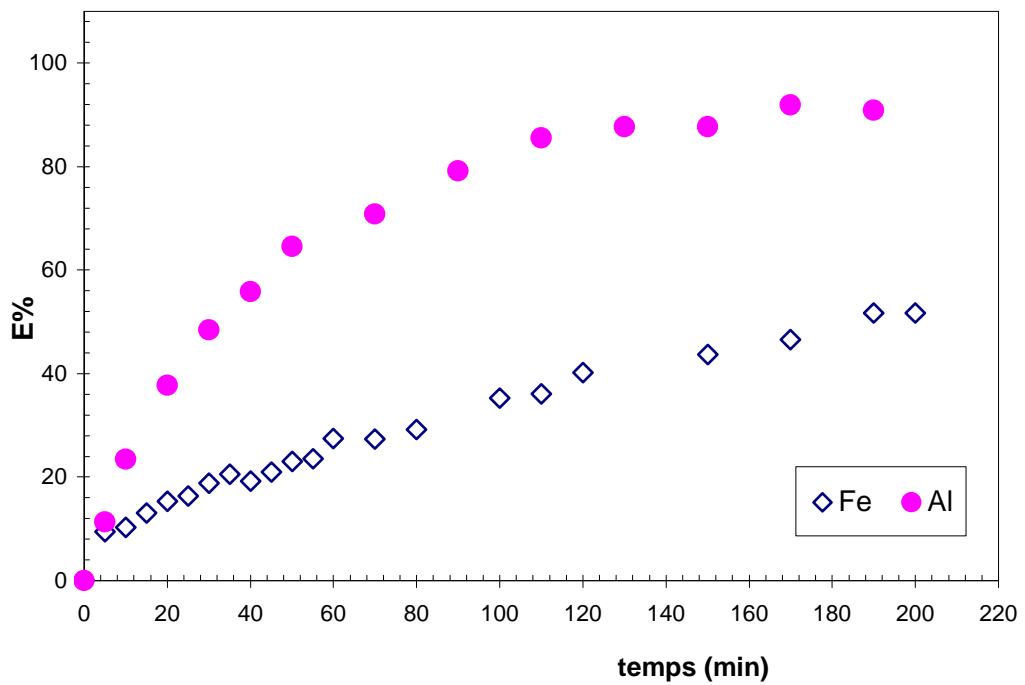


Figure 12: Cinétique de traitement d'une solution de BC par ECM
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, absence de sel, pH_i de la solution, $I=0,03\text{A}$, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$

Nous pouvons constater que mise à part le traitement de la solution du BH par électrodes en aluminium qui nécessite un temps de 40 minutes pour une dégradation quasi-complète du colorant, les traitements des autres solutions synthétiques nécessitent des temps opérationnels de près de deux heures. Cependant, une dégradation partielle et non complète des colorants est constatée dans ces derniers cas.

Par exemple, nous avons atteint un taux d'élimination du BC seulement de 51% par les électrodes en fer après plus de trois heures de traitement ; ces temps opératoires sont estimés très longs en traitement des eaux (Mameri et *al.*, 1998).

La conductivité de ces solutions a été mesurée et s'est avérée très faible ($24,5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et $50,6 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ respectivement pour le BH et le BC), ce qui refléterait une forte résistance à la migration des ions formés, ce qui n'est pas recommandé pour un procédé électrochimique comme l'électrocoagulation. Ainsi, il nous est nécessaire d'ajuster la conductivité des solutions en ajoutant un électrolyte (un sel) dont l'influence sera étudiée en premier lieu ; suivra par la suite l'étude de l'influence des autres paramètres.

VII-1-2- Effet de la concentration en NaCl :

Un des principaux facteurs influençant le traitement d'une solution par la technique d'électrocoagulation est la conductivité de la solution elle-même. La conductivité peut être modifiée par utilisation d'un sel (électrolyte) ; nous avons utilisé le chlorure de sodium (NaCl) pour cet objectif.

Ainsi, l'influence du sel a été étudiée en faisant varier sa concentration ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) dans les solutions de colorants préparées ; les autres paramètres ont été maintenus constants à savoir :

- *La concentration initiale du colorant **50 mg.L⁻¹**.
- *L'intensité de courant **0,3A**.
- *Le type d'électrodes (fer ou aluminium).
- *Le nombre d'électrodes **2** (EC monopolaire).
- *La distance inter- électrodes **2cm**.
- *Le pH des solutions.

Les résultats obtenus sont exprimés en pourcentage d'élimination des colorants en fonction du temps réactionnel et la concentration de NaCl (pour chaque colorant et chaque type d'électrodes), ils sont représentés sur les figures 13 et 14 :

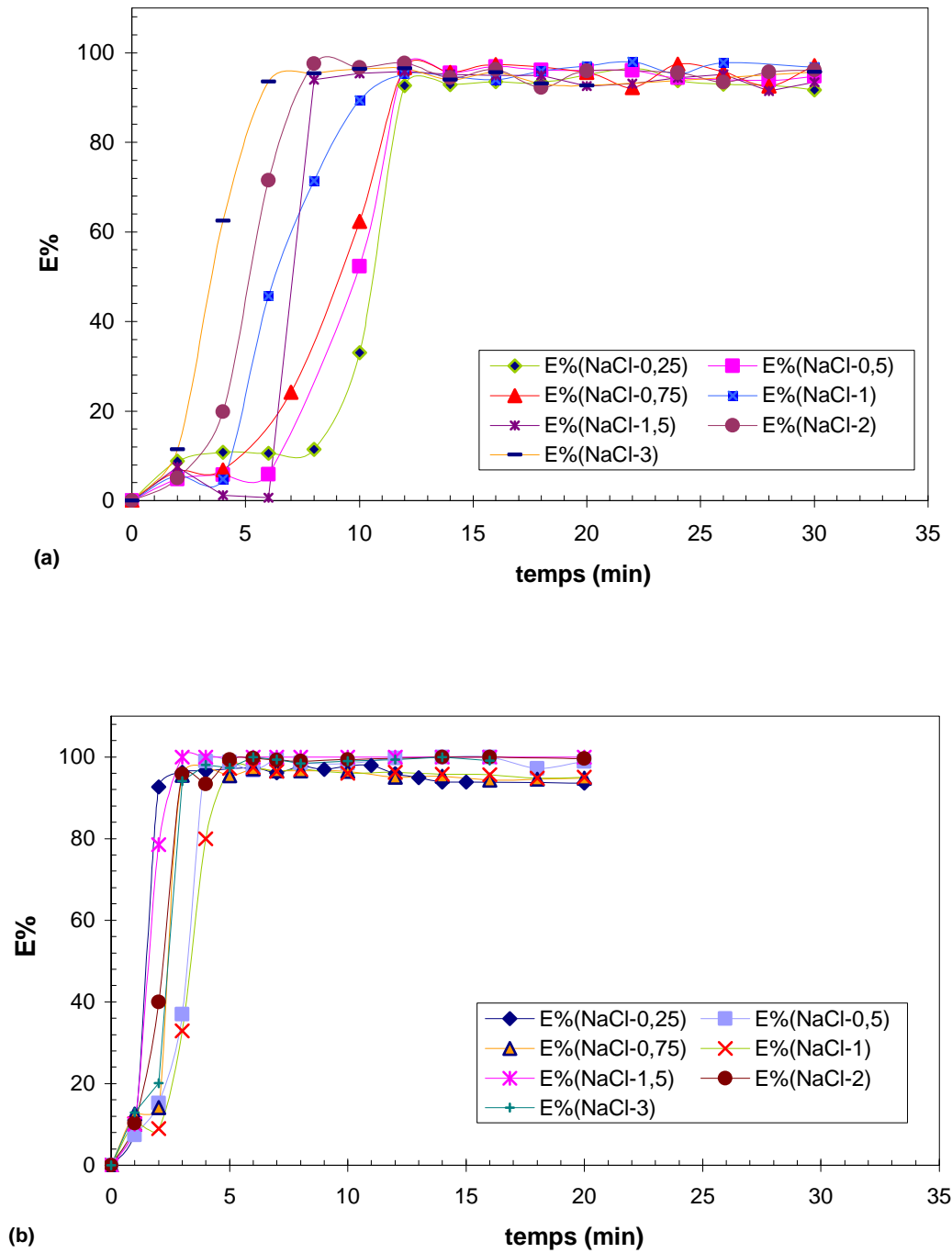


Figure 13 : Influence de la concentration en NaCl sur l'élimination du BH
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, $I=0,3\text{A}$, pH_i de la solution, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$ (a) électrodes en fer,
 (b) électrodes en aluminium

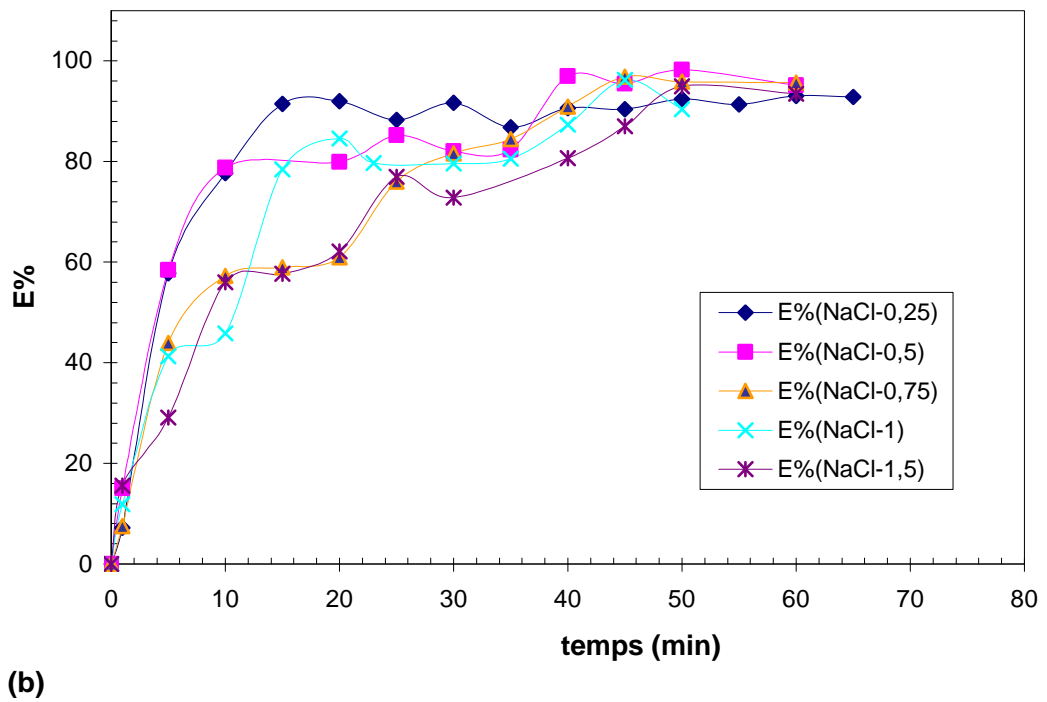
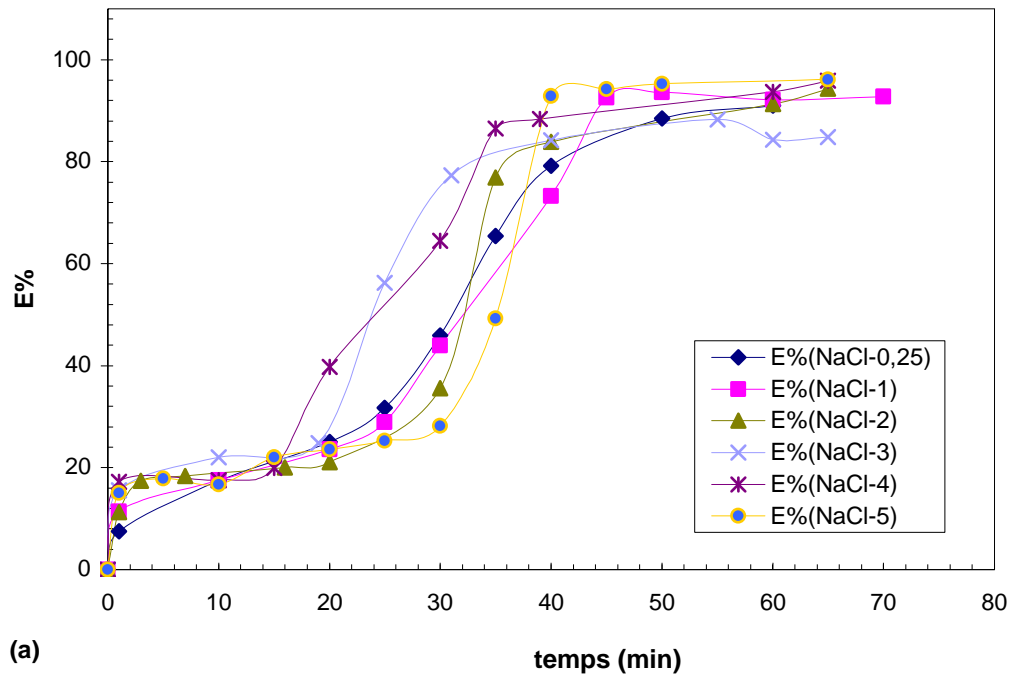


Figure 14 : Influence de la concentration en NaCl sur l'élimination du BC
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, $I=0,3\text{A}$, pH_i solution, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$ (a) électrodes en fer,
 (b) électrodes en aluminium

D'après ces résultats, nous remarquons que l'augmentation de la concentration du sel dans le milieu, donc l'augmentation de la conductivité, entraîne des variations dans la cinétique de décoloration aussi bien du Bleu Hydrone (BH) que du Bleu Cibacrone (BC).

Afin de bien mettre en évidence l'influence de la conductivité, nous traçons les graphiques donnant les taux d'élimination enregistrés après 10 min et 40 min de temps opérationnel respectivement pour le BH et le BC et ce pour les deux types d'électrodes utilisées, ces graphiques sont montrés sur les figures 15 et 16:

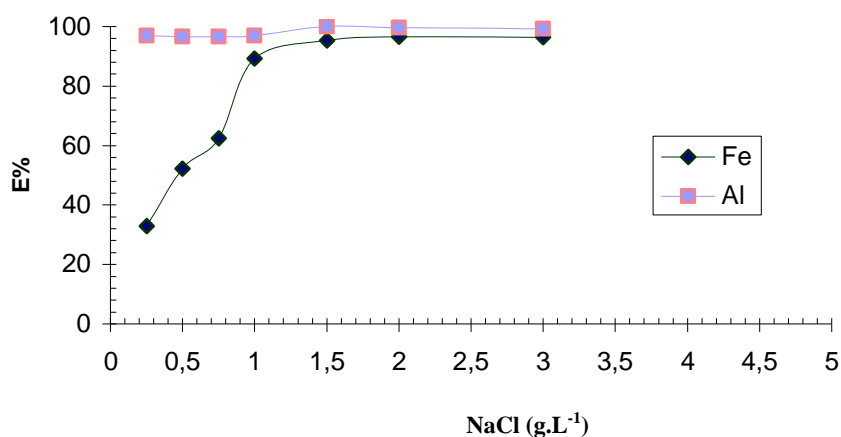


Figure 15 : Evolution du taux d'élimination du BH en fonction de la teneur en sel Electrodes en Fe et en Al, temps=10 min.

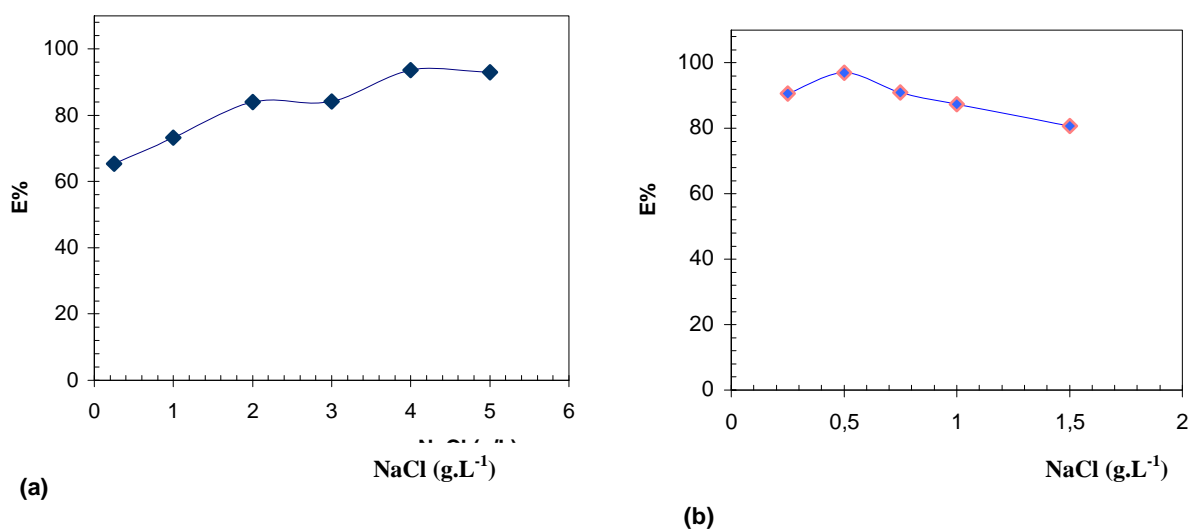


Figure 16 : Evolution du taux d'élimination du BC en fonction de la teneur en sel Electrodes en Fe (a), électrodes en Al (b), temps=40 min

Nous pouvons constater que les profils des courbes représentant l'efficacité du traitement par EC en fonction de la salinité du milieu réactionnel ne sont pas les mêmes que ce soit pour les colorants utilisés ou le type d'électrodes employées.

Prenons l'exemple du colorant Bleu Hydron (BH) et dans le cas d'emploi des électrodes en fer, une dose de sel de $1,5\text{g.L}^{-1}$ conduit à une amélioration de l'efficacité du traitement de 30% à 96%, ce qui est assez considérable, ensuite un palier est constaté. Une salinité supérieure ne semble pas apporter des gains d'efficacité et dans la gamme de salinité étudiée.

Par contre, avec l'utilisation des électrodes en aluminium, des taux d'efficacité de l'ordre de 96% sont obtenus même à des salinités très faibles de l'ordre de $0,3\text{g.L}^{-1}$, une élimination complète du colorant BH est obtenue avec une teneur en sel (NaCl) de $1,5\text{g.L}^{-1}$.

Dans le cas du Bleu Cibacron (BC), des résultats différents suivant les électrodes utilisées sont obtenus. Si les électrodes en aluminium sont efficaces concernant les taux d'élimination du colorant où des valeurs supérieures à 96% sont obtenues à des faibles concentrations en sel, ce n'est pas le cas des électrodes en fer où des taux d'efficacité du traitement d'EC entre 85% et 90% sont enregistrés mais cependant avec une salinité de l'ordre de $4-5\text{g.L}^{-1}$.

Nous remarquons pour le BC traité par électrodes d'aluminium que, le passage de $0,25\text{g.L}^{-1}$ à $0,5\text{g.L}^{-1}$ a déjà permis une augmentation de 90% à 96% du taux d'élimination du colorant ; Au-delà de $0,5\text{g.L}^{-1}$, un apport supplémentaire en sel semble d'un effet négatif sur l'efficacité du procédé où une diminution est enregistrée.

La diminution du taux de décoloration peut être attribuée au changement dans la force ionique dû au changement de la conductivité dans le milieu aqueux. La force ionique affecte les cinétiques et l'équilibre des réactions entre les espèces chargées se produisant durant l'EC (Bayramoglu et *al.*, 2004) ; Ces espèces dépendent de la nature des électrodes utilisées .

D'une manière globale, le traitement par ECM a donné des résultats excellents avec l'utilisation des électrodes en aluminium et ce pour les deux colorants utilisés avec une salinité très faible, de l'ordre de $0,5-1,5\text{g.L}^{-1}$ (NaCl). Des performances moindres sont obtenues dans le cas des électrodes en fer.

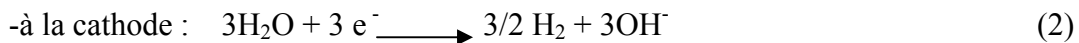
Des effets similaires de l'amélioration d'élimination des colorants textiles des effluents par augmentation de la conductivité ont été rapportés par différents auteurs (Mollah, Pathak et *al.*, 2004).

Koby et *al.* (2003), affirment qu'une conductivité élevée est favorable pour une haute performance du procédé d'électrocoagulation.

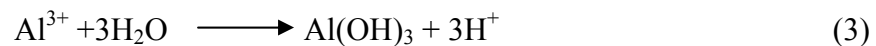
Maintenant, nous présentons ci dessous, les mécanismes qui sont intervenus lors du traitement par EC et les espèces produites selon la nature des électrodes utilisées :

***Electrodes en aluminium :**

Sous l'action du courant électrique, il se produit des réactions d'oxydoréduction à l'anode et à la cathode :



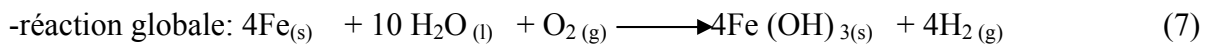
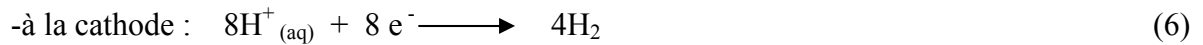
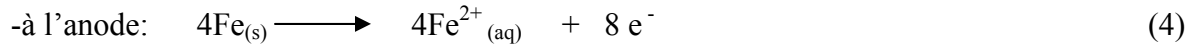
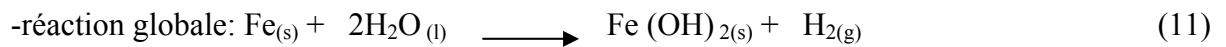
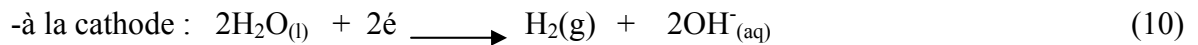
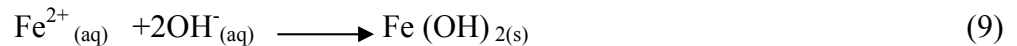
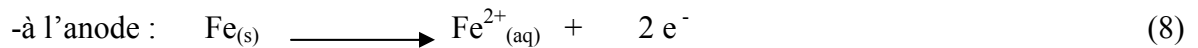
Les ions Al^{3+} et OH^- générés par (1) et (2) vont réagir pour former des espèces monomériques variées telles que : $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, et des espèces polymériques telles que : $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$, qui se transforment enfin en $\text{Al}(\text{OH})_3$ suivant des cinétiques de précipitation complexes (Can et *al.*, 2003) :



Les floes amorphes $\text{Al}(\text{OH})_3$ dits « *sweep floes* » fraîchement formés ont de larges surfaces qui sont bénéfiques pour une adsorption rapide des composés organiques solubles et le piégeage des particules colloïdales (Bayramoglu, 2004).

*Electrodes en fer :

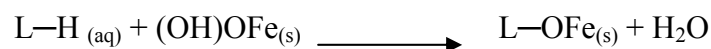
Le fer, après oxydation dans un système électrolytique, produit de l'hydroxyde de fer $\text{Fe}(\text{OH})_n$, avec $n=2$ ou 3 ; ainsi deux mécanismes ont été proposés (Daneshvar et al., 2003) :

Mécanisme 1 :Mécanisme 2:

Durant l'électrocoagulation avec le fer, différentes espèces peuvent se former aussi, telles que:

Fe OH^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^{+}$, $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^{-}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_2^{+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5 \text{OH}^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_4^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{2+}$, qui se transforment finalement en $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Kobyta et al., 2003). Les espèces $\text{Fe}(\text{OH})_n$ formées (par les 2 mécanismes) restent dans la phase aqueuse sous forme de suspension gélatineuse qui peut alors débarrasser les polluants de l'eau notamment les colorants, soit par complexation, soit par attraction électrostatique suivie de coagulation et flottation (Zaroual et al., 2006).

En mode complexation de surface, il est supposé que le polluant pourrait agir comme un ligand pour lier chimiquement les hydroxydes ferreux :



En mode attraction électrostatique, les hydroxydes ferreux neutralisent les charges des espèces polluantes ce qui permet leur élimination de la solution (Mollah et *al.*, 2001).

Dans toutes nos expériences avec les électrodes en fer et dans la solution au cours du traitement par EC, nous avons constaté aux premières minutes de la réaction, un trouble vert jaunâtre, peu de temps après, l'effluent se clarifiait avec formation de boues de couleur brun-orangé (couleur de rouille).

Les couleurs vert et brun- orangé peuvent probablement être attribuées à la présence des hydroxydes ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) et ferriques ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) dans la solution, (Tréherne et Cessac, 1966 ; Cros et Arribet, 1969).

La même constatation a été rapportée par Zaroual et *al.* (2006), lors de leur étude sur un effluent textile par utilisation d'électrodes en fer.

Que ce soit avec électrodes en fer ou en aluminium et lors du procédé d'électrocoagulation, nous avons remarqué un dégagement de bulles de gaz à la cathode. Ce sont des bulles d'hydrogène, elles sont produites suite à l'électrolyse de l'eau qui peut aussi induire de l'oxygène à l'anode (Mollah et *al.*, 2004).

On a rapporté que ces bulles de gaz recueillent les polluants à la surface de la solution où ils sont plus facilement concentrés, collectés et éliminés (Daneshvar et *al.*, 2003).

Il s'est avéré que le taux de décoloration maximal atteint en moyenne pour toutes les concentrations de NaCl testées, était différent en pourcentage et en temps nécessaire entre le Bleu Hydrone et le Bleu Cibacrone mais aussi lorsqu'il s'agissait de traiter avec l'aluminium ou le fer. Afin d'illustrer ces différences et avoir une meilleure lisibilité des résultats obtenus, nous avons porté les T80%, T90% et T95% qui représentent les temps opérationnels nécessaires pour atteindre un pourcentage d'élimination de 80%, 90% et 95% respectivement des colorants de la solution en fonction de sa teneur en sel ; les résultats sont représentés sur les figures 17 et 18 :

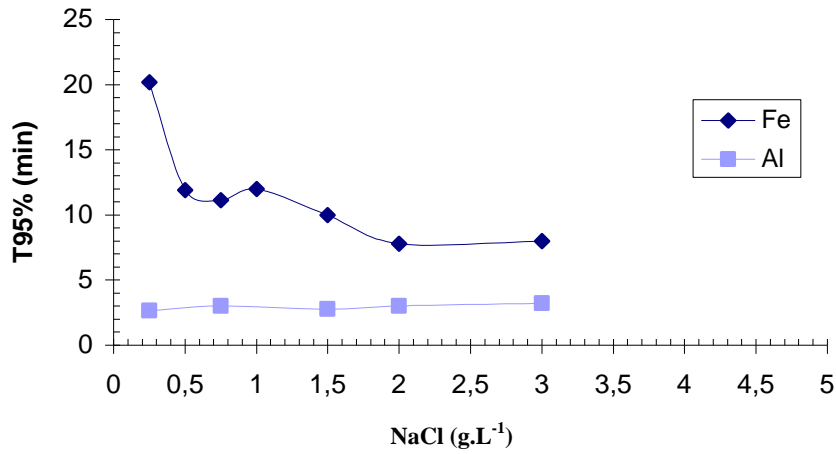


Figure 17 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de la concentration en NaCl, par électrodes en Fe et en Al

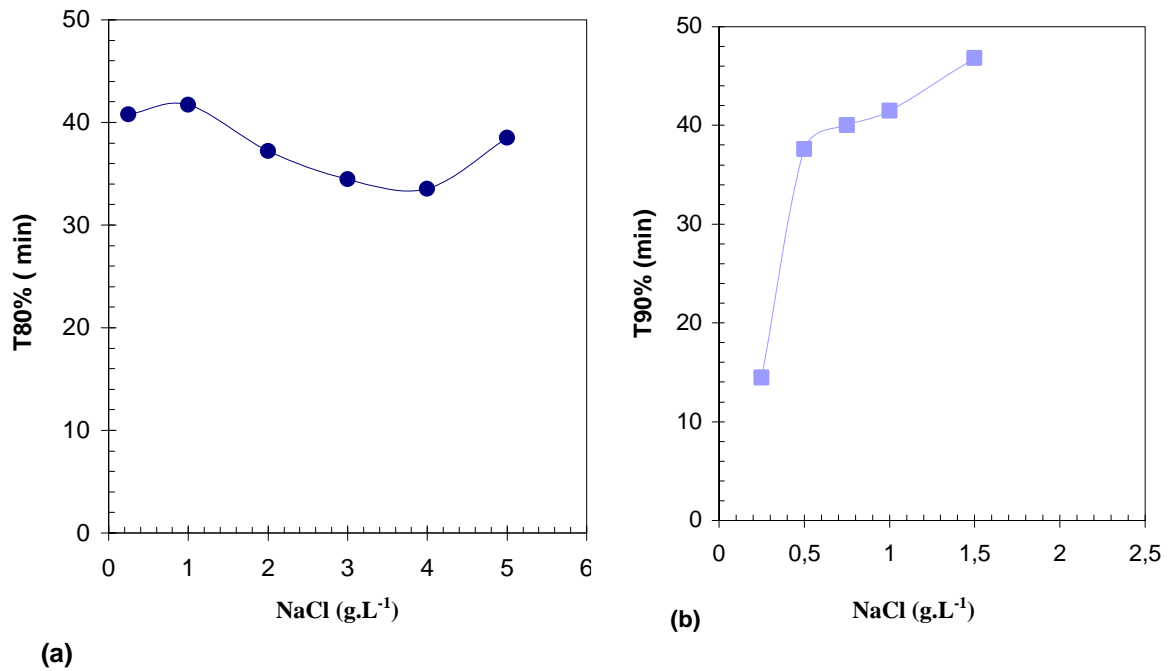


Figure 18 : Evolution des temps nécessaires pour 80% et 90% d'élimination du BC en fonction de la concentration en NaCl, par électrodes en Fe (a) et en Al (b)

Nous constatons que le Bleu Hydrone est plus rapidement éliminé que le Bleu Cibacrone et avec un pourcentage plus élevé. En effet, nous enregistrons 95% (en moyenne) pour le BH en un temps inférieur à 15 min (Fe ou Al), et entre 80 et 90% (Fe et Al respectivement) pour le BC entre 15 et 45 min.

Dorénavant, les concentrations de NaCl que nous utiliserons pour la suite de notre étude sont les suivantes :

*pour le Bleu Hydrone (BH) -électrodes en Fe : 2g.L^{-1} .

-électrodes en Al : $1,5\text{g.L}^{-1}$.

*pour le Bleu Cibacrone (BC) -électrodes en Fe : 4g.L^{-1} .

-électrodes en Al : 1g.L^{-1} .

VII-1-3- Effet de la densité de courant :

La densité de courant est un paramètre critique en électrocoagulation, étant donné qu'il est le seul pouvant être contrôlé directement (Holt *et al.*, 2005).

L'effet de la densité de courant sur l'élimination des colorants a été évalué en répétant le même essai avec les mêmes conditions opératoires mais avec des différentes intensités (et ce pour chaque colorant et chaque type d'électrodes). L'intensité appliquée varie entre 0,3A et 1,5 et/ou 2 A suivant les capacités du générateur utilisé.

L'analyse spectrophotométrique des filtrats des échantillons prélevés au cours du procédé de traitement par ECM dans les différentes conditions, donnent les résultats qui sont représentés sur les figures 19 et 20 exprimés par les pourcentages d'élimination des colorants des solutions synthétiques en fonction du temps de traitement.

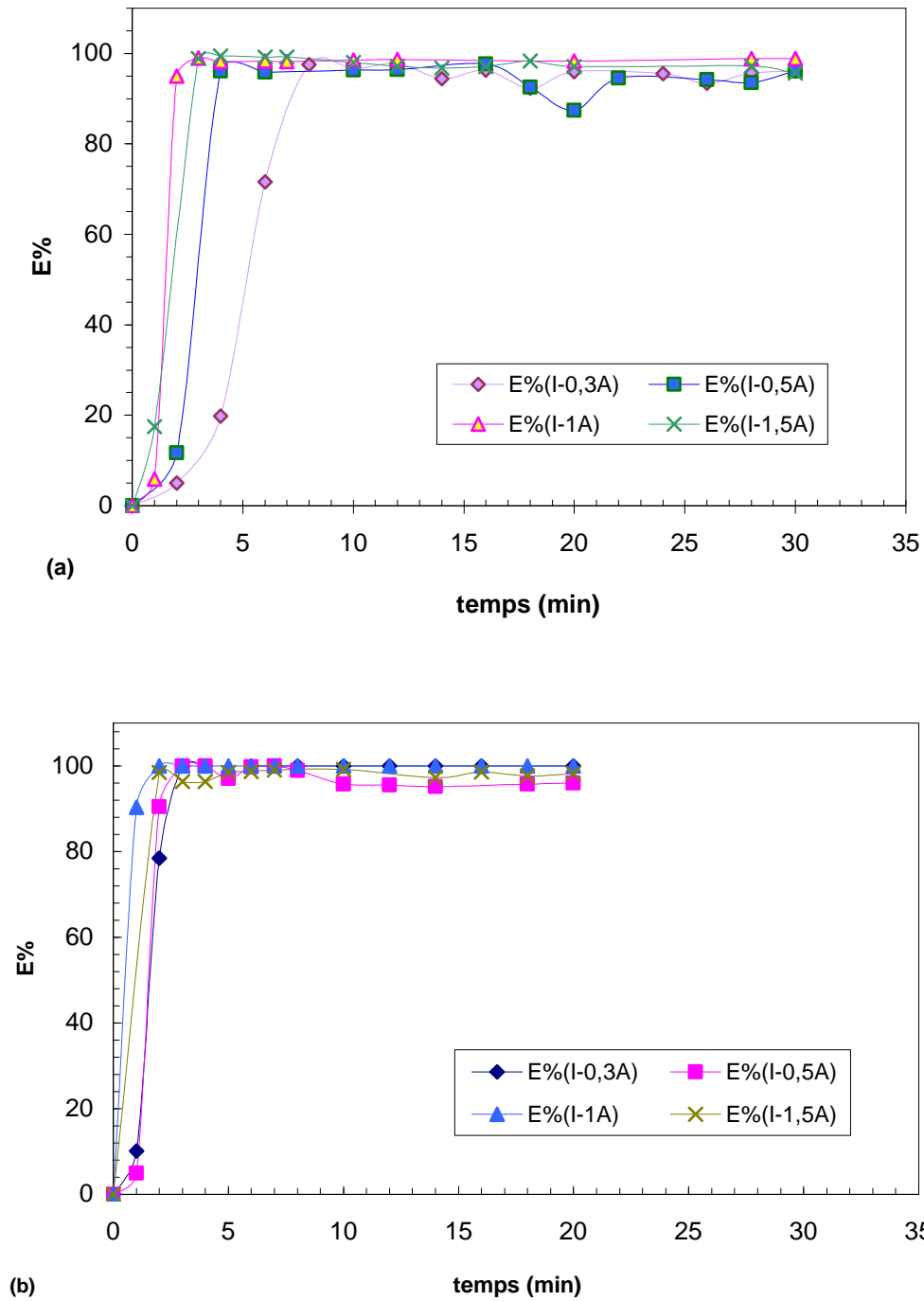


Figure 19 : Influence de I sur l'élimination du BH,
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, pH_i de la solution, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=2\text{g.L}^{-1}$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1,5\text{g.L}^{-1}$.

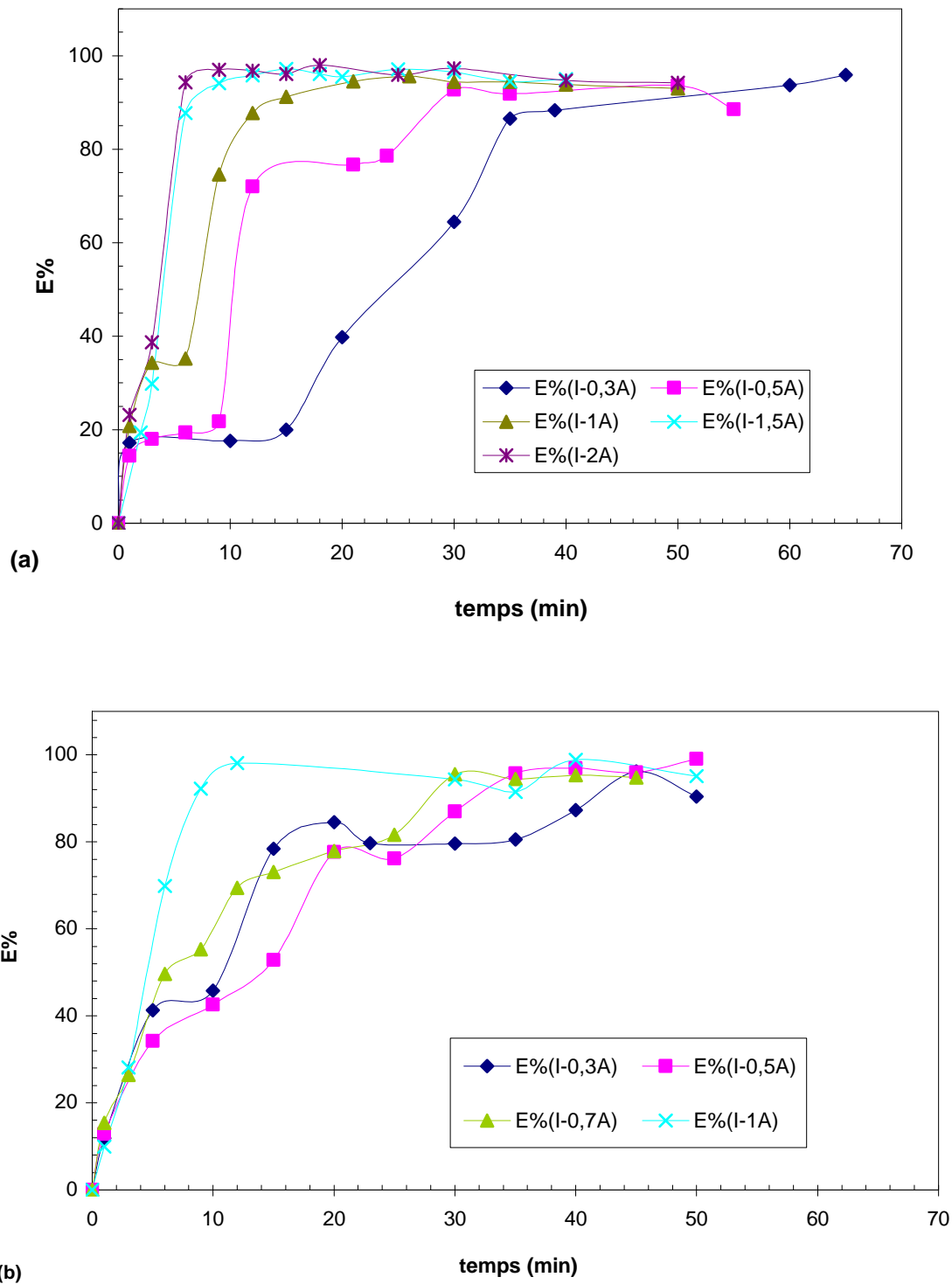


Figure 20 : Influence de I sur l'élimination du BC
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, pH_i de la solution, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=4\text{g.L}^{-1}$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1\text{g.L}^{-1}$.

A la lecture de ces graphes, il apparaît que l'application de valeurs d'intensité de courant ascendantes améliore le taux d'élimination ainsi que la cinétique de décoloration. Par exemple, pour le Bleu Cibacrone (BC), en un temps réactionnel de 10 min, le taux d'élimination passe de 17% sous une intensité de 0,3A à 96% sous une intensité de 2A (Fe) et de 45% sous une intensité de 0,3A à 95% sous une intensité de 1A (Al).

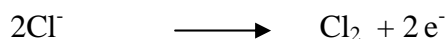
Pour le Bleu Hydrone (BH), en 2 minutes de traitement, nous avons déjà atteint 95% d'élimination sous une intensité de 1A avec les électrodes en fer. Pour l'aluminium, nous constatons que les différences de cinétiques ne sont pas flagrantes sous les intensités choisies bien que celles dépassant la valeur de 0,3A permettent de gagner quelques minutes de temps opérationnel.

Mollah, Pathak *et al.* (2004), lors du traitement d'un colorant azoïque utilisant des électrodes en fer, ont expliqué que les courants électriques élevés génèreraient un taux significatif des ions de fer qui, à leur tour vont piéger les molécules du colorant ce qui en accentue son élimination.

De même, 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 (Kobyta *et al.*, 2006).

Il est à noter que le niveau de 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 (Adhoum *et al.*, 2004).

Si le potentiel de l'anode est suffisamment élevé, des réactions secondaires peuvent aussi avoir lieu, telles que l'oxydation directe des composés organiques et des ions Cl⁻ présents dans l'effluent (Kobyta *et al.*, 2003) :



Le gaz chlore produit est un oxydant fort qui peut oxyder quelques composés organiques.

Pour ce paramètre nous avons également tracé les T90% et T95% qui sont illustrés sur les figures 21 et 22:

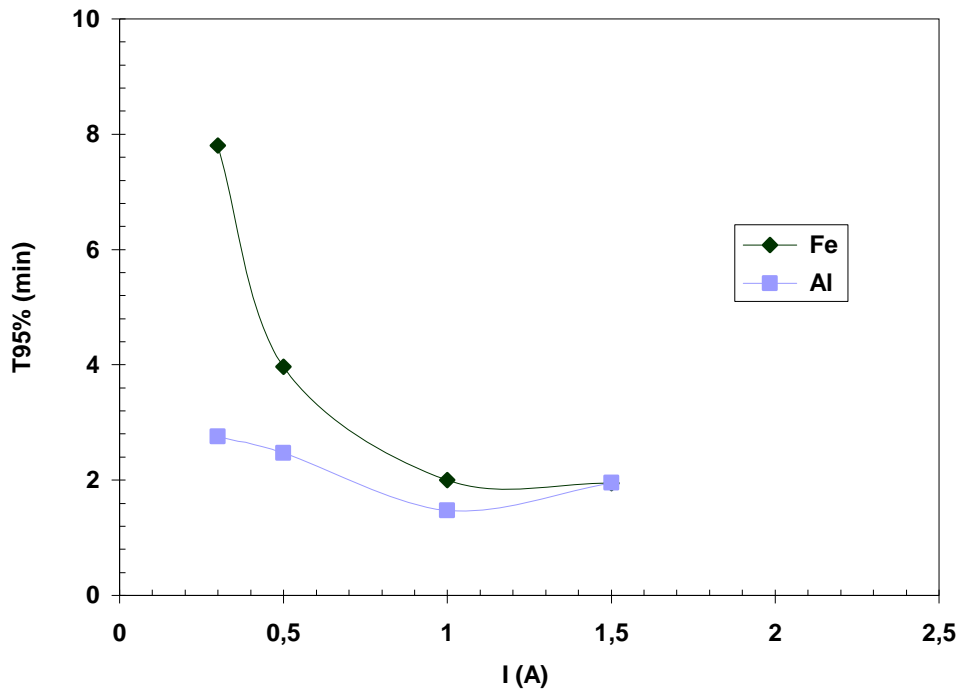


Figure 21 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de l'intensité de courant, par électrodes en Fe et en Al

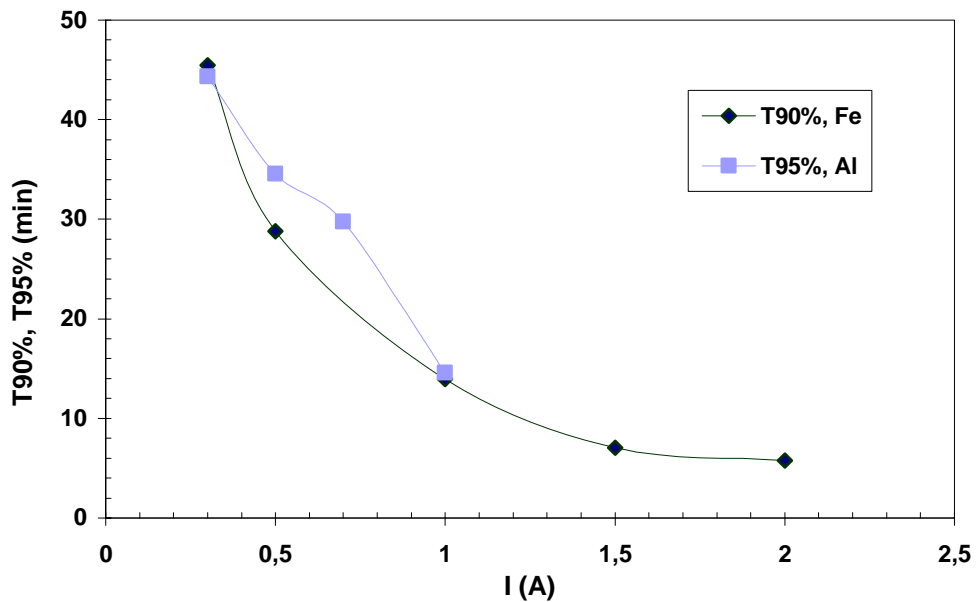


Figure 22 : Evolution des temps nécessaires pour 90% et 95% d'élimination du BC en fonction de l'intensité de courant, par électrodes en Fe et en Al

Comme précédemment observé, l'influence de la densité de courant sur la décoloration n'est pas négligeable.

Nous pouvons constater une amélioration très intéressante dans le cas du colorant Bleu Cibacrone (BC), où les taux d'élimination maxima en moyenne passent de T80% et T90% sous l'effet du sel à T90% et T95% sous l'effet de l'intensité respectivement pour le fer et l'aluminium.

Nous retiendrons pour la suite des expériences, les valeurs de l'intensité de courant suivantes :

*pour le Bleu Hydrone (BH) -électrodes en Fe : 1A.

- électrodes en Al : 1A.

*pour le Bleu Cibacrone (BC) -électrodes en Fe : 2A.

-électrodes en Al : 1A.

VII-1-4- Effet du pH initial :

L'importance de l'influence du pH sur la performance des procédés électrochimiques a été mise en évidence (Daneshvar et *al.*, 2003) .

Pour étudier l'impact du pH initial sur les cinétiques de décoloration dans notre système, nous avons fait varier celui-ci dans une gamme allant de 2 à 11 tout en maintenant les autres facteurs constants. Les résultats sont représentés sur les figures 23 et 24 :

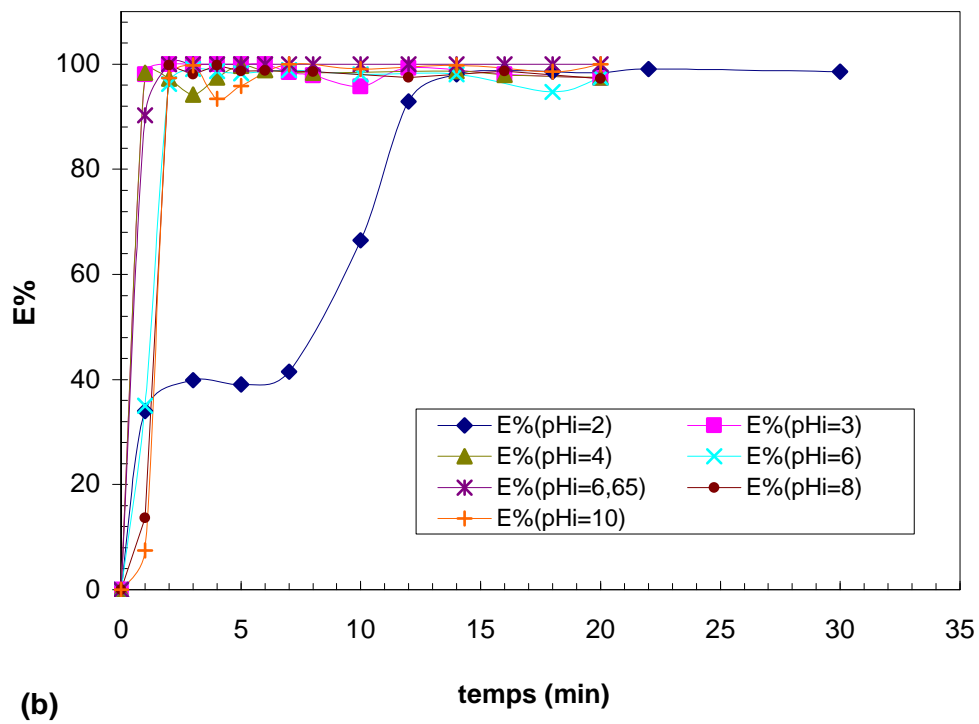
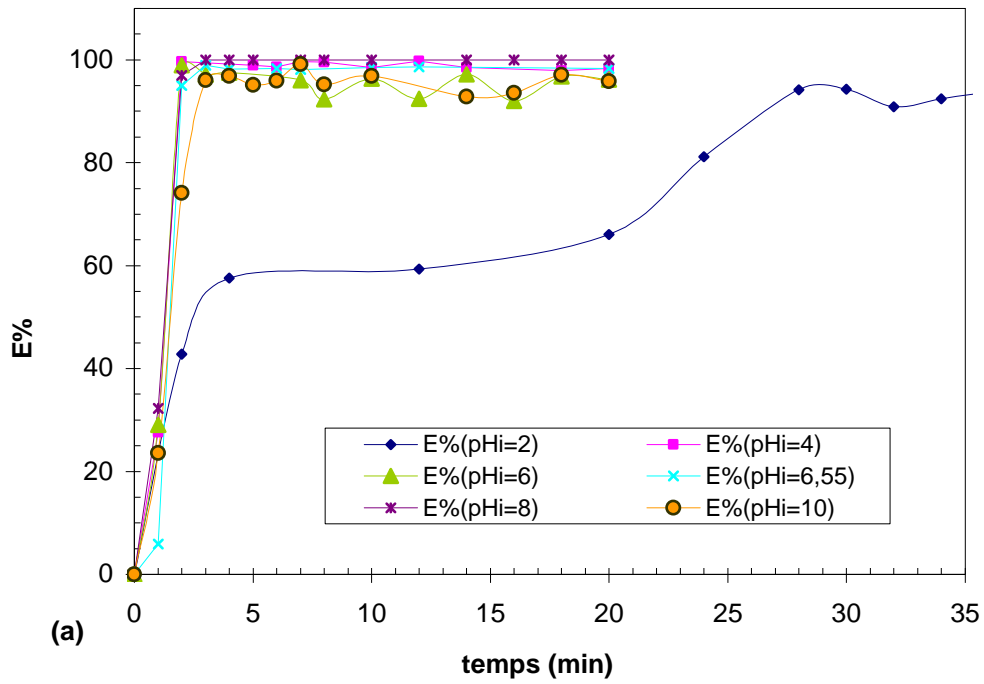


Figure 23 : Influence du pH initial sur l'élimination du BH
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$, $I=1\text{A}$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=2\text{g.L}^{-1}$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1,5\text{g.L}^{-1}$.

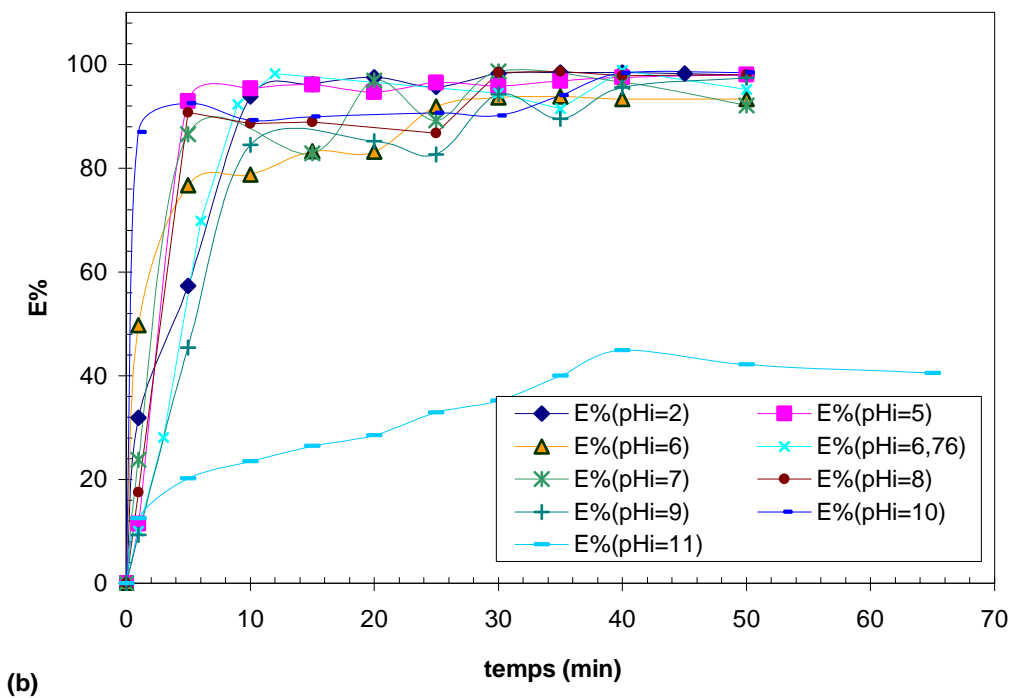
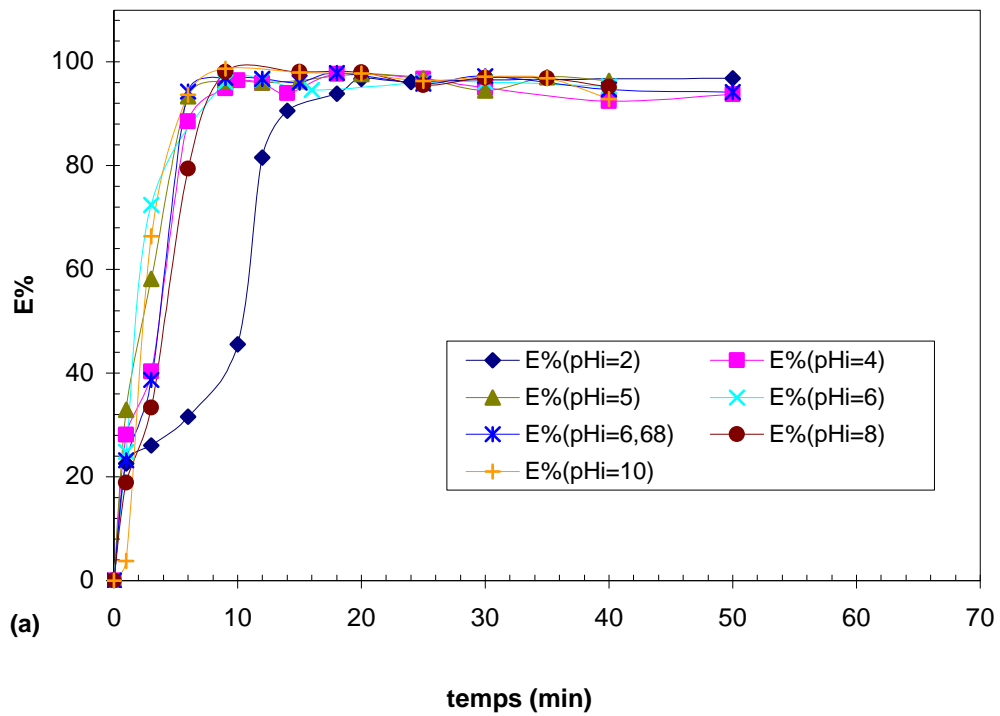


Figure 24 : Influence du pH initial sur l'élimination du BC
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, $N=2$, $d_i=2\text{cm}$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=4\text{g.L}^{-1}$, $I=2\text{A}$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1\text{g.L}^{-1}$, $I=1\text{A}$

Mise à part les pH 2 et 11 où la décoloration se fait plus lentement, les autres pH donnent des cinétiques qui évoluent de manières assez semblables, donc ne mettent pas en évidence avec précision l'effet de ce paramètre. Pour cela nous avons tracé les pourcentages d'élimination des colorants en fonction des pH initialement réglés aux valeurs voulues pour un temps réactionnel de 12 min, comme le montrent les figures 25 et 26 :

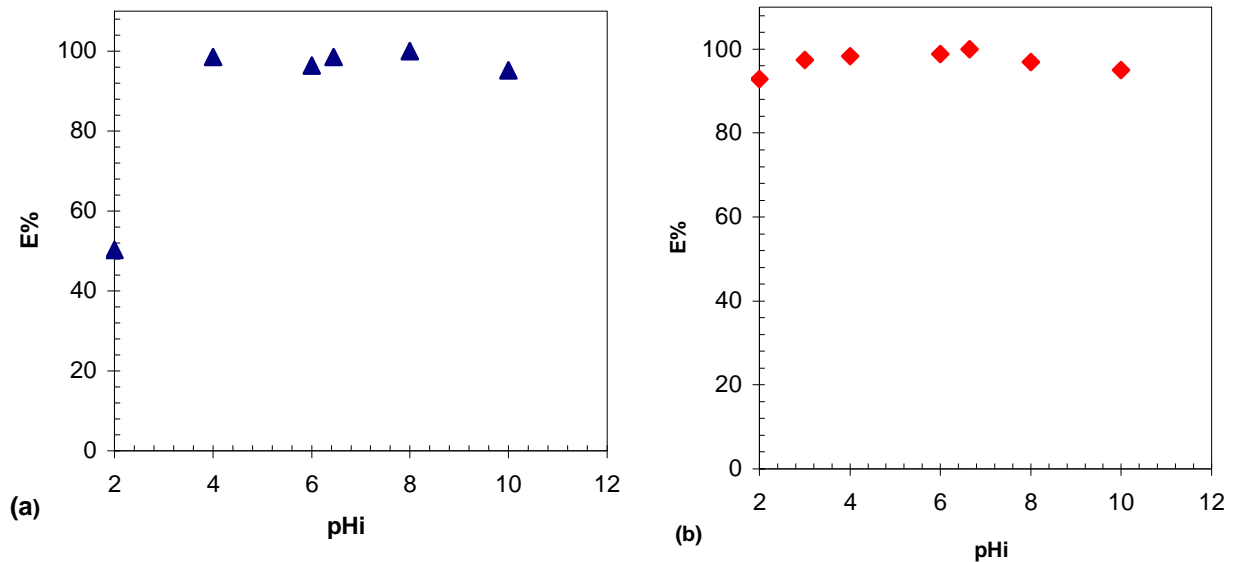


Figure 25 : Pourcentage d'élimination du BH selon le pH initial
 (a) électrodes en Fe, (b) électrodes en Al, temps=12 min

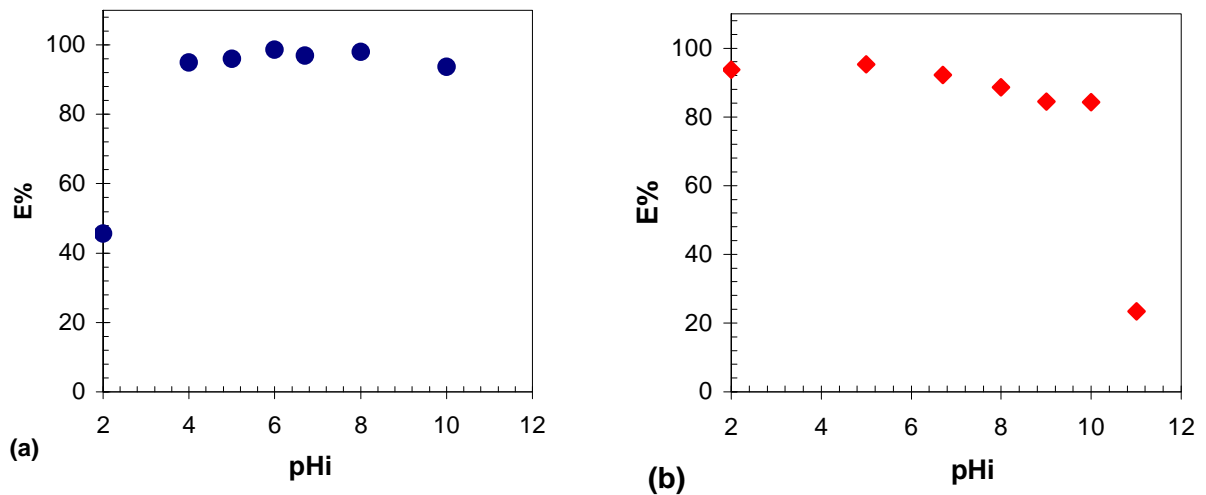


Figure 26 : Pourcentage d'élimination du BC selon le pH initial
 (a) électrodes en Fe, (b) électrodes en Al, temps=12 min

D'après ces graphiques, il semblerait que les taux d'élimination du BH et du BC soient influencés par le pH de la solution selon la nature du matériau utilisé.

*Dans le cas d'électrodes en fer, les taux de décoloration les plus élevés (plus de 95%) sont enregistrés dans la gamme allant de ~ 4 à 8,5, au-delà il y a une diminution. Pour le BH 100% d'élimination est obtenue à pH=8 et pour le BC 98% est enregistrée à pH=6.

Plusieurs auteurs ont enregistré des pourcentages aussi élevés avec les électrodes en fer dans des gammes semblables (entre 5-8 (Daneshvar et *al.*, 2006), entre 6-9 (Daneshvar et *al.*, 2004)). Nous pouvons conclure qu'à ces pH, la majorité des complexes de fer (coagulants) sont formés et ce sont les pH optima pour l'électrocoagulation dans ce cas (Mollah, Pathak et *al.*, 2004).

Aux pH acides, les protons dans la solution sont réduits en H₂ à la cathode et la même proportion des ions hydroxydes ne peut pas être formée ; de même, lorsque le pH est augmenté à partir de 8,4, le taux des ions hydroxydes augmente. Par conséquent, quelques ions hydroxydes sont probablement oxydés à l'anode et cette action aussi empêcherait la production de la même proportion des ions ferriques ; ainsi la décoloration diminue (Daneshvar et *al.*, 2003).

Les figures 27 et 28 illustrent la répartition des différentes espèces qui procèdent des deux états du fer (II) et (III) en fonction du pH :

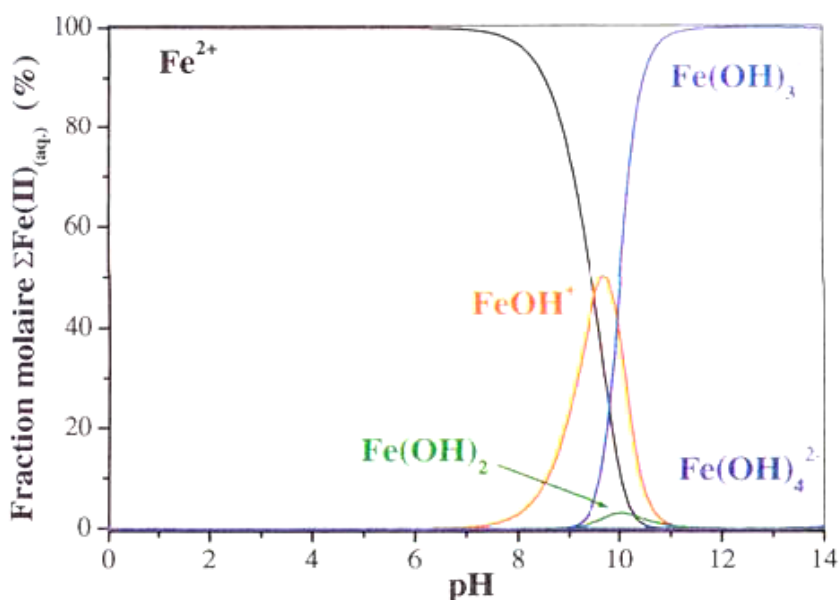


Figure 27 : Répartition molaire du fer II en fonction du pH (Neff, 2003)

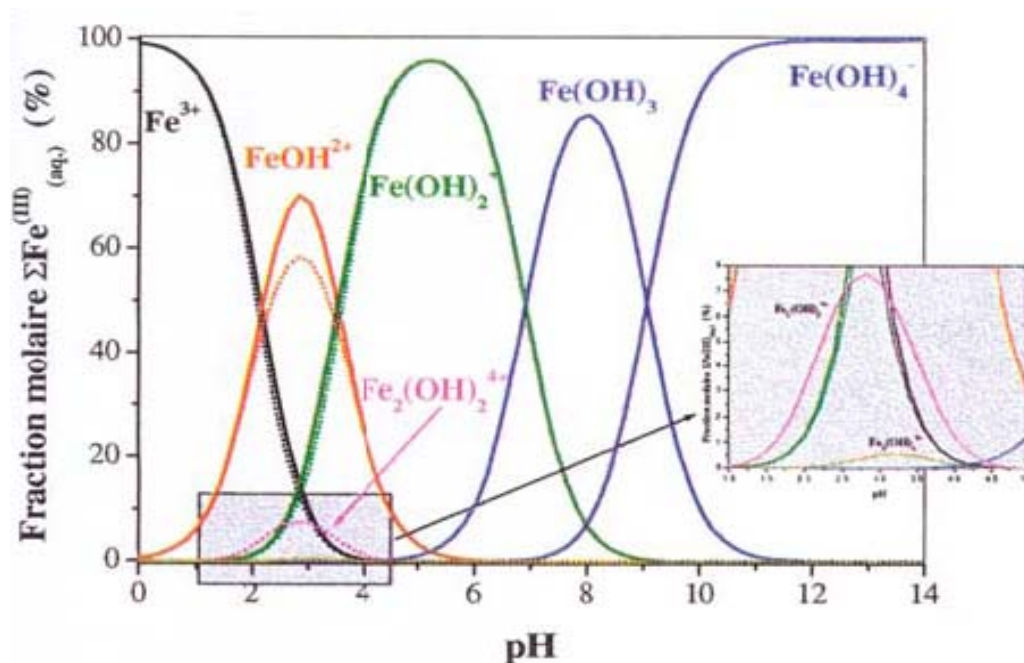


Figure 28 : Répartition molaire du fer III en fonction du pH (Neff, 2003)

Le fer ferreux est sous la forme Fe^{2+} dans les milieux acides et conserve un caractère prédominant jusqu'à une valeur de $\text{pH}=9$. Les complexes FeOH^+ , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^{2-}$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ apparaissent dans les milieux alcalins. Le fer (II) précipite sous forme de $\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}$ dans les milieux alcalins. Le fer ferrique est, quant à lui, sous la forme Fe^{3+} dans les milieux très acides ($0 < \text{pH} < 2$) et devient rapidement minoritaire au profit des complexes hydroxylés.

*Dans le cas d'électrodes en aluminium, les plus hauts niveaux de décoloration sont obtenus à des pH inférieurs à 7 pour les deux colorants en moyenne, avec des taux maxima de 100% à $\text{pH}=6,65$ (de la solution) pour le BH et 95% à $\text{pH}=5$ pour le BC.

L'alcalinisation du milieu est apparemment défavorable dans le cas de traitement par l'aluminium.

Dans les expériences où l'aluminium est utilisé, les ions d'aluminium générés électrochimiquement peuvent former des complexes hydroxo monomériques ou polymériques (déjà décrits) selon le pH du milieu, et ces complexes ont tendance à polymériser entre le pH= 4 et le pH =7 (Gurses et *al.*, 2002).

Un diagramme d'hydrolyse de l'aluminium en fonction du pH a également été proposé ; il est représenté sur la figure 29 :

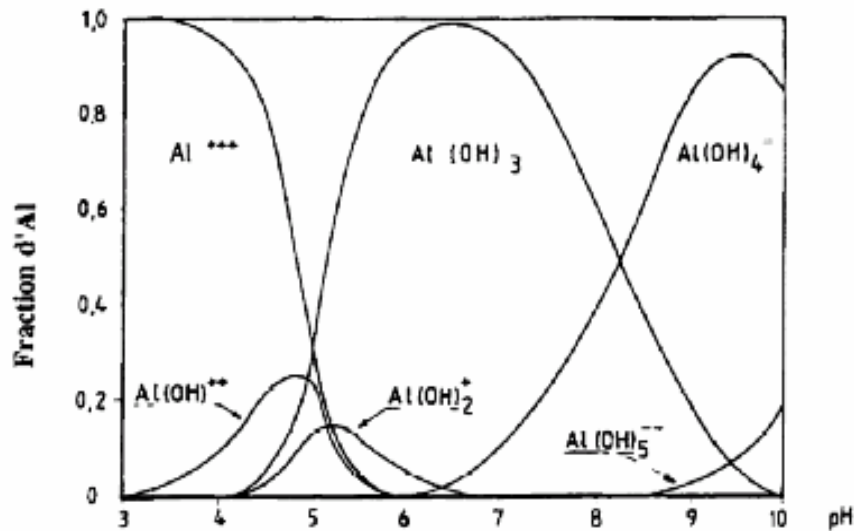


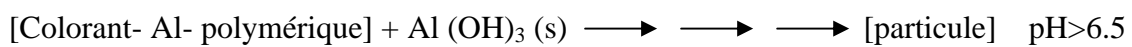
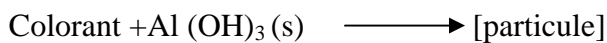
Figure 29 : Hydrolyse de l'aluminium en fonction du pH (Edeline, 1996)

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 (Can et *al.*, 2003).

-Précipitation :



-Adsorption :



- L'évolution du pH dans le milieu réactionnel a été suivie lors de toutes les expériences ; ceci nous a permis de tracer le pH final en fonction du pH initial selon la figure 30 :

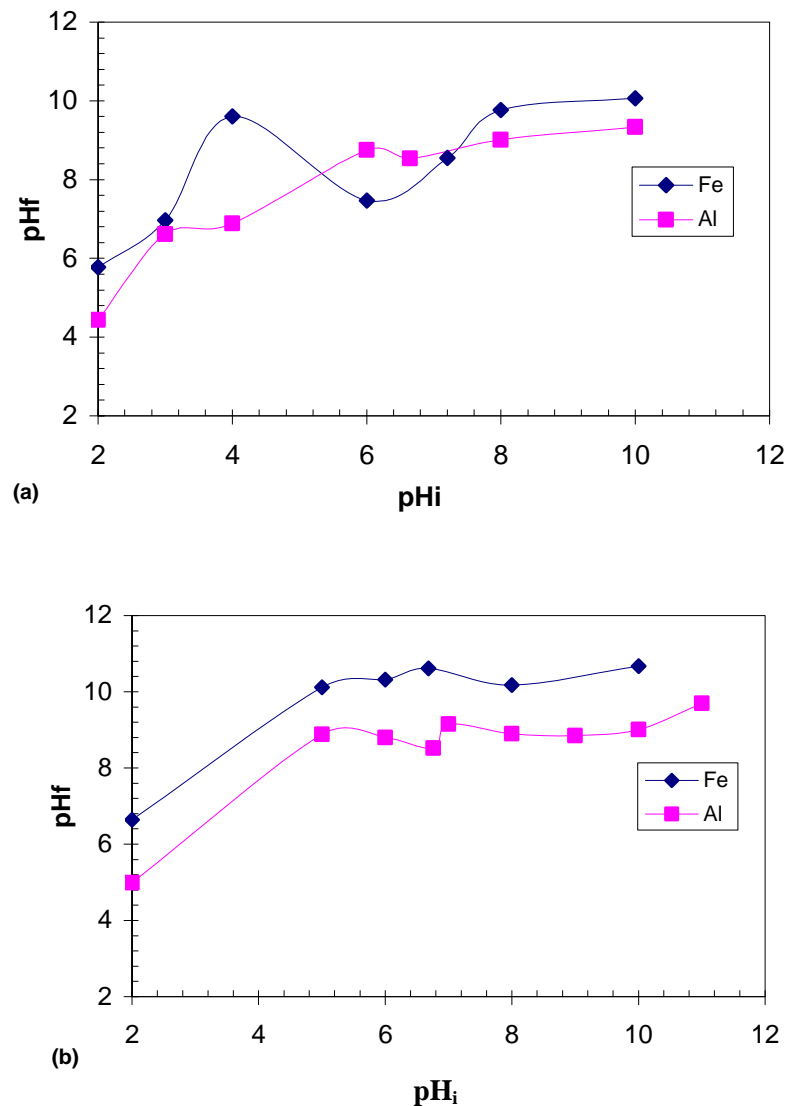


Figure 30 : Evolution du pH_f en fonction du pH_i (a) Bleu Hydrone, (b) Bleu Cibacrone, sur les électrodes en fer et en aluminium.

Nous constatons que, quelque soient les pH_i des solutions à traiter, les pH obtenus à la fin du traitement d'électrocoagulation sont alcalins pour la plupart des cas. Cependant, un léger fléchissement des pH_f lorsque les pH_i étaient alcalins dans certaines manipulations est observé.

Chen (2004) a rapporté que le pH de l'effluent traité par EC augmenterait si l'effluent est acide, et diminuerait si il est alcalin et attribue ce phénomène à plusieurs réactions ayant lieu dans le milieu. Le procédé d'électrocoagulation est dit avoir un pouvoir tampon surtout

dans le milieu alcalin, ce qui pourrait expliquer la relative stabilité du pH final lorsque le pH initial est alcalin.

Les temps permettant un abattement de 95% des deux colorants en fonction du pH_i sont représentés sur les figures 31 et 32 :

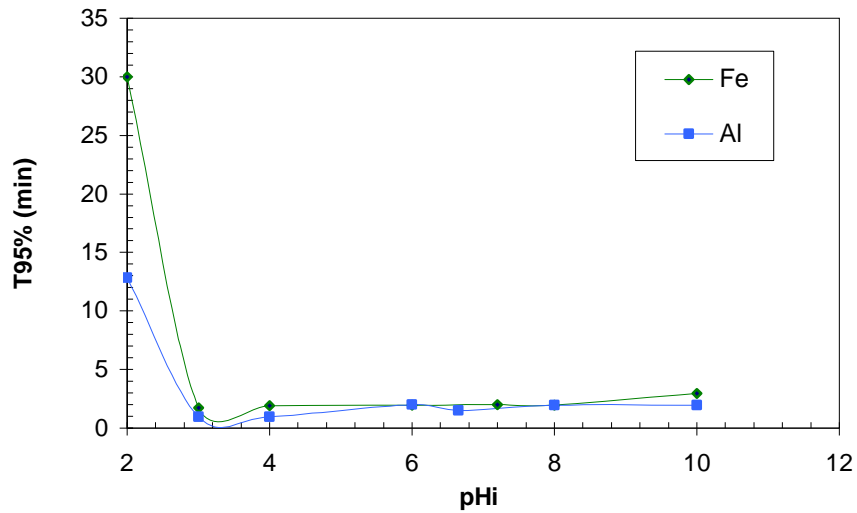


Figure 31 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction du pH_i , par électrodes en Fe et en Al

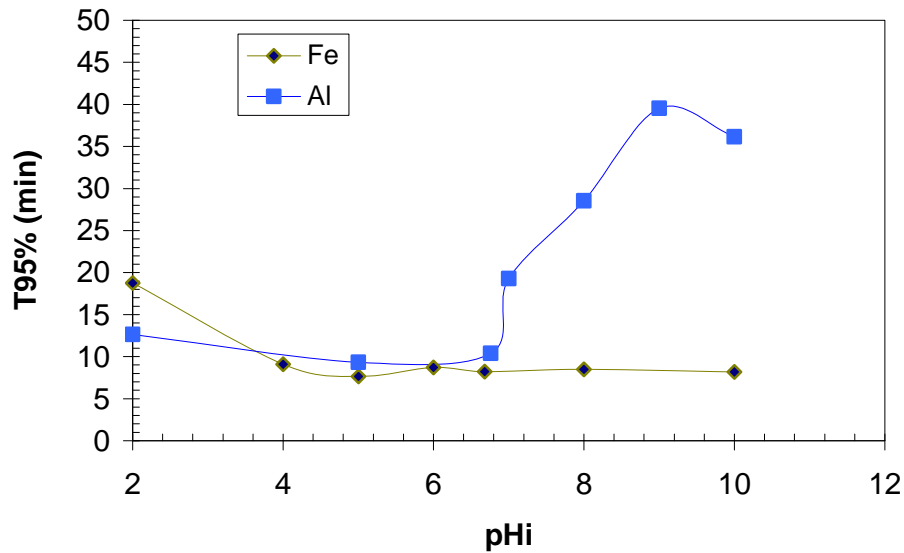


Figure 32 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BC en fonction du pH_i , par électrodes en Fe et en Al

A partir de ces figures, nous ajusterons pour la suite des expériences les pH initiaux des solutions comme suit :

*pour le colorant Bleu Hydrone (BH) :

-électrodes en fer : pH=8.

-électrodes en aluminium : pH de la solution (entre~ 6,3 et 6,7).

*pour le colorant Bleu Cibacrone (BC) :

-électrodes en fer : pH=6.

-électrodes en aluminium : pH=5.

VII-1-5- Effet de la concentration initiale du colorant :

Dans le but d'évaluer le rôle joué par la charge initiale du colorant lors du traitement par l'électrocoagulation EC, nous avons réalisé des expériences en gardant tous les paramètres constants à savoir : la teneur en sel, l'intensité de courant, le pH initial des solutions, la distance séparant les électrodes ainsi que leur nombre, excepté la charge initiale du colorant que nous avons faite varier de 10 à 200 mg.L⁻¹, pour les deux colorants et les deux types d'électrodes utilisées. Cette gamme de charge a été choisie afin de répondre à la question que nous nous sommes posés : est-ce que le système EC répond efficacement aussi bien aux fortes charges qu'aux basses charges ?

Nous rappelons que dans tous les cas, les essais ont été faits en triplicata.

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 33 et 34, où sont portés les taux d'élimination exprimés en pourcentages (E%) en fonction du temps de traitement (en minutes).

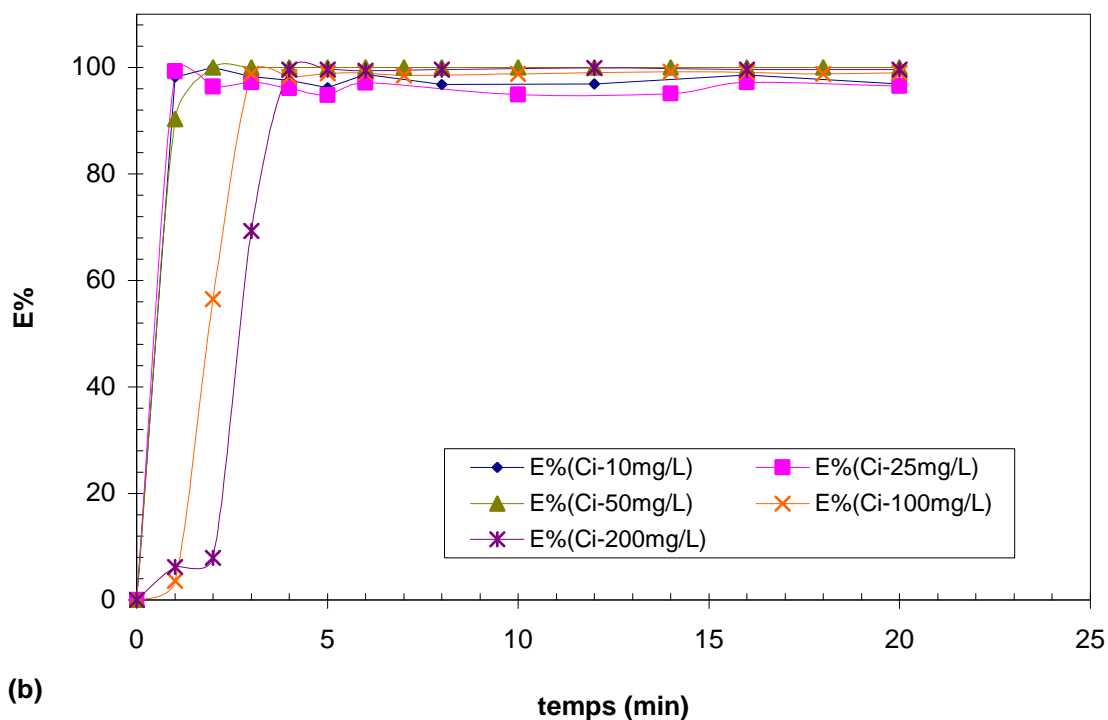
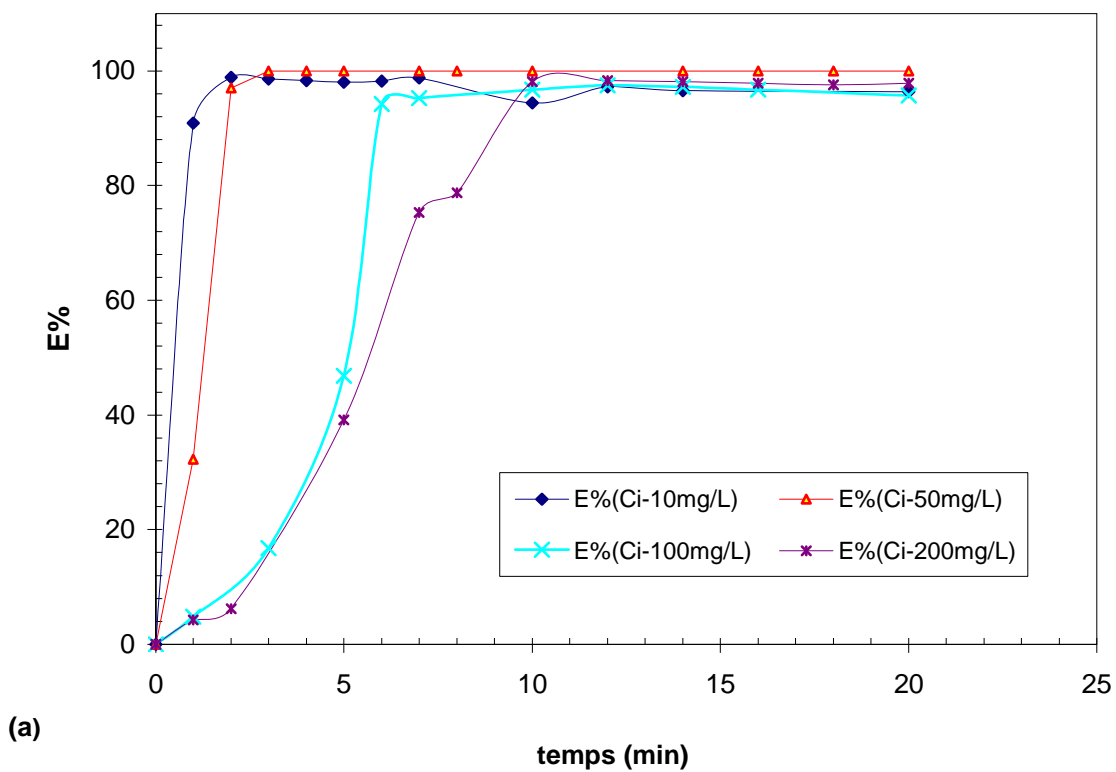


Figure 33 : Influence de la concentration initiale en colorant BH

$I=1A, N=2, di=2cm, (a)$ électrodes en Fe, $NaCl=2g.L^{-1}, pH_i=8,$

(b) électrodes en Al, $NaCl=1,5g.L^{-1}, pH_i$ de la solution.

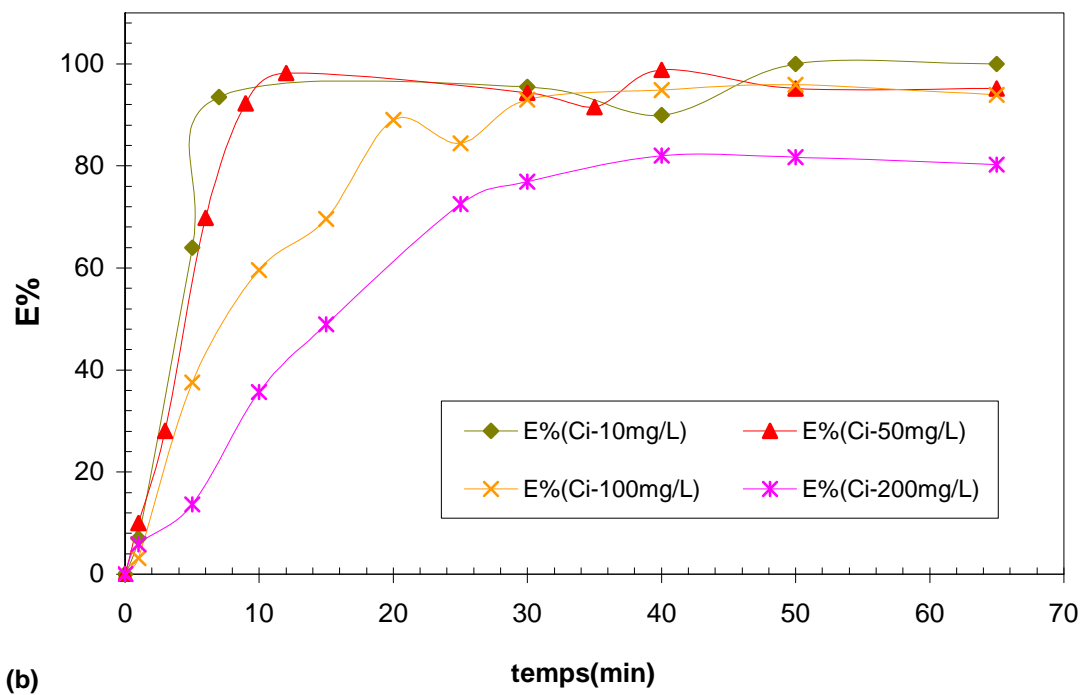
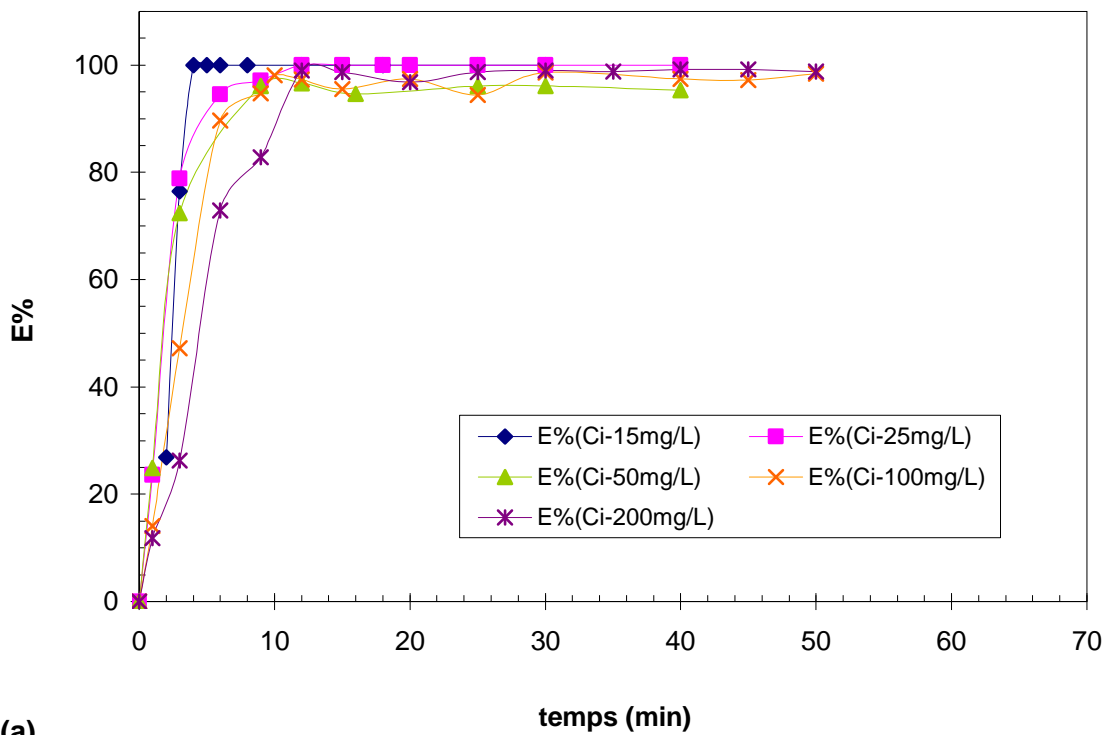


Figure 34 : Influence de la concentration initiale en colorant BC
N=2, di=2cm, (a) électrodes en Fe, NaCl=4g.L⁻¹, I=2A, pH=6,
(b) électrodes en Al, NaCl=1g.L⁻¹, I=1A, pH=5.

Des différences dans la cinétique de décoloration sont perçues à la lecture de ces graphes. Il apparaît que le traitement de solutions de plus en plus colorées nécessite plus de temps réactionnel pour atteindre le taux maximal d'élimination. Ceci peut être dû à la formation insuffisante des complexes d'hydroxydes métalliques pour coaguler l'excès des molécules de colorants à des concentrations élevées (Mollah, Pathak *et al.*, 2004).

Nous observons sur les figures présentées ci-dessus, que quelque soit la charge du colorant utilisée, le traitement d'électrocoagulation s'avère très efficace où des taux d'élimination du colorant dépassant les 95 % pour les fortes charges et même des taux d'élimination atteignant les 100 % d'élimination sont obtenus pour les moyennes et faibles charges.

Il est à apprécier les temps de séjour très courts ; en effet il faut moins de 10 minutes dans le cas des fortes charges pour arriver à des taux maxima d'élimination.

Les temps nécessaires pour atteindre des pourcentages d'élimination de 80% et 95% représentés sur les figures 35 et 36 permettent d'avoir une meilleure lisibilité des résultats et de mettre en évidence le ralentissement causé par les concentrations élevées en colorants.

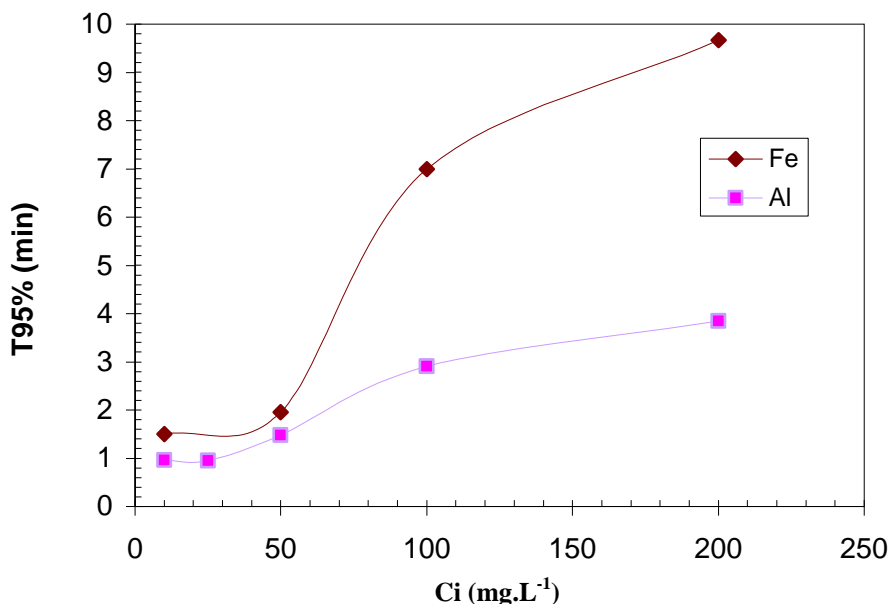


Figure 35: Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de sa concentration initiale, par électrodes en fer et en aluminium.

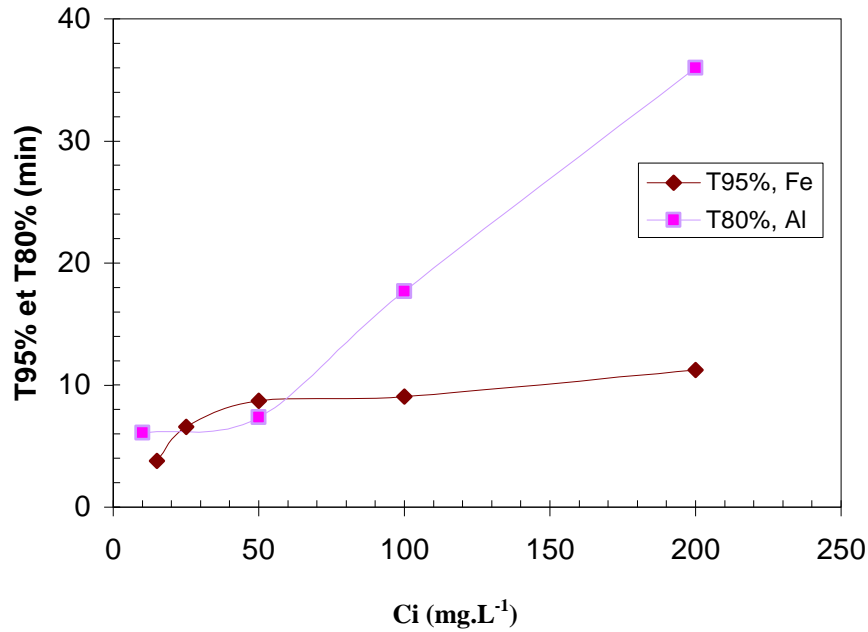


Figure 36 : Evolution des temps nécessaires pour 95% et 80% d'élimination du BC en fonction de sa concentration initiale, par électrodes en fer et en aluminium.

Pour la suite des essais nous maintiendrons donc la concentration moyenne à laquelle nous avons travaillé jusque là c'est-à-dire 50 mg.L⁻¹.

VII-1-6- Effet de la distance inter- électrodes:

L'un des paramètres les plus déterminants intervenant lors du traitement par la technique d'électrocoagulation et même dans tout procédé électrochimique, est la distance inter électrodes. Aussi, c'est un paramètre tout comme l'intensité appliquée, que nous pouvons imposer au système et qui n'est pas imposé par le système.

Ce paramètre est également évalué par la répétition du même essai avec différentes distances entre les électrodes de fer ou d'aluminium tout en fixant les autres facteurs. Les résultats apparaissent sur les figures 37 et 38 :

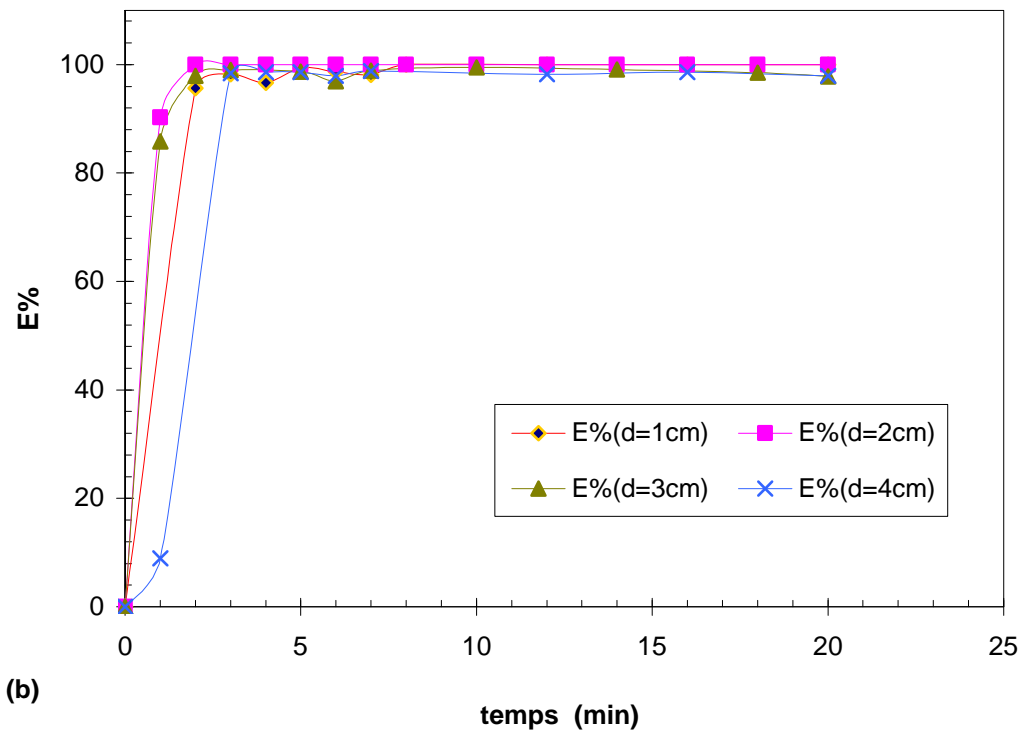
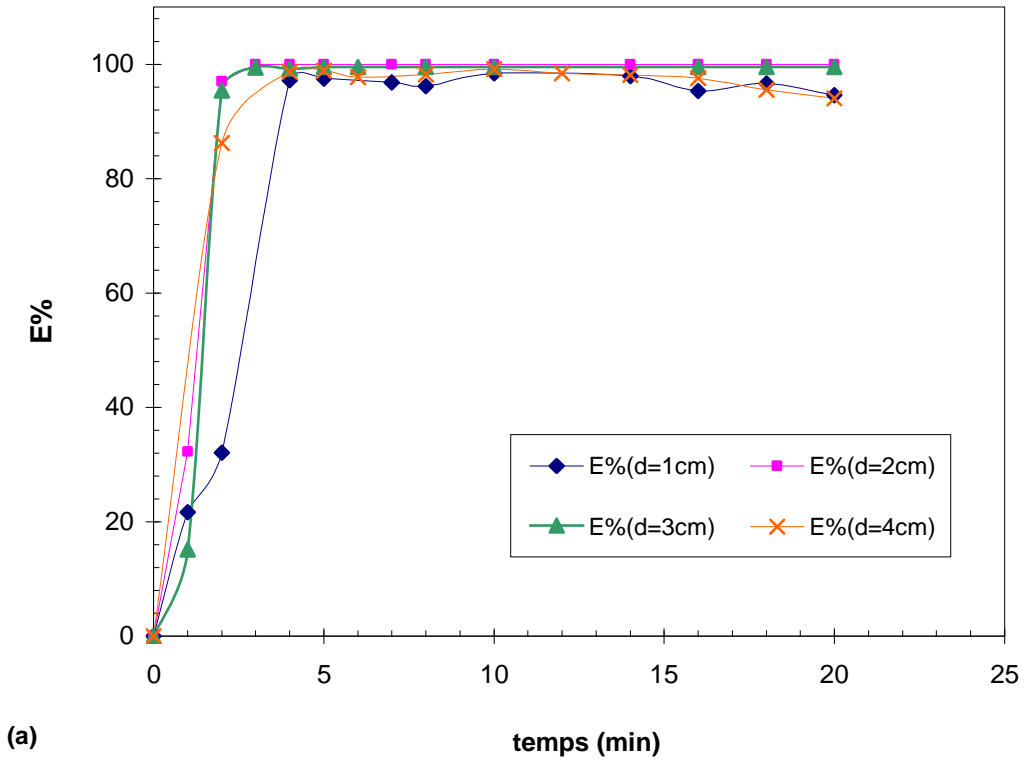
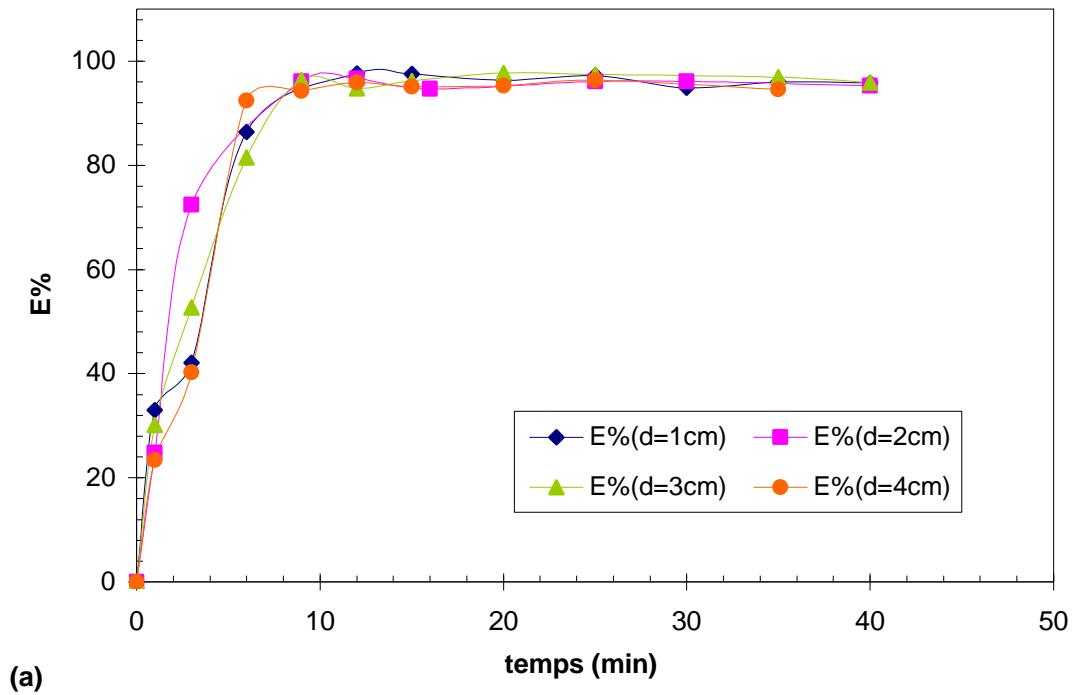
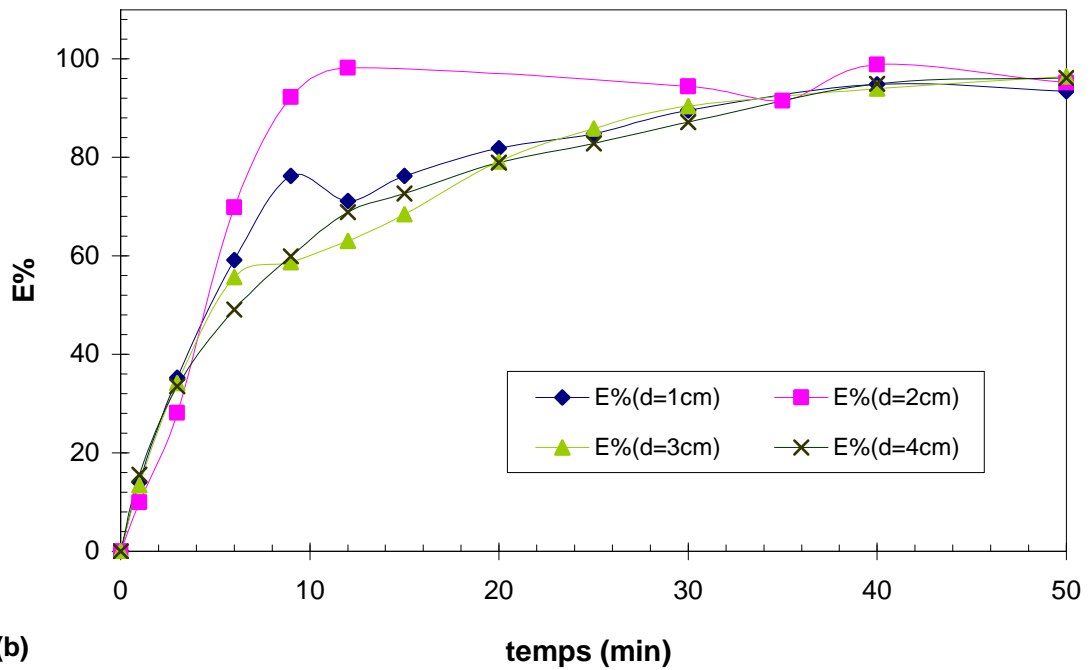


Figure 37 : Influence de la distance inter- électrodes sur l'élimination du BH
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, $N=2$, $I=1\text{A}$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=2\text{g.L}^{-1}$, $\text{pH}_i=8$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1,5\text{g.L}^{-1}$, pH_i de la solution



(a)



(b)

Figure 38 : Influence de la distance inter- électrodes sur l'élimination du BC
 $C_i=50\text{mg.L}^{-1}$, $N=2$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=4\text{g.L}^{-1}$, $I=2\text{A}$, $\text{pH}_i=6$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1\text{g.L}^{-1}$, $I=1\text{A}$, $\text{pH}_i=5$.

A la lecture des courbes sur les figures précédentes, il semblerait que des distances supérieures ou inférieures à la distance inter-électrodes de 2 cm engendreraient des variations négatives dans les cinétiques de décoloration. Il y a ralentissement dans celles-ci mais aussi une diminution du taux maximal d'élimination des colorants, quand la distance est augmentée de 2 à 4 cm. Par exemple, au bout de 3 ou 5 min il y a diminution de 100% à 98% d'élimination du BH pour les deux types d'électrodes.

Nous pouvons noter que c'est plus remarquable dans le cas du BC surtout avec l'aluminium où une réduction de 30% est enregistrée en 10 min de traitement avec la distance de 4 cm séparant l'anode et la cathode ; de plus les taux de 90% d'élimination ne sont atteints que très tardivement dans ce cas.

Daneshvar et *al.*, 2003 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.

Pour les distances inter-électrodes de 1 cm, dans notre cas, les performances de notre système s'en trouvent affectées, mais ce n'est pas un cas général, où plusieurs auteurs (Kim et *al.*, (2002), Can et *al.*, (2003)) ont des performances plutôt accrues.

Le tracé des figures 39 et 40 donnant les temps réactionnels nécessaires pour 80% et 95% d'élimination des colorants en fonction de la distance inter-électrodes, permet une meilleure lecture des résultats obtenus.

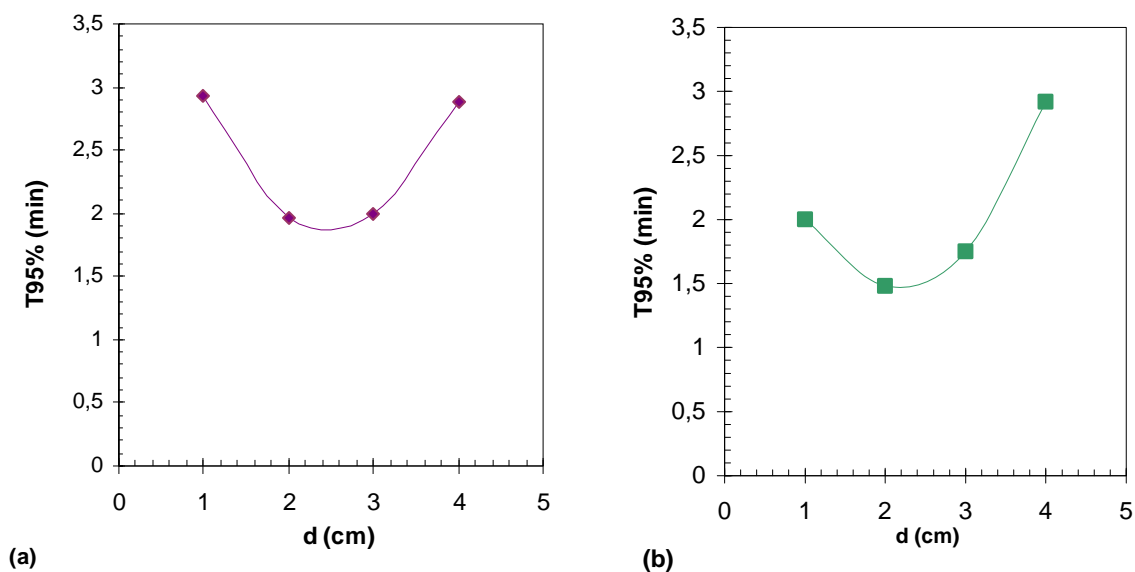


Figure 39: Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction de la distance inter-électrodes en Fe (a) et en Al (b)

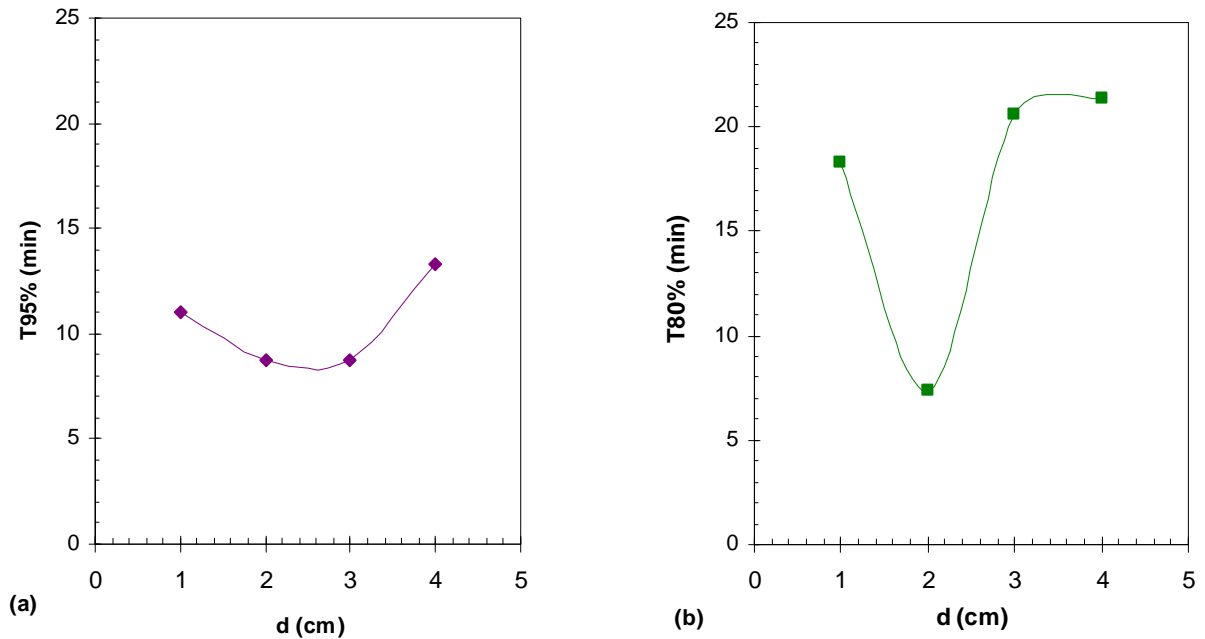


Figure 40 : Evolution des temps nécessaires pour 80% et 95% d'élimination du BC en fonction de la distance inter-électrodes en Fe (a) et en Al (b)

Ces figures montrent bien que la plus faible distance (1cm) séparant l'anode et la cathode que nous avons utilisé, est défavorable pour la décoloration recherchée.

Mameri et *al.*, (1998) expliquent qu'au cours du procédé d'électrocoagulation, lorsque les distances inter-électrodes sont faibles, la densité de courant devient très élevée et pourrait causer un court-circuit.

Il se trouve ainsi que la distance idéale dans notre cas soit de 2 cm entre l'anode et la cathode ; elle sera donc maintenue pour la suite de l'étude.

Cette distance (2 cm) est celle qui est généralement recommandée par plusieurs auteurs (Mameri et *al.*,(1998), Daneshvar et *al.*, (2003), Muruganathan et *al.*, (2004)).

VII-1-7- Effet du nombre d'électrodes, EC bipolaire :

Après l'optimisation des paramètres les plus importants influençant le bon fonctionnement de l'électrocoagulation monopolaire ECM (deux électrodes seulement), nous avons retenu les optima des différentes conditions opératoires précédemment étudiées et nous avons essayé d'améliorer d'avantage l'efficacité du traitement par une augmentation du nombre d'électrodes sacrificielles en connectant celles-ci à la manière bipolaire et ceci dans le but de réduire la consommation du courant électrique.

Pour chaque type de colorant (Bleu Hydronne ou Bleu Cibacrone) et d'électrodes (fer ou aluminium), un même essai est répété en faisant varier le nombre d'électrodes bipolaires de 1 à 5, autrement dit le nombre total d'électrodes de 2 à 7.

Nous rappelons que les électrodes sacrificielles supplémentaires sont placées entre les deux électrodes monopolaires et celles-ci se trouvent être les seules connectées à la source de courant. Nous parlons dans ce cas d'électrocoagulation bipolaire **ECB**.

Après prélèvements, filtrations et analyses des échantillons, nous obtenons les résultats concernant cette expérience ; ils sont représentés sur les figures 41 et 42 :

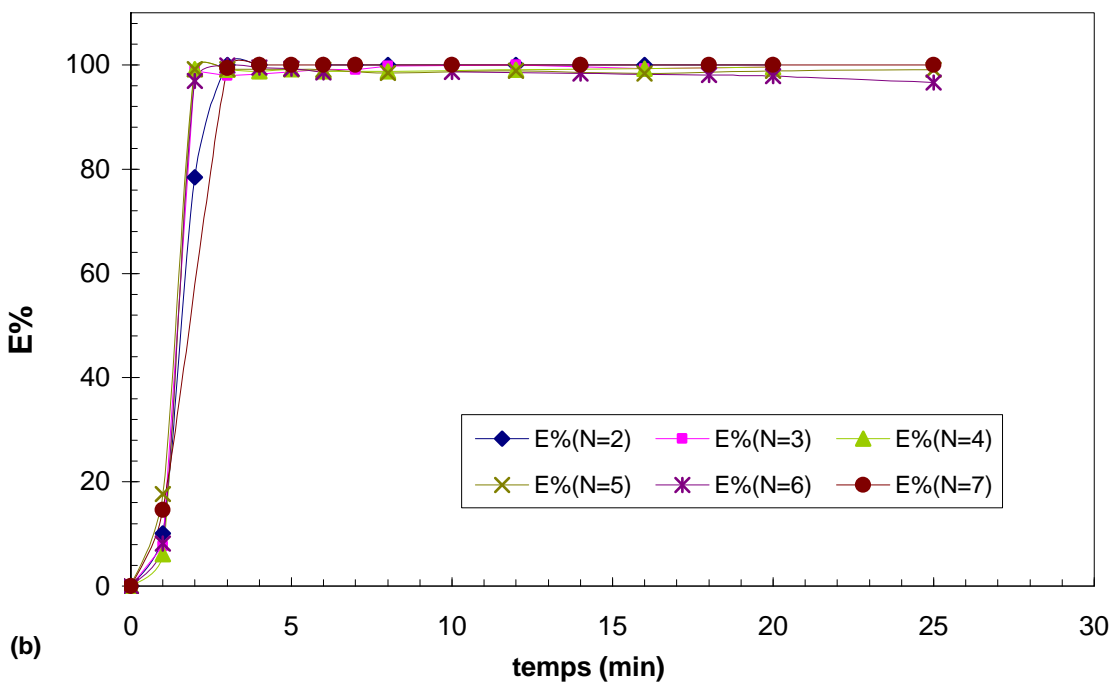
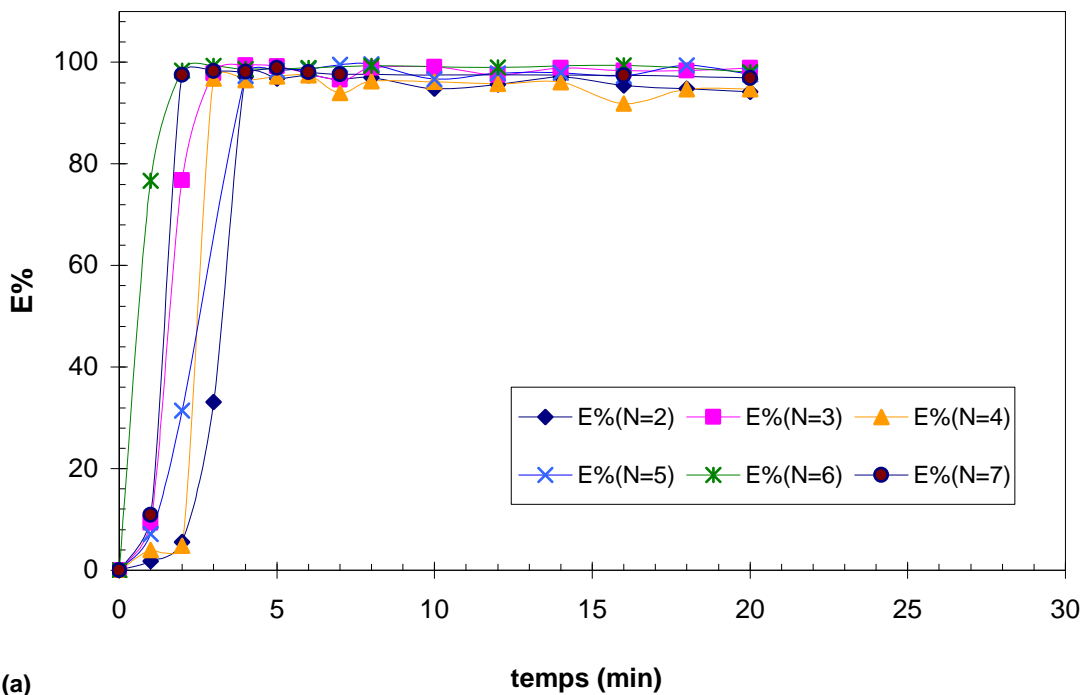


Figure 41 : Influence du nombre d'électrodes sur l'élimination du BH
 $C_i=50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $d_i=2\text{cm}$, (a) électrodes en Fe, $\text{NaCl}=2\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $I=0,5\text{A}$, $\text{pH}_i=8$,
 (b) électrodes en Al, $\text{NaCl}=1,5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $I=0,3\text{A}$, pH_i de la solution

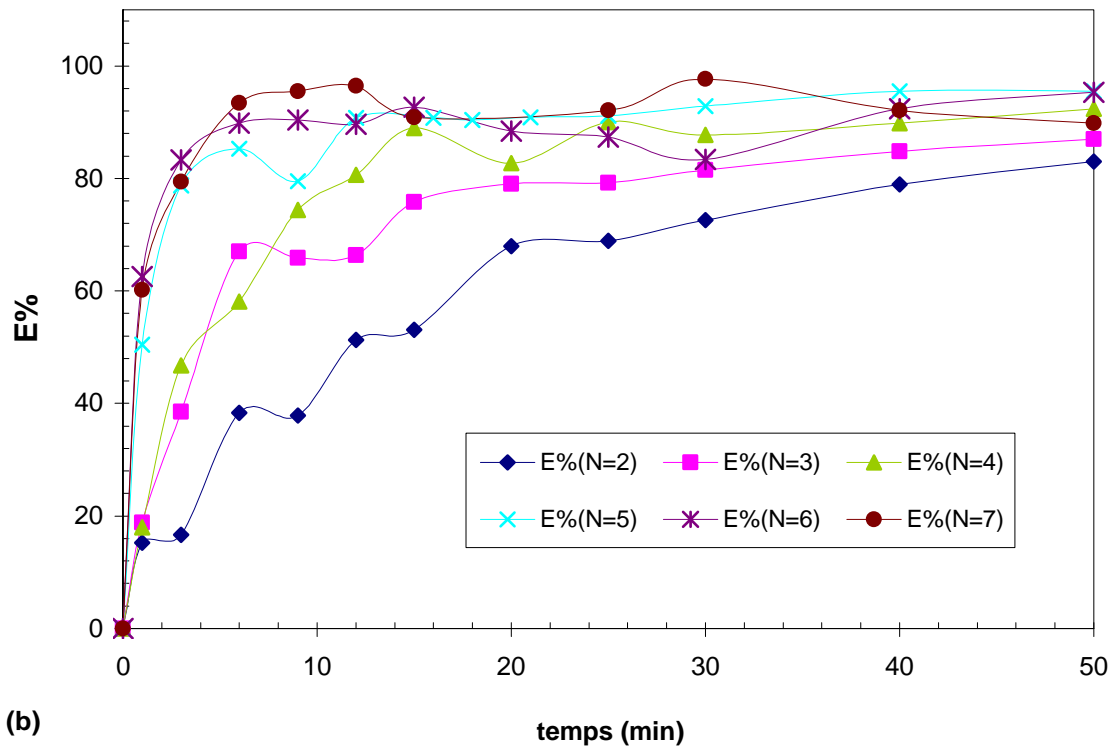
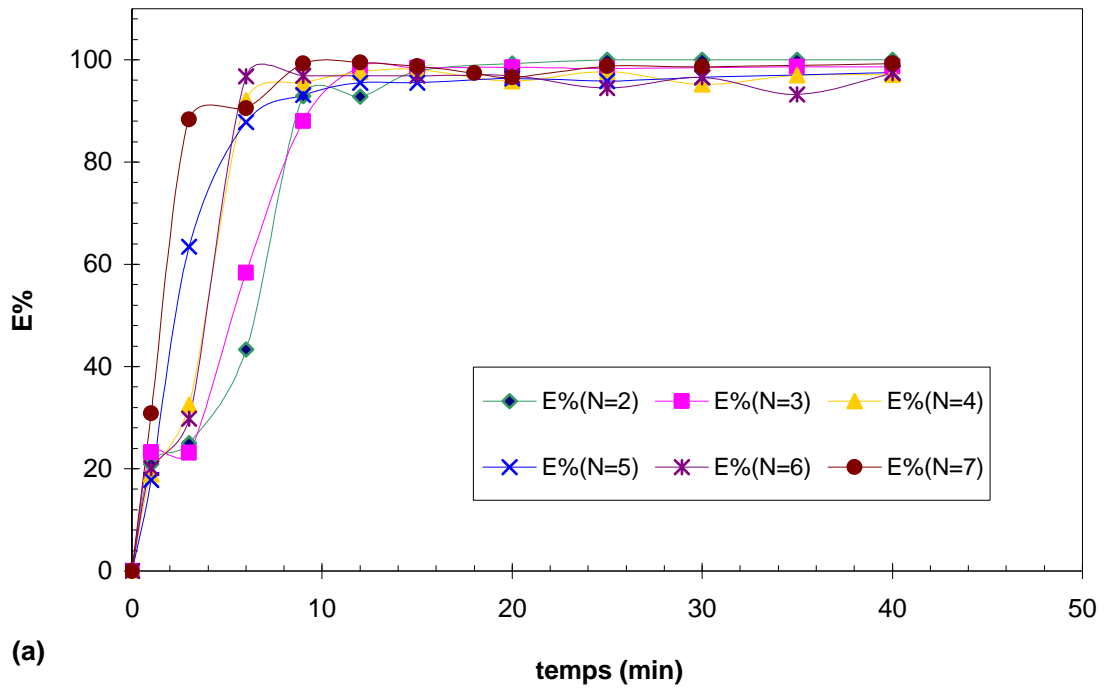


Figure 42 : Influence du nombre d'électrodes sur l'élimination du BC
C_i=50mg.L⁻¹, *d_i*=2cm, (a) électrodes en Fe, NaCl=4g.L⁻¹, I=0,75A, pH_i=6,
 (b) électrodes en Al, NaCl=1g.L⁻¹, I=0,22A, pH_i=5

A la lumière de ces résultats, nous constatons une accélération de la cinétique de décoloration lorsque le nombre d'électrodes sacrificielles est augmenté. Par exemple, pour avoir 80% d'élimination du BC par électrodes en aluminium, nous n'avons eu besoin que de 3 min avec 7 plaques (EC bipolaire) et plus de 40 min avec 2 plaques (EC monopolaire) dans les mêmes conditions opératoires mais surtout avec la même intensité du courant appliqué.

Par utilisation de l' ECB, la surface des électrodes dissoutes est fortement augmentée. Nous pouvons tracer les graphes qui donnent les taux de décoloration et la densité du courant appliqué en fonction de la surface des électrodes, ils sont représentés sur les figures 43 et 44:

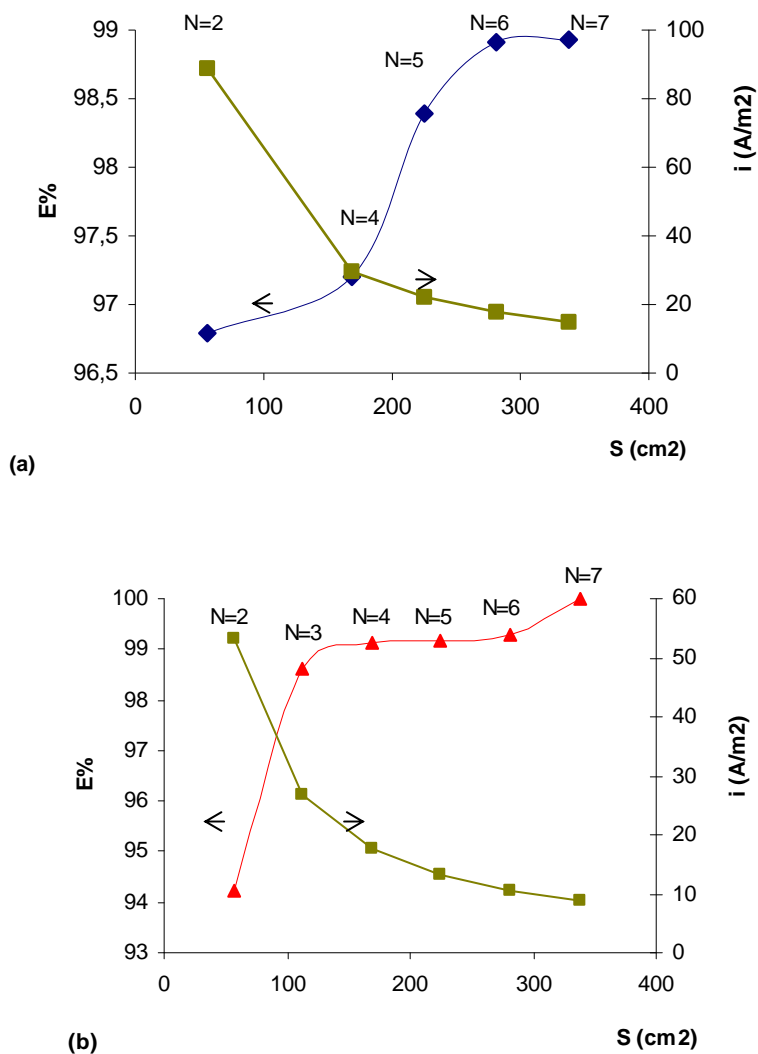


Figure 43 : Pourcentage d'élimination du BH et densité de courant en fonction de la surface des électrodes, temps=5min, (a) Fe, I=0,5A, (b) Al, I=0,3A

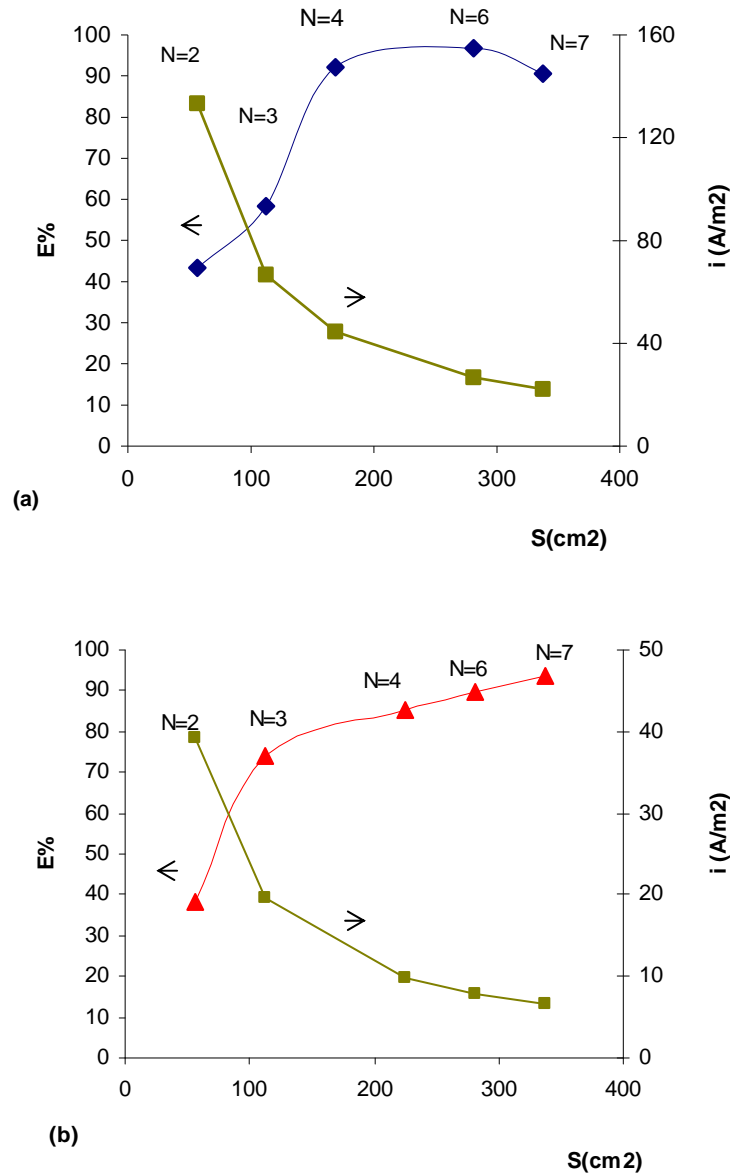


Figure 44 : Pourcentage d'élimination du BC et densité de courant en fonction de la surface des électrodes, temps=6 min, (a) Fe, $I=0,75\text{A}$, (b) Al, $I=0,22\text{A}$

Nous voyons bien que l'augmentation de la surface des électrodes permet une augmentation du taux d'élimination des colorants mais également une baisse dans la densité de courant.

Il y a une relation directe entre le taux de décoloration et la surface totale des électrodes : quand celle-ci augmente la distribution des agents coagulants est plus efficace (Daneshvar et al., 2004).

Nous pouvons faire apparaître la réduction du temps réactionnel nécessaire pour atteindre les pourcentages maxima en moyenne pour toutes les électrodes utilisées par application de l'EC bipolaire, sur les figures 45 et 46 :

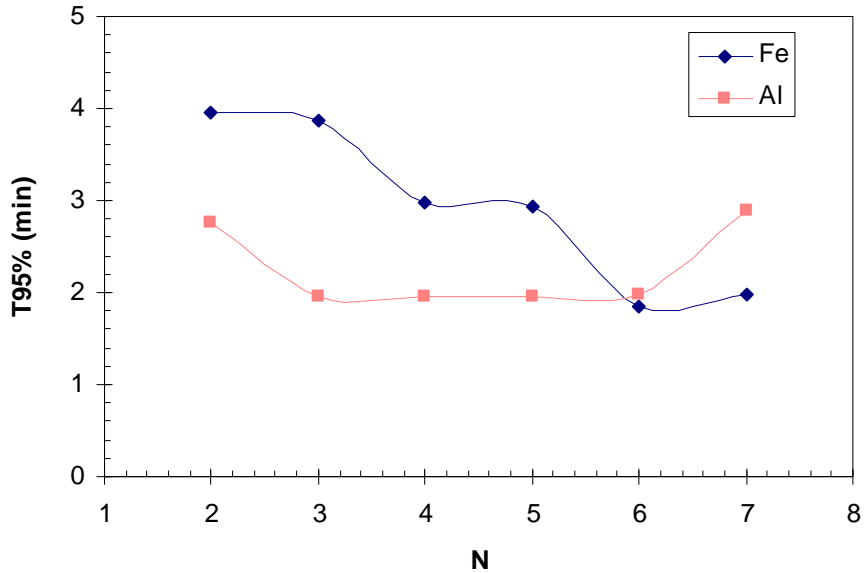


Figure 45 : Evolution du temps nécessaire pour 95% d'élimination du BH en fonction du nombre d'électrodes en Fe et en Al

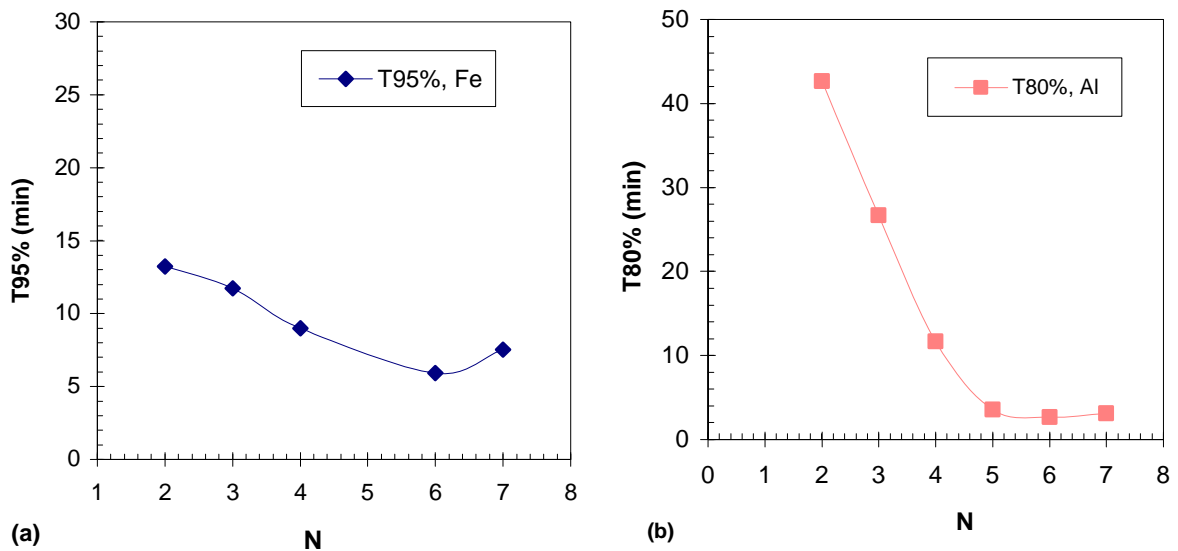


Figure 46 : Evolution des temps nécessaires pour 95% et 80% d'élimination du BC en fonction du nombre d'électrodes en Fe (a) et en Al (b)

Il est pertinent de noter que malgré le net gain dans le temps de réaction nécessaire pour un bon pourcentage d'enlèvement des colorants de la solution par l'addition d'électrodes bipolaires, un apport supplémentaire en celles-ci après un certain nombre serait sans effet améliorant sur l'efficacité du traitement. Par exemple une stabilisation est observée à partir de 3 électrodes d'aluminium dans le cas du BH, mais aussi une ré augmentation dans les T80% et 95% est enregistrée quand le nombre d'électrodes total passe de 6 à 7, et ceci dans le cas des deux colorants. Ceci nous permet de déduire qu'il y a un certain nombre optimum d'électrodes à utiliser.

VII-2- Application de l'électrocoagulation à un rejet réel :

Après les expériences menées sur des solutions synthétiques, nous avons appliqué le procédé d'ECB (Electrocoagulation Bipolaire) à un effluent textile issu de l'unité Fital© sise à Bab Ezzouar à l'Est d'Alger, unité textile spécialisée dans le tissage des couvertures. L'échantillon a été prélevé le 12 Février 2007 à la sortie de l'unité de fabrication soit, juste avant la mise à l'égout. Ce rejet n'a pas été mélangé aux eaux vannes issues de l'unité en question.

Après renseignement auprès des services concernés, la coloration du rejet est dûe essentiellement à l'emploi en ce jour de trois colorants connus par leur solubilité dans l'eau, qui appartiennent à la classe des colorants basiques, il s'agit du Bleu, du Jaune et du Rouge Sandocryl, chacun présent dans l'effluent à un certain pourcentage.

Avant d'entamer les essais, nous avons déterminé les courbes d'étalonnage des trois colorants utilisés (voir Annexe); ceci nous permettra de suivre l'élimination des trois colorants simultanément.

Dans ce cas, nous avons opté pour les conditions opératoires suivantes:

- pH initial =5,2 (du rejet) ou ajusté à 4.
- Nombre d'électrodes =6 (fer ou aluminium) ;
- Distance inter électrodes=2cm ;
- Intensité de courant (0,5A ou 1A) ;
- Conductivité=2,20 mS.cm⁻¹ (du rejet).

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 47 à 49.

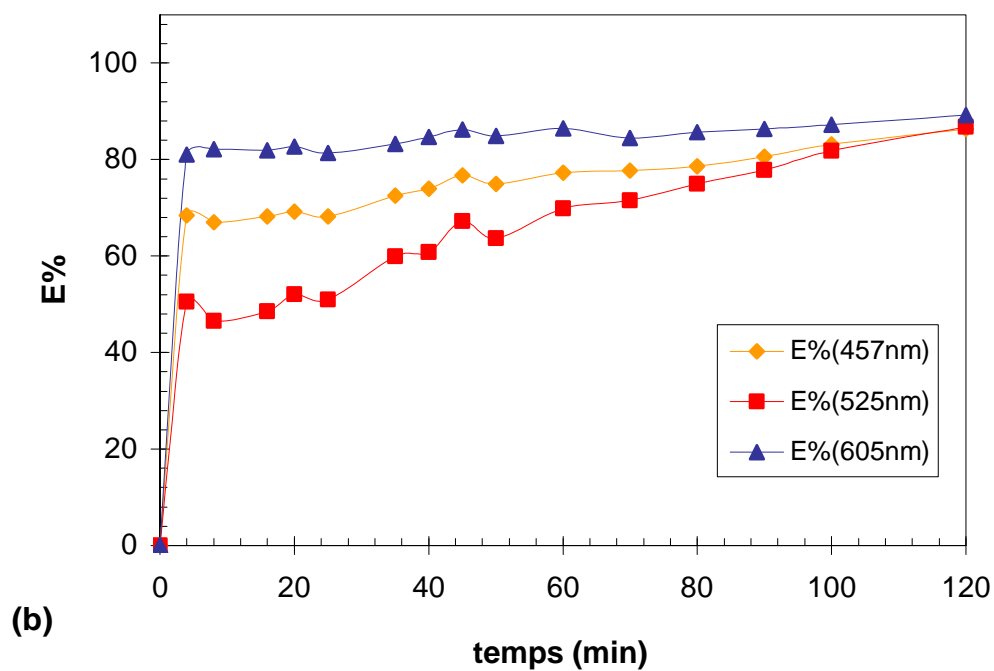
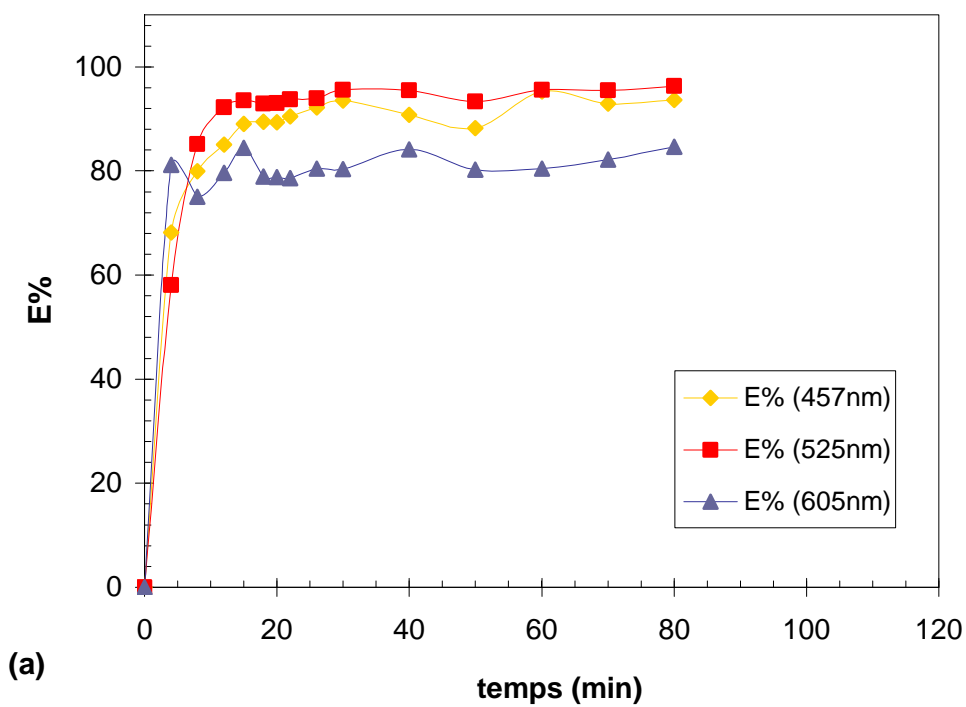


Figure 47 : Evolution du taux d'élimination des colorants du rejet, $I=0,5A$, $pH_i=5.2$, (a) électrodes en Fe, (b) électrodes en Al

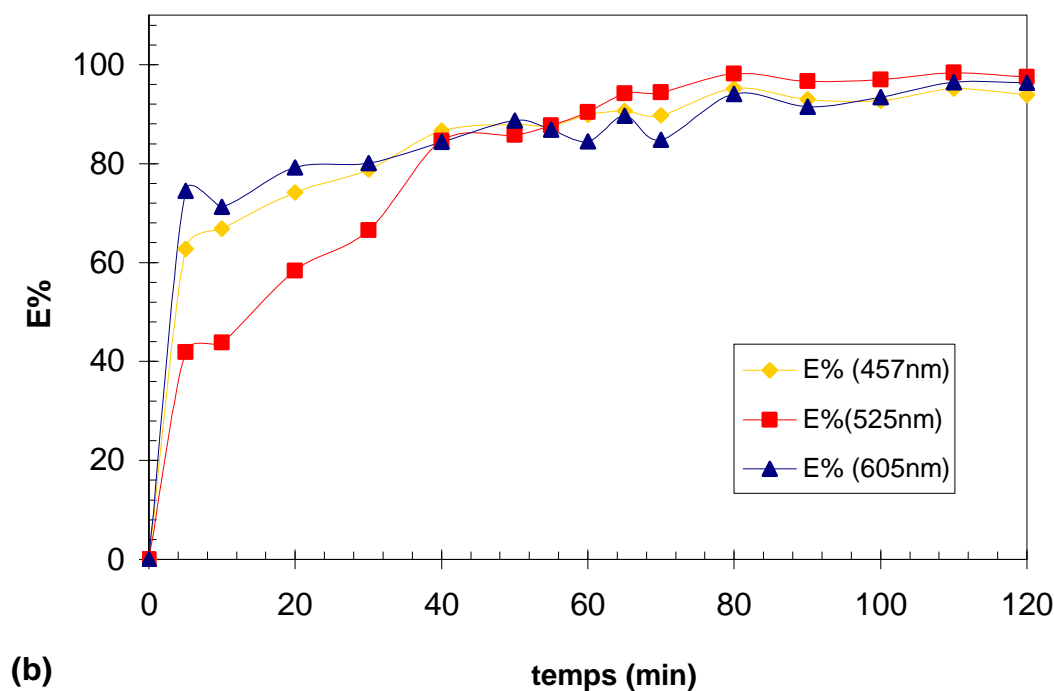
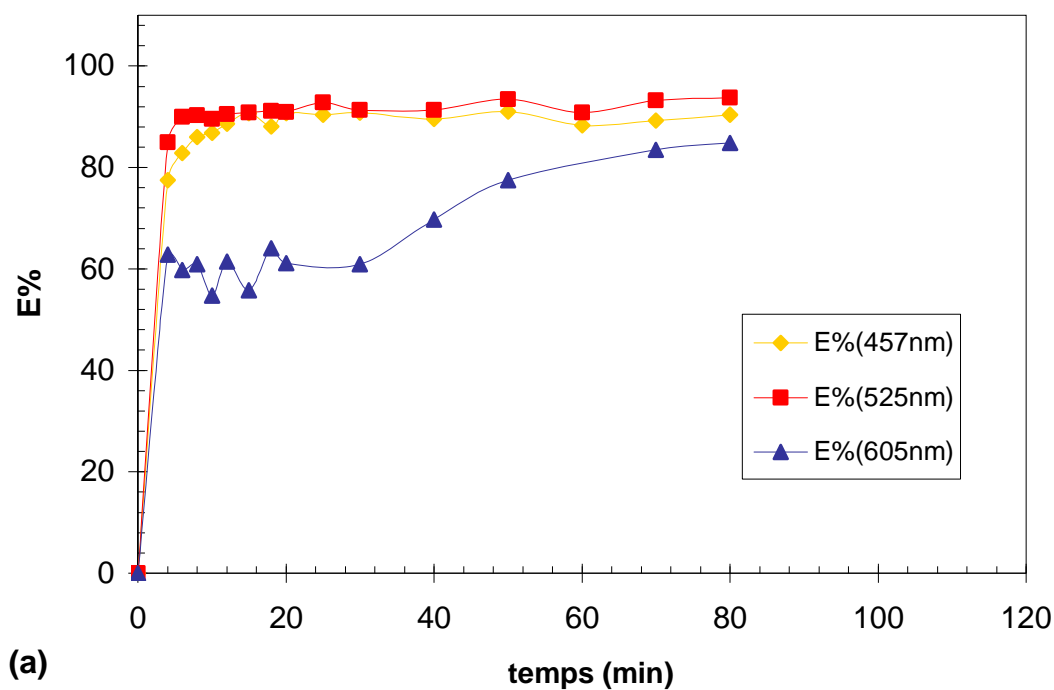


Figure 48 : Evolution du taux d'élimination des colorants du rejet, $I=1A$, $pH_i=5,2$, (a) électrodes en Fe, (b) électrodes en Al

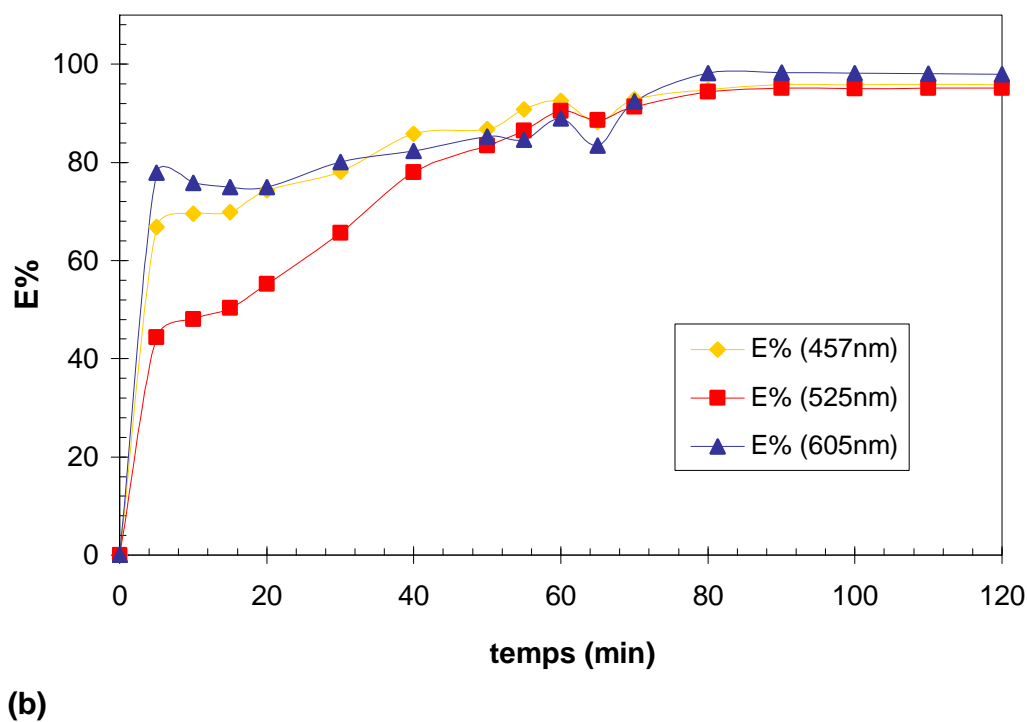
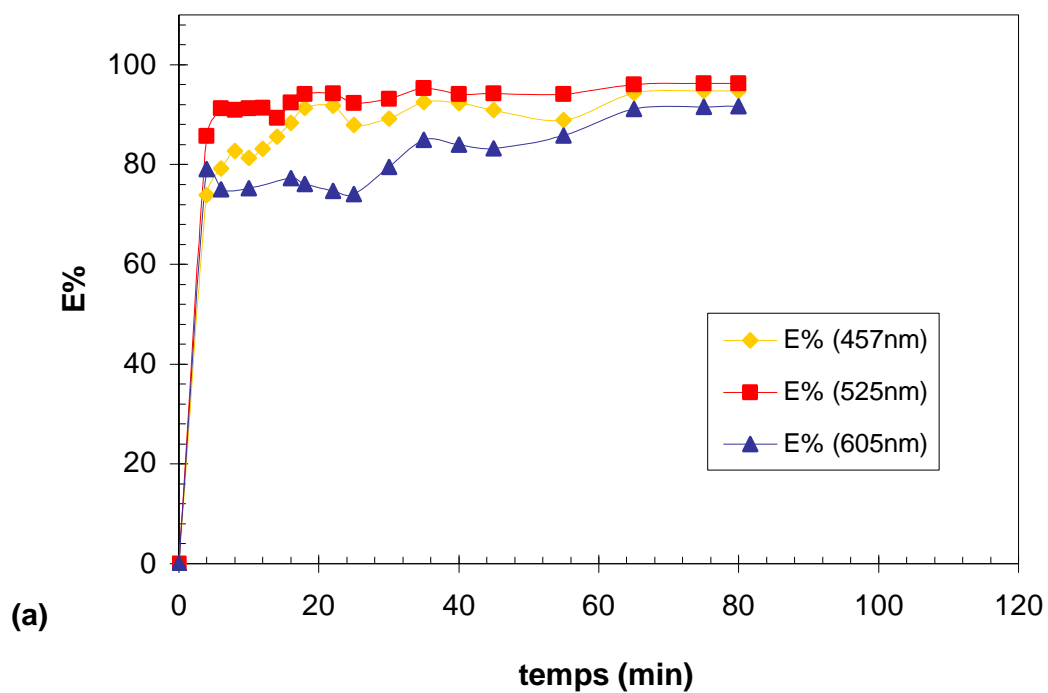


Figure 49 : Evolution du taux d'élimination des colorants du rejet, $I=1A$, $pH_i=4$, (a) électrodes en Fe, (b) électrodes en Al.

A la lecture de ces graphes, nous nous apercevons que notre procédé est bien efficace pour le traitement du rejet en question. En effet, nous observons une augmentation du taux d'élimination des trois colorants en fonction du temps et avec des cinétiques qui suivent la même allure.

Nous rappelons que l'analyse des échantillons prélevés du rejet au cours du traitement par l'électrocoagulation bipolaire se fait à : 457 nm, 525 nm et 605 nm, correspondant aux longueurs d'ondes optimales pour l'absorbance maximale des colorants jaune, rouge et bleu respectivement.

Dès les premières minutes (5min), nous avons enregistré des pourcentages de décoloration significatifs parfois dépassant même les 80%.

La décoloration s'est poursuivie au cours du traitement et son pourcentage maximal est atteint après un certain temps réactionnel selon le colorant et les conditions opératoires.

Après 80 minutes de réaction, nous avons enregistré les taux d'élimination maxima donnés sur les histogrammes et rassemblés sur la figure 50 :

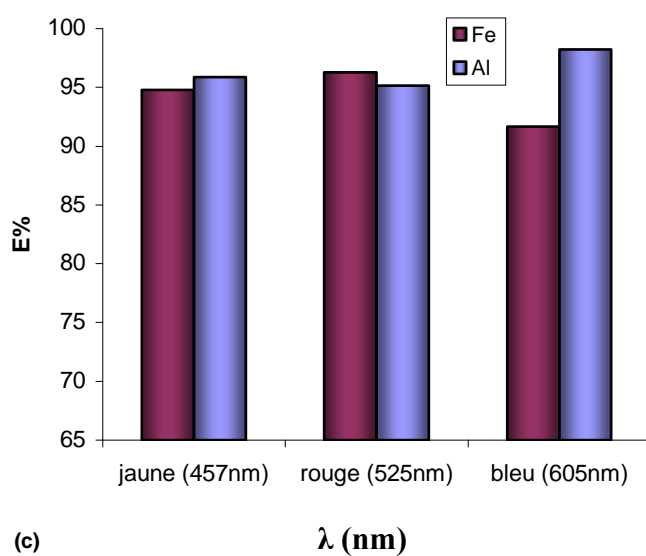
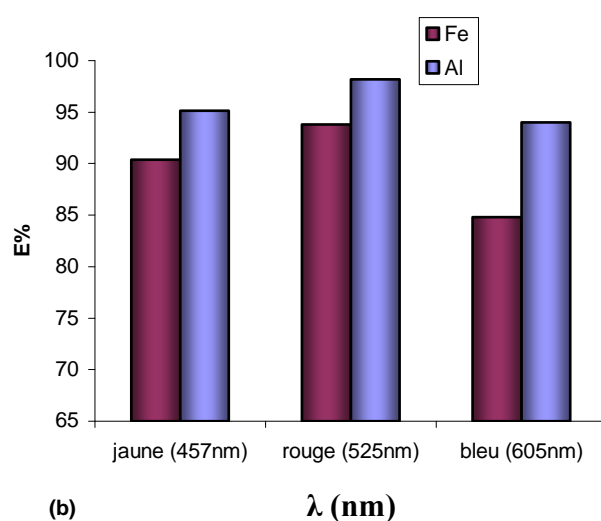
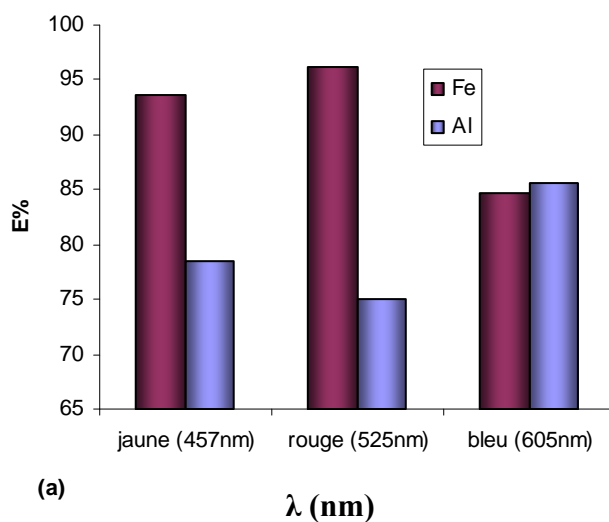


Figure 50 : Taux maxima d'élimination des colorants du rejet, temps=80 min, (a) $pH_i=5,2$, $I=0,5A$, (b) $pH_i=5,2$, $I=1A$, (c) $pH_i=4$, $I=1A$.

D'après ces histogrammes, nous constatons que les taux d'élimination les plus élevés des colorants dans le cas de traitement par électrodes en aluminium sont atteints sous 1A, que ce soit à pH du rejet (5,2) ou à pH ajusté à 4 , ces pourcentages se situent entre 95% et 98%.

Pour les électrodes en fer, à pH du rejet et sous 0,5A de courant, nous avons déjà 95%, 96% et 84% d'élimination du jaune, rouge et bleu respectivement ; ces taux n'ont pas beaucoup varié lorsque le courant a été augmenté ou que le pH était ajusté à 4 sauf peut être pour le bleu où le pourcentage est passé de 84% à 92%.

Les graphes sur les figures 51, 52 et 53 donnant l'évolution du pH de la solution du rejet au cours de son traitement, indiquent une éventuelle augmentation du pH initialement acide pour les deux types d'électrodes jusqu'à neutralisation (cas de l'aluminium) suivie d'une stabilisation sous l'effet tampon du procédé d'électrocoagulation :

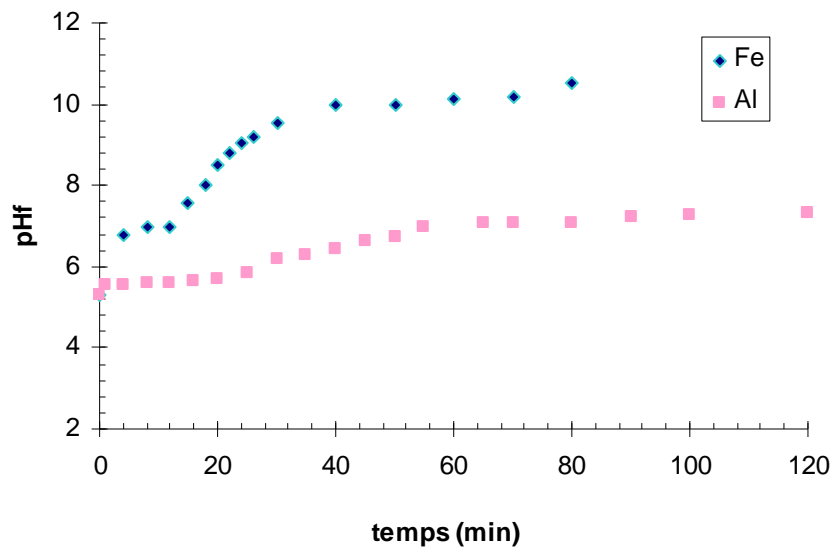


Figure 51 : Evolution du pH du rejet en fonction du temps, $I=0,5A$, $pH_i=5,2$, $N=6$, $d_i=2$ cm, avec traitement par électrodes en fer et en aluminium.

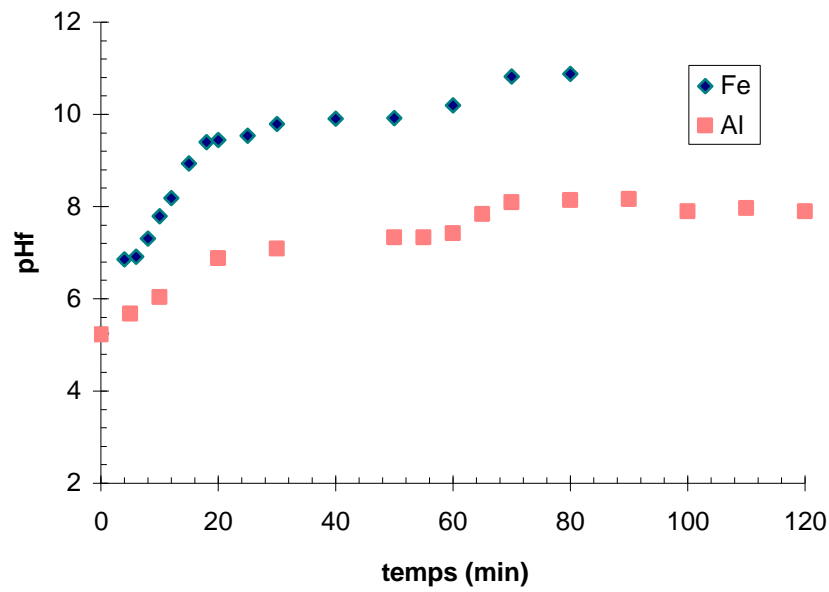


Figure 52 : Evolution du pH du rejet en fonction du temps, $I=1A$, $pH_i=5,2$, $N=6$, $d_i=2\text{ cm}$, avec traitement par électrodes en fer et en aluminium.

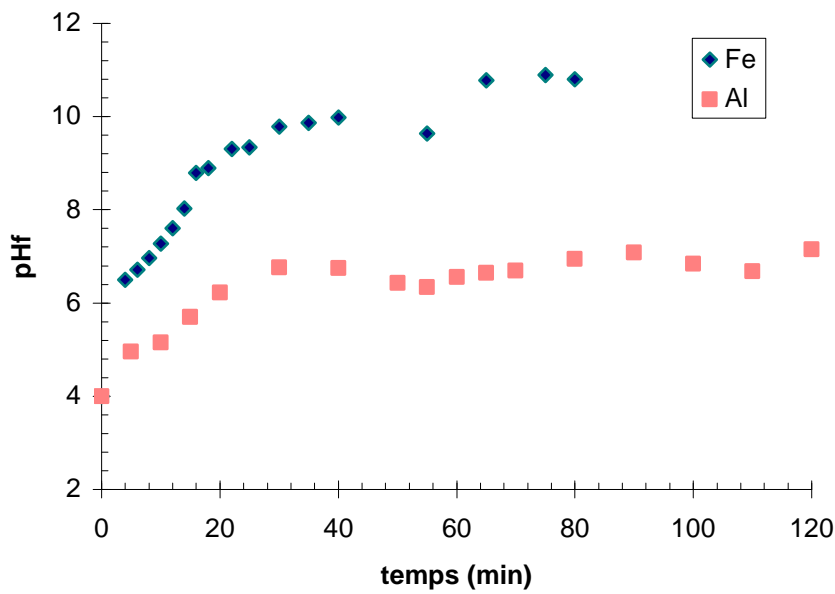


Figure 53 : Evolution du pH du rejet en fonction du temps, $I=1A$, $pH_i=4$, $N=6$, $d_i=2\text{cm}$, avec traitement par électrodes en fer et en aluminium.

L'absorbance du rejet à différents moments du traitement a été analysée, nous donnons les spectres en annexe qui montrent bien que celle-ci diminue au cours du procédé d'électrocoagulation ce qui reflète la disparition des colorants initialement présents dans l'effluent.

CONCLUSION

Dans notre travail, nous avons utilisé l'électrocoagulation (EC) comme système de traitement des eaux polluées par les colorants textiles. Ce système présente l'avantage d'une utilisation très réduite des produits chimiques qui sont souvent compliqués à maintenir, notamment dans certains pays en voie de développement ou non développés.

Dans la première étape de notre étude, nous avons appliqué le procédé d'EC pour le traitement de solutions synthétiques préparées à partir de deux colorants qui sont le Bleu Hydrone (BH) et le Bleu Cibacrone (BC). Ces colorants appartiennent à deux classes différentes de l'index des colorants utilisées en teinture dans les industries textiles.

Au cours de cette première étape, nous avons étudié l'influence de différents paramètres sur le taux de décoloration des solutions par traitement à l'électrocoagulation monopolaire (ECM). Nous avons déduit que des paramètres tels que : la salinité de la solution, la densité du courant appliqué, le pH initial du milieu, la charge initiale en colorants, la distance interélectrodes et leur nature (fer ou aluminium) influençaient l'efficacité du traitement.

Après optimisation de ces paramètres, nous avons amélioré davantage l'efficacité du procédé par augmentation du nombre d'électrodes sacrificielles et leur connexion à la manière bipolaire. L'électrocoagulation bipolaire (ECB) nous a permis d'augmenter la surface dissoute des électrodes sacrificielles pour une meilleure élimination des colorants et de réduire l'intensité du courant appliqué.

Suite à cela, nous avons atteint des taux d'élimination très élevés, à savoir plus de 97% dans le cas du Bleu Cibacrone et 100% donc une élimination totale dans le cas du Bleu Hydrone, ceci en un temps réactionnel très court (moins de 10 min en moyenne).

La différence dans les taux d'élimination obtenus entre les deux colorants est particulièrement due à la différence de leur caractère de solubilité dans le milieu aqueux ; en effet, le BH est peu soluble dans l'eau, donc plus facilement éliminable que le BC qui est très soluble.

Concernant la nature des électrodes utilisées, nous avons déduit que les niveaux les plus élevés de décoloration sont obtenus en milieu acide avec les électrodes en aluminium (pH inférieur à 7) et sur une large gamme de pH allant de 4 à 8,5 avec les électrodes en fer.

L'application de l'électrocoagulation bipolaire en deuxième étape pour le traitement d'un rejet réel a permis l'obtention de résultats très intéressants et prometteurs, notamment pour le traitement du colorant rouge généralement très difficile à éliminer, mais surtout responsable de couleur résiduelle dans les eaux traitées par d'autres procédés. Par exemple, nous avons pu atteindre jusqu'à 98% de son élimination avec les électrodes en aluminium.

L'électrocoagulation bipolaire (ECB) permet de réduire la densité du courant et le temps nécessaires pour une bonne décoloration par rapport à l'électrocoagulation monopolaire (ECM).

Le rejet réel traité est très clair comparé à celui directement déversé dans le milieu naturel qui est de couleur brunâtre. Le traitement du rejet par les électrodes en aluminium nous a permis de neutraliser le pH initialement acide dont la nocivité pour l'environnement aquatique est connue.

Enfin, nous recommandons pour les études à venir sur ce thème d'envisager de faire une étude économique approfondie notamment concernant le coût total de l'opération qui inclura les coûts directs tels que : électricité, matériel nécessaire (électrodes, réactifs chimiques...etc.), réacteur et son dimensionnement...etc., ou indirects tels que la maintenance.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- ***ADHOUM N., MONSER L., BELLAKHAL N., BELGAIED J.E.** Treatment of electropolating wastewater containing Cu ²⁺, Zn ²⁺ and Cr ³⁺ by electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials, 2004, 207-213.
- ***AKBARI A., DESCLAUX S., ROUCH J.C., REMIGY J.C.** Application of nanofiltration hollow fibre membranes to treatment of anionic dye solutions. Journal of Membrane Science, 2007, 243- 252.
- ***ALINSAFI A., DA MOTTA M., LE BONTE S., PONS M.N., BENHAMMOU A.** Effect of variability on the treatment of textile dying wastewater by activated sludge. Dyes and Pigments, 2006, 31- 39.
- ***AZBAR N., YONAR T., KESTIOGLU K.** Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and colour removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. Chemosphere, 2004, 35-43.
- ***BARRERA-DIAZ C., URENA- NUNEZ F., CAMPOS E., PALOMAR- PARDAVE M., ROMERO- ROMO M.** A combined electrochemical- irradiation treatment of highly coloured and polluted industrial wastewater. Radiation Physics and Chemistry, 2003, 657-663.
- ***BAYRAMOGLU M., KOBYA M., CAN O.T., SOZBIR M.** Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. Separation and Purification Technology, 2004, 117-125.
- ***BELL J., BUCKLEY C.** Treatment of a textile dye in the anaerobic baffled reactor. Water SA, 2003, 129-134.
- ***BLANQUEZ P., CASAS N., FONT X., GABARRELL X., SARRA M., CAMINAL G., VICENT T.** Mechanism of textile metal dye biotransformation by *Trametes versicolor*. Water Research, 2004, 2166-2172.
- ***BORCARD D.** Cours sur « L’homme dans la biosphère ». Département des Sciences Biologiques, Université de Montréal, Canada, 2006.
- ***BOUZAIDA J., RAMMAH M.B.** Adsorption of acid dyes on treated cotton in a continuous system. Materials Science and Engineering, 2002, 151- 155.
- ***BROSSARD I.** Technologie des Textiles. Edition Dunod, Paris, 1997.
- ***BRUN J.P.** Procédés de séparation par membranes- Transport, techniques membranaires, Applications. Edition Masson, 1989.
- ***CAN O.T., BAYRAMOGLU M., KOBYA M.** Decolourisation of reactive dye solutions by electrocoagulation using aluminium electrodes. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003, 3391-3396.

- ***CAPAR G., YETIS U., YILMAZ L.** Membrane based strategies for the pre-treatment of acid dye bath wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 423- 430.
- ***CARDOT C.** Les traitements de l'eau. Génie de l'environnement. Edition Marketing S.A. Ellypse Paris, 1999.
- ***CHEN G.** Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 2004, 11-41.
- ***CHEN L.L., SHENG H.L.** Electrocoagulation of chemical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*, 2003, 205-211.
- ***CREPY M.N.** Dermatoses professionnelles aux colorants. DMT, fiche d'allergologie-dermatologie professionnelle, INRS, 4^e trimestre, 2004.
- ***CROSS A., ARRIBET G.** Initiation à la chimie moderne. Edition Eugene Belin, Paris, 1969.
- ***DANESHVAR N., ASHASSI SORKHABI H., KASIRI M.B.** Decolourization of dye solution Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 55-62.
- ***DANESCHVAR N., ASHASSI-SORKHABI H., TIZPAR A.** Decolourization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*, 2003, 153-162.
- ***DANESHVAR N., KHATAEE A.R., DJAFARZADEH N.** The use of artificial neural networks (ANN) for modelling of decolourization of textile dye solution containing C.I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 1788-1795.
- ***DEGREMONT.** Memento Technique de l'eau. Huitième Edition, Degrémont, France, 1978.
- ***DES JARDINS R.** Le traitement des eaux. Edition école polytechnique de Montréal, Canada, 1988.
- ***DINCER A.R., GUNES Y., KARAKAYA N.** Coal- based bottom ash (CBBA) waste material as adsorbent for removal of textile dyestuffs from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 529- 535.
- ***DOS SANTOS A.B.** Reductive decolourization of dyes by thermophilic anaerobic granular sludge. Thèse de Doctorat, Wageningen University , Pays-Bas, Fevrier 2005.
- ***DUPONT G.** La Teinture. Editions de l'industrie textile, Paris, 2002.
- ***ECKENFELDER W.W.** Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Edition Lavoisier, 1982.
- ***EDELINE F.** L'épuration physico- chimique des eaux. Editions Cebedoc, Liège, 1996.
- ***FLANDRIN-BLETTY M.** Technologie et Chimie des Textiles. Edition Cépaduès, 1976.
- ***GAUJOUS D.** La pollution des milieux aquatiques: aide- mémoire . Edition Lavoisier, 1993.

- ***GERCEL O., OZCAN A., SAFA OZCAN A., FERDI GERCEL H.** Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of *Euphorbia rigida* by H₂SO₄, activation and its adsorption behaviour in aqueous solutions. *Applied Surface Sciences*, 2007, 4843-4852.
- ***GOLDER A.K., HRIDAYA N., SAMANTA A.N., RAY S.** Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 134-140.
- ***GOMELLA C., GUERREE H.** Le traitement des eaux publiques, Industrielles et Privées. Edition Eyrolles, 1978.
- ***GURSES A., YALCIN M., DOGAR C.** Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables. *Waste Management*, 2002, 491-499.
- ***HAO O.J., KIM H., CHIANG P.C.** Decolourization of wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2000, 449-505.
- ***HEDAYATULLAH M.** Les colorants synthétiques. 1^e Edition, PUF (Presse Universitaire de France), 4^e trimestre, 1976.
- ***HOLT P.K., BARTON G.W., MITCHELL C.A.** The future of electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 2005, 355-367.
- ***HSING H.J., CHIANG P.C., CHANG E.E., CHEN M.Y.** The decolourization and mineralization of acid orange 6 azo dye in aqueous solution by advanced oxidation processes: a comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 8-16.
- ***HUANG Y.H., TSAI S.T., HUANG Y.F., CHEN C.Y.** Degradation of commercial azo dye reactive black 13 in photo/ferrioxalate system. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 382- 388.
- ***IRDEMEZ S., DEMIRCIOGLU N., YILDIZ Y.S.** The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 1231-1235.
- ***JUMPATONG K., PHUTDHAWONG W., BUDDHASUKH D.** Dechlorophyllation by Electrocoagulation. *Molecules*, 2006, 156-162.
- ***KHOUI S., FEKI F., SAYADI S.** Detoxification of olive mill wastewater by electrocoagulation and sedimentation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 58-67.
- ***KIM T.H., PARK C., SHIN E.B, KIM S.** Decolourization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 2002, 165- 175.
- ***KLEMOLA K., HONKALAMPI-HAMALAINEN U., LIESIVUORI J., PEARSON J., LINDSTROM-SEPPA P.** Evaluating the toxicity of reactive dyes and fabrics with the spermatozoa motility inhibition test. *AUTEX Research Journal*, 2006, 182-190.

- ***KOBYA M., CAN O.T., BAYRAMOGLU M.** Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 163-178.
- ***KOBYA M., DEMIRBAS E., CAN O.T., BAYRAMOGLU M.** Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 183-188.
- ***KOBYA M., HIZ H., SENTURK E., AYDINER C., DEMIRBAS E.** Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 2006, 201-211.
- ***KOLLER E.** *Traitement des pollutions industrielles*. Edition Dunod, Paris, 2004.
- ***KRANTZ D. KIFFERSTEIN B.** *Water Pollution and Society*, 2005, valable sur le site Internet: www.umich.edu.
- ***KULKARNI S.V., BLACKWELL C.D., BLACKARD A.L., STACKHOUSE C.W., ALEXANDER M.W.** *Textile dyes and dyeing equipment: classification, properties and environmental aspects*. United States Environmental Protection Agency, Research and Development, 1985.
- ***LENNTECH.** *La pollution de l'eau*, 2004, valable sur le site Internet: www.lenntech.com/fran.
- ***LIN S.H., PENG C.F.** Treatment of textile wastewater by electrochemical method. *Water Research*, 1994, 277-282.
- ***LONGHINOTTI E., POZZA F., FURLAN L., SANCHEZ M.M., KLUG M., LARANJEIRA M.C.M., FAVERE V.T.** Adsorption of anionic dyes on the biopolymer chitin. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 1998, 435-440.
- ***LOWE A.** *Guide des solutions d'assainissement*. Programme d'Assainissement du Littoral de l'Atlantique (PALA), Saint- John, Canada, 1995.
- ***LSIK M., SPONZA D.T.** Effect of oxygen on decolorization of azo dyes by *Escherichia coli* and *Pseudomonas* sp. and fate of aromatic amines. *Process Biochemistry*, 2003, 1183- 1192.
- ***MAMERI N., YEDDOU A.R., LOUNICI H., BELHOCINE D., GRIB H., BARIOU B.** Defluoridation of septentrional Sahara water of north Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes. *Water research*, 1998, 1604-1612.
- ***MATHUR N., BHATNAGAR P., BAKRE P.** Assessing mutagenicity of textile dyes from Pali (Rajasthan) using ames bioassay. *Applied Ecology and environmental Research*, 2005, 111-118.
- ***MOLLAH M.Y.A., MORKOVSKY P., GOMES J.A.G., KESMEZ M., PARGA J., COCKE D.L.** Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 199-210.

- *MOLLAH MY.A., PATHAK S.R., PATIL P.K., VAYUVEGULA M., AGRAWAL T.S., GOMES J.A., KESMEZ M., COCKE D.L.** Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 165-171.
- *MOLLAH M.Y.A., SCHENNACH R., PARGA J.R., COCKE D.L.** Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 29-41.
- *MULTINATIONAL INVESTMENT GUARANTEE AGENCY (MIGA).** Environmental Guidelines for Textiles Industry. Pollution Prevention and Abatement, 1996, 505-509.
- *MURUGANANTHAN M., BHASKAR R., PRABHAKAR S.** Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation. *Separation and Purification Technology*, 2004, 69- 75.
- *NEFF D.** Apport des analogues archéologiques à l'estimation des vitesses moyennes et à l'étude des mécanismes de corrosion à très long terme des aciers non alliés dans les sols. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2003.
- *NGÔ C., REGENT A.** Déchets et pollution (impact sur l'environnement et la santé). Edition Dunod, 2004.
- *NOZET H.** Textiles chimiques - Fibres modernes. Edition Eyrollès , Paris, 1976.
- *OLIVEIRA L.C.A., RIOS R.V., FABRICS J.D., SAPAG K., GARG V., LAGO R.M.** Clay-iron oxide magnetic composite for the adsorption of contaminants in water. *Applied Clay Sciences*, 2002, 1-9.
- *OLIVEIRA L.C.A., GONCALVES M., OLIVEIRA D.Q.L., GUERREIRO M.C., GUILHERME L.R.G., DALLAGO R.M.** Solid waste from leather industry as adsorbent of organic dyes in aqueous- medium. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 344- 347.
- *ONG S.T., LEE C.K., ZAINAL Z.** Removal of basic and reactive dyes using ethylenediamine modified rice hull. *Bioresource Technology*, 2007, 2792- 2799.
- *OZACAR M., SENGIL I.A.** A kinetic study of metal complex dye sorption onto pine sawdust. *Process Biochemistry*, 2005, 565- 572.
- *PAJOT H.F., DEFIGUEROA L.I.C., FARINA J.I.** Dye decolorizing in isolated yeast from the ecoregion of Las Yungas (Tucuman- Argentina). *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, 1503- 1511.
- *PERRIN R., SCHARFF J.P.** Chimie Industrielle. Tome 2.Edition Masson, Paris, 1995.
- *PESSON P.** La pollution des eaux continentales- incidences sur les biocénoses aquatiques. 2eme Edition, Bordas, Paris, 1980.

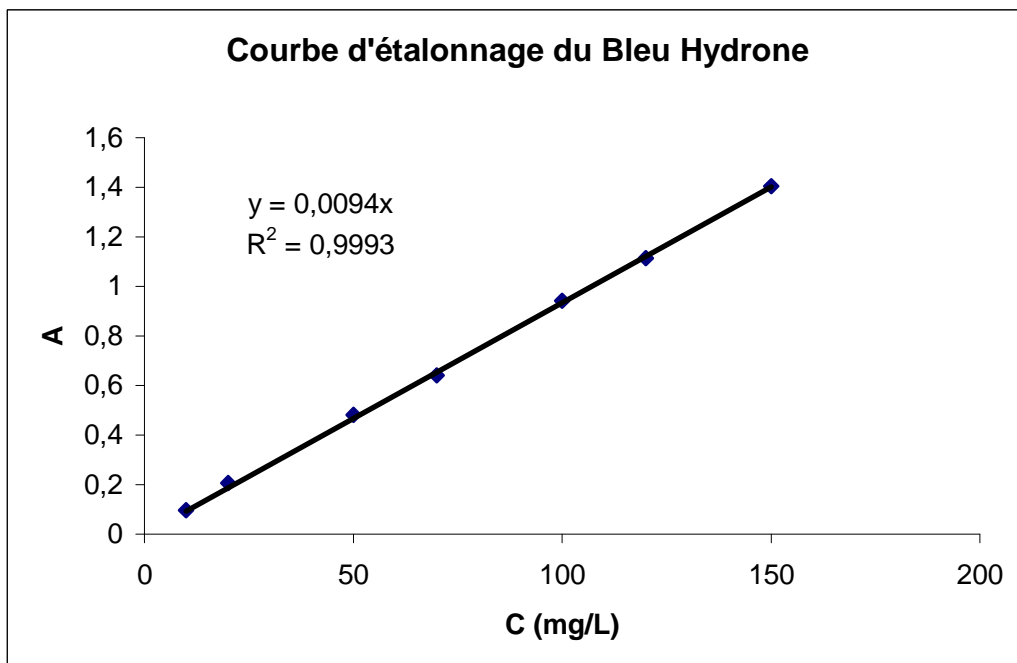
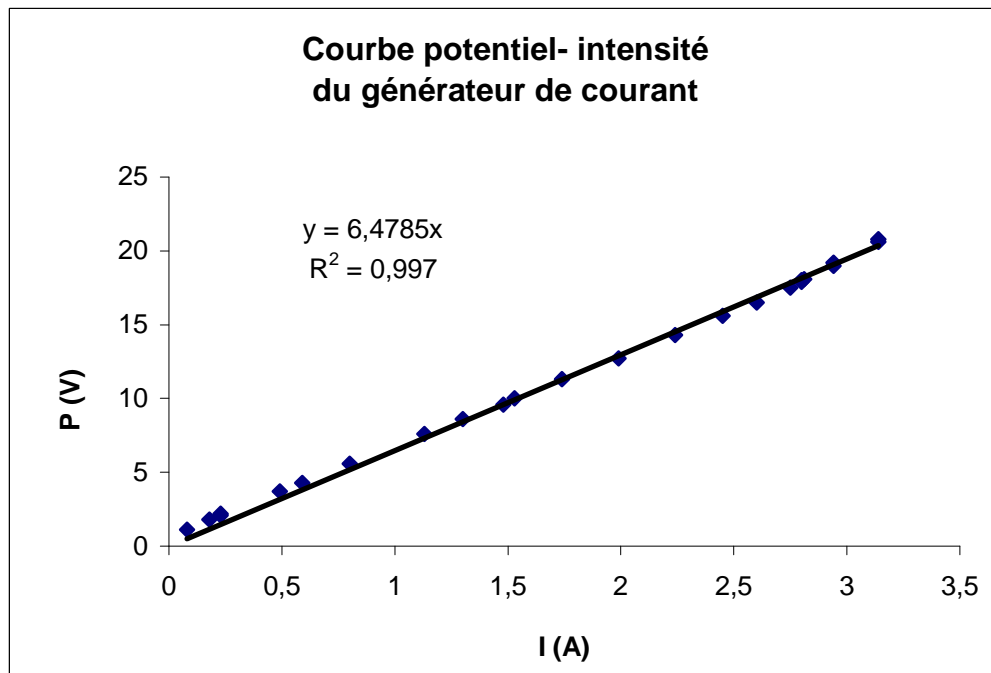
- ***ROQUES H.** Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Volume I. Technique et Documentation, Paris, 1979.
- ***ROSENBERG N.** Allergie respiratoire professionnelle aux matières colorantes. DMT, fiche d'allergologie- dermatologie professionnelle, INRS, 2^e trimestre, 2004.
- ***SANROMAN M.N., PAZOS M., RICART M.T., CAMESELLE C.** Electrochemical decolourisation of structurally different dyes. Chemosphere, 2004, 233-239.
- ***SAVAS KOPARAL A., OGUTVEREN U.B.** Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials, 2002, 83-94.
- ***SHI B., LI G., WANG D., FENG C., TANG H.** Removal of direct dyes by coagulation: the performance of preformed polymeric aluminium species. Journal of Hazardous Materials, 2007, 567- 574.
- ***SIVARAJ R., NAMASIVAYAM C., KADIRVELU K.** Orange peel as an adsorbent in the removal of acid violet (acid dye) from aqueous solutions. Wastes Management, 2001, 105- 110.
- ***SOARES O.S., ORFAO J.J.M., PORTELA D., VIEIRA A., PEREIRA M.F.** Ozonation of textile effluents and dye solutions under continuous operation: Influence of operating parameters. Journal of Hazardous Materials, 2006, 1664- 1673.
- ***SZPYRKOWICZ L.** Hydrodynamic effects on the performance of electro-coagulation/electro-flotation for the removal of dyes from textile wastewater. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005, 7844-7853.
- ***TAUBER M.M., GUEBITZ G.M., REHOREK A.** Degradation of azo dyes by Laccase and ultrasound treatment. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 2600-2607.
- ***TREHERNE G., CESSAC J.** Chimie. Edition Fernand Nathan, Paris, 1966.
- ***UGURLU M., GURSES A., DOGAR C., YALCIN M.** The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. Journal of Environmental Management, 2007.
- ***UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS).** Toxicity substances hydrology program, 2006, valable sur le site Internet: <http://toxics.usgs.gov>.
- ***VILAGINES R.** Eau, Environnement et Santé Publique. 2^e Edition. Introduction à l'hydrolyse, éditions TEC et DOC, 2003.
- ***WIKIPEDIA.** Industrie textile, 2007, valable sur le site Internet : <http://fr.wikipedia.org>.
- ***ZAROUAL Z., AZZI M., SAIB N., CHAINET E.** Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. Journal of Hazardous Materials, 2006, 73-78.

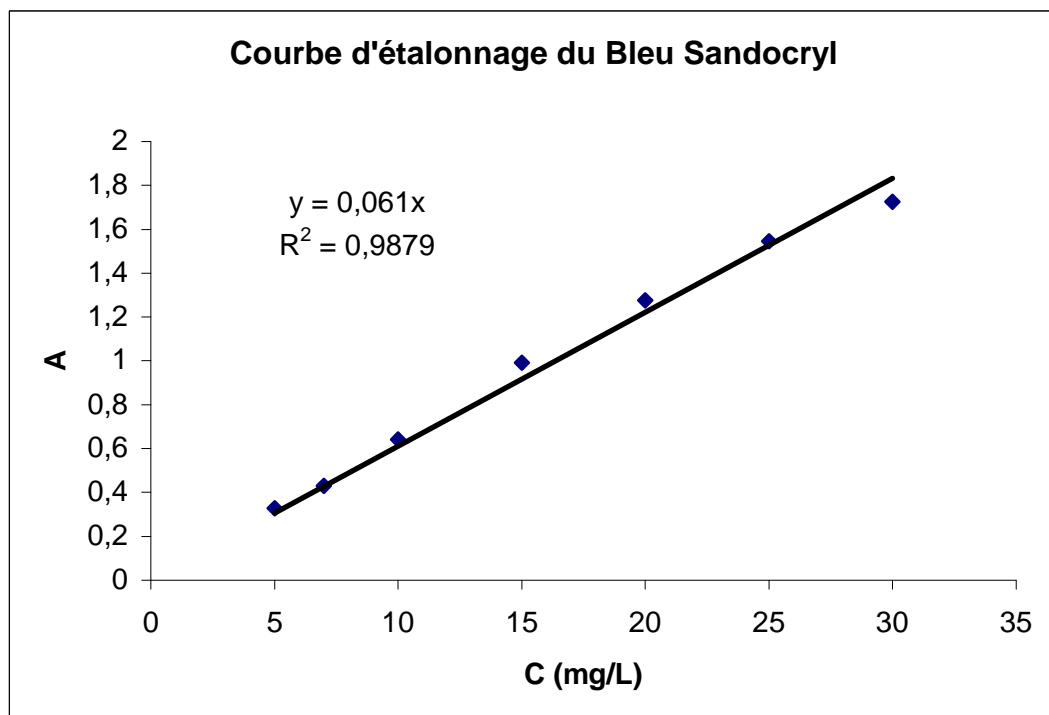
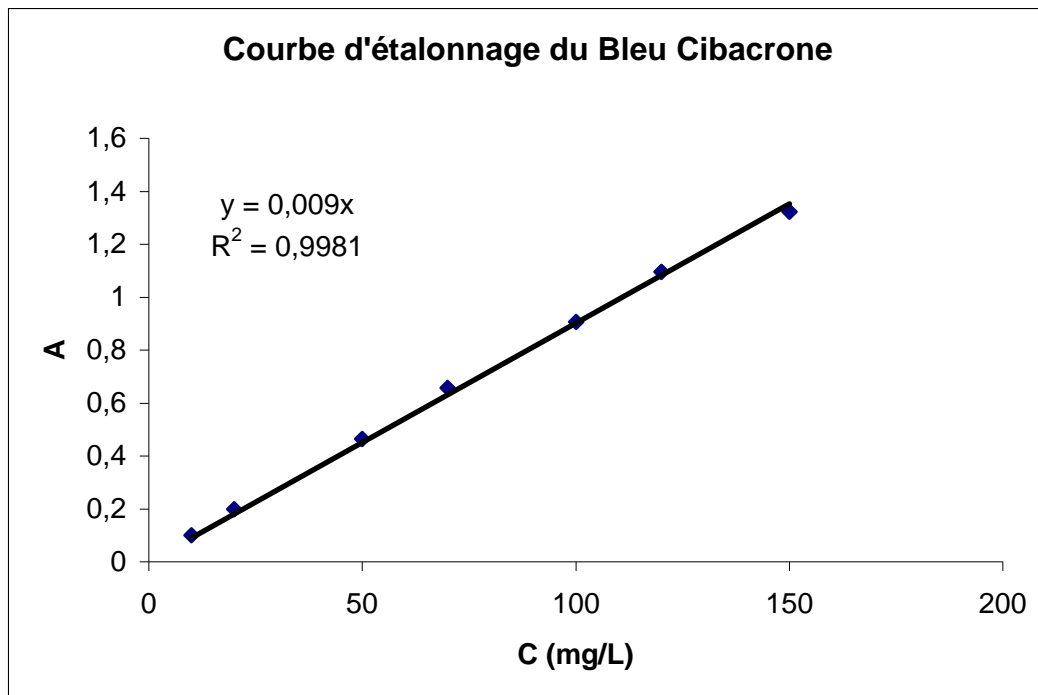
***ZAWLOTZKI GUIVARCH E.** Traitement des polluants organiques en milieu aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée « Electro-Fenton », application à la minéralisation des colorants synthétiques. Thèse de Doctorat. Université de Marne-La-Vallée, France, Septembre 2004.

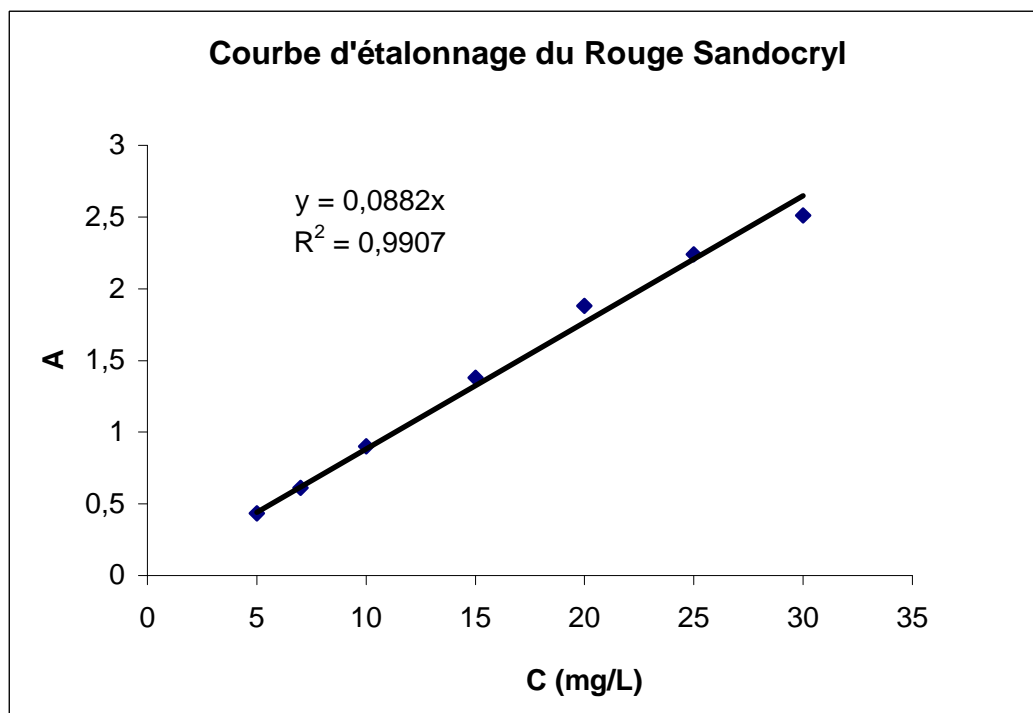
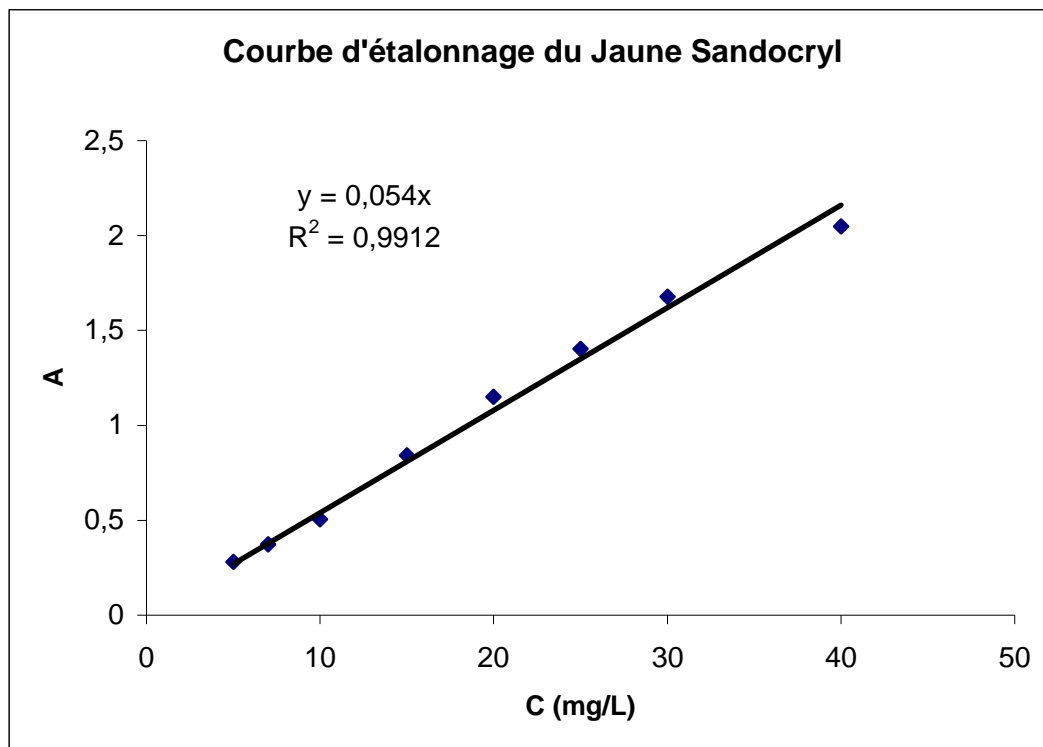
***ZEE F.P. V.** Anaerobic azo dye reduction. Thèse de Doctorat. Wageningen University, Pays-Bas, Mai 2002.

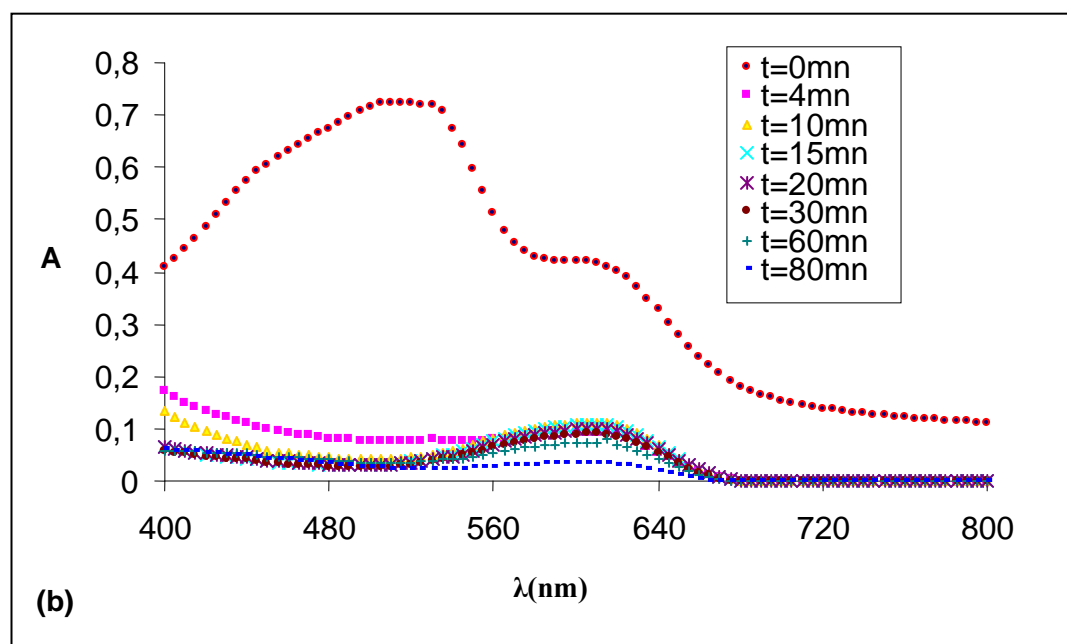
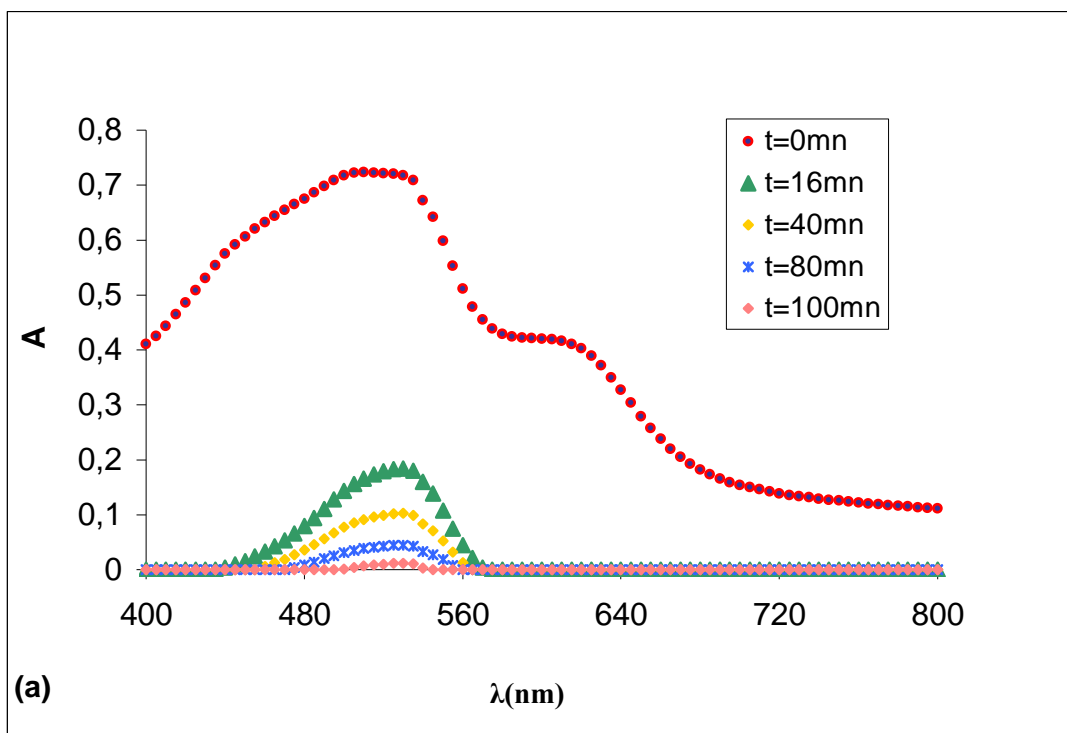
***ZHOU H., SMITHD.W.** Advanced technologies in water and wastewater treatment. Journal of Environmental Engineering Sciences, 2002, NRC, Canada, 247-264.

ANNEXE

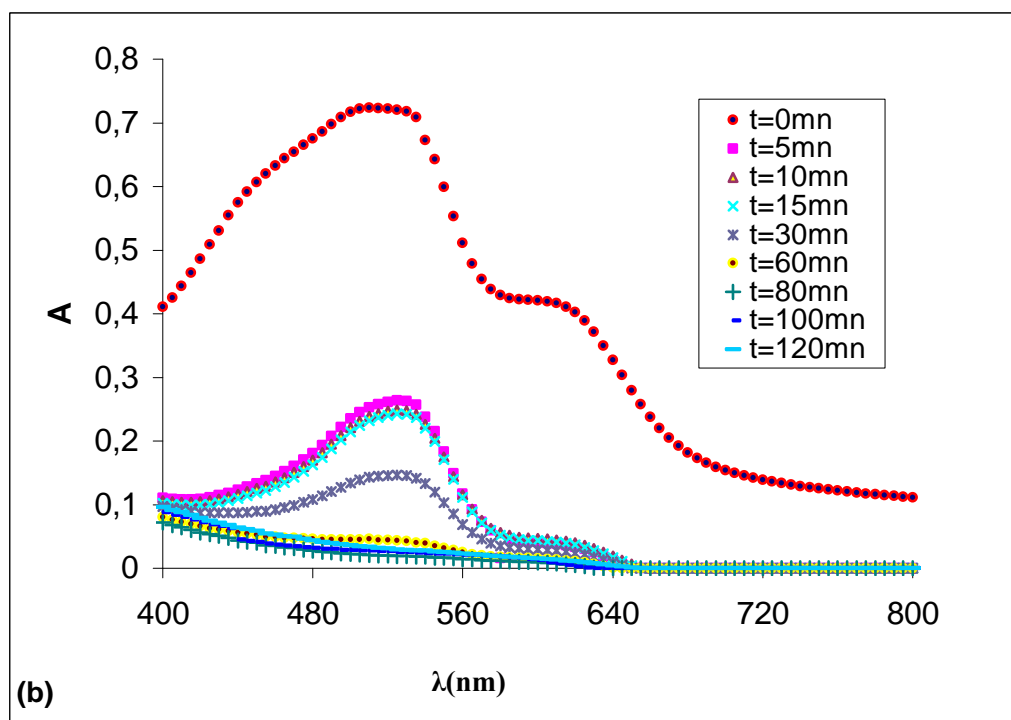
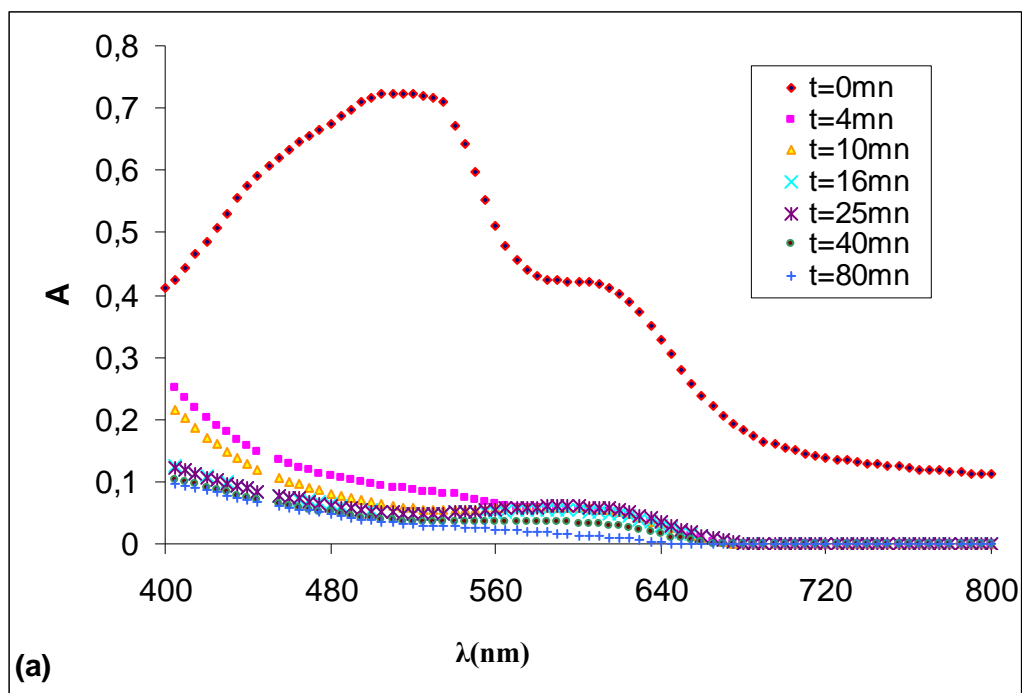








*Absorbance du rejet, $pH_i=5,2$, $N=6$, $d_i=2cm$, (a) électrodes en Al, $I=0,5A$,
(b) électrodes en Fe, $I=1A$.*



*Absorbance du rejet, $I=1A$, $pH_i=4$, $N=6$, $d_i=2cm$, (a) électrodes en Fe,
(b) électrodes en Al.*

ملخص:

في دراستنا طبقنا طريقة التخثير الكهربائي لمعاملة محاليل تصنيعية على الملون النسيجي ذو الكبريت ازرق الهيدرون (Hydrone)، و الملون النسيجي المتفاعل ازرق السيباكرون (Cibacrone). درسنا تأثير العوامل مثل: ناقلية المحلول، شدة التيار الكهربائي، pH الأولي، التركيز الأولي للملون و المسافة بين الإلكترودات على نزع الملون وذلك في حالة التخثير الكهربائي أحادي القطب و باستعمال نوعين من الإلكترودات الحديد و الألمنيوم. تم استنتاج القيم المناسبة التي تسمح بالوصول إلى أعلى النسب المئوية لنزع كل ملون و استعمالها بعد ذلك في التخثير الكهربائي ثنائي القطب. في هذه الحالة غيرنا عدد الإلكترودات الضحية (حديد و ألومنيوم). النتائج التي تحصلنا عليها تظهر أن طريقة التخثير الكهربائي ثنائي القطب تسمح بتخفيض شدة التيار الكهربائي المطبقة للحصول على نسب مئوية عالية في زمن تفاعلي قصير. قمنا كذلك بتطبيق التخثير الكهربائي ثنائي القطب لمعالجة بقايا مصنع أنسجة و سجلنا نسب مئوية مرتفعة لنزع كل ملون يدخل في تركيب هذه البقايا، مثال وصل نزع الملون الأحمر نسبة 98%.

كلمات مفتاحية: التخثير الكهربائي، نزع الملون، ملونات الأنسجة، حديد، ألومنيوم.

Résumé :

Dans notre étude, nous avons appliqué le procédé d'électrocoagulation pour traiter des solutions synthétiques contenant des colorants textiles, l'un au soufre « Bleu Hydrone » (BH) et l'autre réactif « Bleu Cibacrone » (BC). L'effet des paramètres opérationnels tels que : conductivité de la solution, densité de courant, pH initial, concentration initiale en colorant et distance entre les électrodes a été étudié dans le cas d'électrocoagulation monopolaire et ce pour deux types d'électrodes : Fer et Aluminium. Les optima de tous les paramètres permettant d'atteindre les pourcentages d'élimination les plus élevés ont été déterminés et utilisés dans l'électrocoagulation bipolaire au cours de laquelle nous avons fait varier le nombre d'électrodes sacrificielles (Fe ou Al) . Les résultats ont montré que l'EC bipolaire a permis de réduire la densité de courant appliqué pour obtenir de hauts niveaux de décoloration en un temps réactionnel court.

Nous avons également appliqué l'EC bipolaire pour le traitement d'un rejet textile réel où nous avons enregistré des pourcentages élevés d'élimination des colorants entrant dans la composition de cet effluent, par exemple le colorant rougeâtre a été éliminé à 98%.

Mots clés : électrocoagulation, colorants textiles, électrodes, fer, aluminium, décoloration.

Abstract:

In our study we have applied the process of electrocoagulation for the treatment of synthetic solutions containing textile dyes, one sulphuric "Hydrone Blue" and the other reactive "Cibacron Blue". The effect of parameters such as: solution conductivity, current density, initial pH, dye initial concentration and distance between electrodes has been studied in the case of monopolar electrocoagulation and this for two kinds of electrodes: Iron and Aluminium. The optima of all the parameters allowing the achievement of the highest removal efficiencies were determined and used in the bipolar electrocoagulation during which we have varied sacrificial electrodes number (Iron or Aluminium); the results showed that bipolar EC has allowed the reducing in current density used for the obtention of high levels of dyes removal in a short time.

We have also applied the electrocoagulation process for the treatment of an industrial textile effluent and we have registered high removal percentages of the dyes contained in this effluent, namely the red dye was removed with 98%.

Key words: electrocoagulation, textile dyes, electrodes, iron, aluminium, colour removal.