

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAÂD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE CHIMIE INDUSTRIELLE



Mémoire de Master

Option: Procédés et traitement des effluents et protection de l'environnement

THEME :

ELIMINATION DE BRUN DIRECT ET BLEU CIBACETTE PAR
ELECTROCOAGULATION EN UTILISANT DES ELECTRODES EN
ALUMINIUM

Présenté par

M^{elle} BENCHELIGHEM Fatma Zohra

Proposé par:

Dr. D.GHERNAOUT

2010 - 2011

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I
COLORANTS

CHAPITRE II
ELECTROCOAGULATION

CHAPITRE III
TEQUNIQYES EXPIRIMENTALES

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSION

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Surtout, A ma mère qui m'a éclairée mon chemin et qui m'a encouragé et soutenue toute au long de mes études.
- A mes chers frères et sœurs : Imen, Islem, Lina, Maria, Sérine, Fadi, Djalile.
- A mon fiancé Pour son soutien.
- A mes collègues de la promotion.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire 256 au Département de Chimie Industrielle, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Saad Dahlab de Blida, sous la direction de Monsieur Djamel GHERNAOUT, Maître de Conférences au même Département.

D'abord je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.

Je saisis cette occasion pour remercier mon promoteur pour leur aide inestimable, leur compétence, et les conseils qu'ils m'ont prodigués et m'ont permis de conduire ce travail jusqu'à son terme.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur HOUARI, le chef de département de chimie industrielle.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'être les examinateurs de cette mémoire.

Enfin, je rends hommage et j'exprime ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

ملخص

هذه الدراسة تركز على تطبيق طريقة التخثير الكهربائي لمعالجة محاليل ملونة باثنين من الأصباغ المستخدمة في صناعة الغزل و النسيج بني و ازرق وقد تم تطبيق منهجية البحوث التجريبية لدراسة تأثير معايير معينة مثل شدة التيار الكهربائي، وتركيز الاصبغة، والمباعدة بين المسريين، تركيز كلوريد الصوديوم ووقت المعالجة باستخدام أقطاب من الألمنيوم .
يوجد كلوريد الصوديوم بتركيز 1 غرام / لتر نسبة الإزالة 97.63 % (تركيز الصبغة البنية 10 غرام / لتر مع توقيت 45 دقيقة) □ 99.89 % (تركيز الصبغة البنية 40 غرام / لتر مع توقيت 60 دقيقة) و 99.74 % (تركيز الصبغة الزرقاء 40 غرام / لتر مع توقيت 60 دقيقة) و هذا بتوتر كهربائي قدره 12 فولط و مسافة بين المسريين هي 2 سم مع تحريك بسيط. و قد طبقنا أيضا التخثير الكهربائي العلاج محاليل ملونة محضرة بأنواع مختلفة من المياه وغيرها من التجارب أجريت باستخدام أقطاب الحديد.

الكلمات المفاتيح : التخثير الكهربائي □ البني □ الازرق □ الألمنيوم □ الحديد □

Résumé

Cette étude porte sur l'application du procédé d'Electrocoagulation (EC) pour le traitement des solutions colorées par deux colorants utilisées dans l'industrie de textile : brun direct 2 (BD) et bleu cibacette BF (BC). La méthodologie de la recherche expérimentale a été appliquée afin d'étudier l'influence de certaines paramètres comme : l'intensité du courant, la concentration du colorant, l'effet de l'agitation, la distance inter-électrodes, la concentration de NaCl et le temps d'électrolyse t sur l'efficacité d'EC en utilisant des électrodes en aluminium. En présence de NaCl à 1 g/L, des rendements d'élimination de 97,63% ($C_{BD} = 10$ mg/L ; $t = 45$ min) et 99,89% ($C_{BD} = 40$ mg/L, $t = 60$ min) pour BD et 99,74% pour BC ($C_{BC} = 40$ mg/L, $t = 60$ min) ont été atteints pour $U = 12$ V, une distance inter-électrodes égale à 2 cm et avec une agitation faible. Nous avons également appliqué l'EC pour le traitement de différents types d'eau et autres expériences ont été réalisées en utilisant des électrodes en Fe.

Mots clés : Electrocoagulation (EC); Brun direct 2 (BD); Bleu cibacette BF (BC); Aluminium ; Fer.

Abstract

This study focuses on applying the Electrocoagulation (EC) method for the treatment of coloured solutions of two dyes used in textile industry: direct brown 2 (BD) and BF cibacette blue (BC). The methodology of experimental research has been applied to study the influence of certain parameters such as: the current, the concentration of the dye, the effect of agitation, the electrode spacing, the concentration of NaCl and the electrolysis time t on the effectiveness of EC using aluminum electrodes. In the presence of NaCl at 1 g/L, yield removal of 97.63% ($C_{BD} = 10$ mg/L, $t = 45$ min) and 99.89% ($C_{BD} = 40$ mg/L, $t = 60$ min) for BD and 99.74% for BC ($C_{BC} = 40$ mg/L, $t = 60$ min) were achieved for $U = 12$ V, an inter-electrode distance equal to 2 cm and with a gentle stirring. We also applied the EC for the treatment of different types of water and other experiments were performed using Fe electrodes.

Keywords: Electrocoagulation (EC); Direct Brown 2 (BD); Blue cibacette BF (BC), Aluminium, Iron.

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats obtenus dans cette étude de recherche de traitement d'électrocoagulation (EC) des solutions synthétiques colorées par deux colorants utilisés dans l'industrie des textiles : brun direct 2 (BD), comme colorant azoïque, et le bleu cibacette BF (BC), comme colorant anthraquinonique, pour optimiser les différents paramètres influençant l'efficacité du traitement d'EC, nous arrivons à conclure que :

L'étude de l'effet du pH dans la gamme 2,5-10 et la tension appliquée [4, 8, 12 V] donne :

- Pour BD, 97,63% à une concentration de 10 mg/L (pH = 6, $U = 12$ V, $t = 45$ min) et 99,89% à une concentration de 40 mg/L (pH = 10, $U = 12$ V, $t = 60$ min) ;
- Pour BC, 99,74% à une concentration de 40 mg/L (pH = 2,5, $U = 12$ V, $t = 60$ min).

Pour améliorer l'EC, il faut que la concentration de NaCl, comme support électrolytique, soit inférieure ou égale à 1 g/L. En effet, si cette concentration dépasse 1 g/L le rendement diminue pour BD.

Concernant la distance inter-électrode, l'efficacité d'EC pour BD diminue de 98.66% pour 1,5 cm jusqu'à 78.66% pour 4,5 cm.

L'agitation a un faible effet sur le traitement d'EC. En effet, le rendement d'élimination de BD augmente de 92,34% (sans agitation) à 98% (agitation moyenne) et puis il diminue à 96,4 % (agitation forte).

Concernant le matériau d'électrode, l'aluminium permet d'avoir un meilleur abattement de l'absorbance (97,63%) comparativement au fer (80,97%).

L'EC est aussi efficace pour d'autres types d'eau utilisée pour préparer les solutions synthétiques. Réellement, les électrodes en Al sont plus efficaces pour les solutions préparées à base d'eau distillée et eau déminéralisée. Par contre, les électrodes en fer sont plus efficaces pour le traitement des solutions préparées à base d'eau de robinet.

En plus, nous avons calculé la quantité de l'aluminium dissous :

- Pour BD, 0,118 et 0,231 g à $C_{BD} = 10$ et 40 mg/L, respectivement ;
- Pour BC, 0,238 g à $C_{BC} = 40$ mg/L.

D'autre part, nous avons également calculé la consommation électrique où nous avons obtenu les meilleurs rendements d'élimination :

- Pour BD, 8460 et 16560 kWh/m³ à C_{BD} = 10 et 40 mg/L, respectivement ;
- Pour BC, 17280 kWh/m³ à C_{BC} = 40 mg/L.

Ainsi donc, l'EC peut être considérée comme une technique fiable de traitement des eaux usées de l'industrie de textile.

En perspective :

- Les solutions traitées peuvent être examinés par d'autres méthodes d'analyses (HPLC, IRTF, etc.),
- Interpréter les résultats où nous avons étudié l'effet du pH par un Chimiste Organicien pour apporter plus de lumière sur les mécanismes réactionnels dans le procédé d'EC.

Cette étude a pour but d'étudier l'effet de certains paramètres influençant l'efficacité de traitement d'électrocoagulation (EC).

IV.1. Essais préliminaires

Avant d'étudier l'influence des différents paramètres sur l'efficacité de traitement d'EC, on fait quelques expériences préliminaires pour mieux adopter la méthodologie expérimentale.

IV.1.1. Courbe d'étalonnage

Afin de vérifier la faisabilité de la méthode spectrophotométrique visible dans le cas d'un colorant organique (où la linéarité de la concentration en fonction de l'absorbance mesurée doit être aussi parfaite que possible), une série de solutions ont été préparées et analysés en spectrophotométrie visible.

Les résultats obtenus sont regroupés aux Tableau A.1. et B.1 pour les colorants brun direct 2 (BD) bleu cibacette (BC), respectivement. Les courbes d'étalonnage sont représentées dans les Figures IV.1 et 2, respectivement.

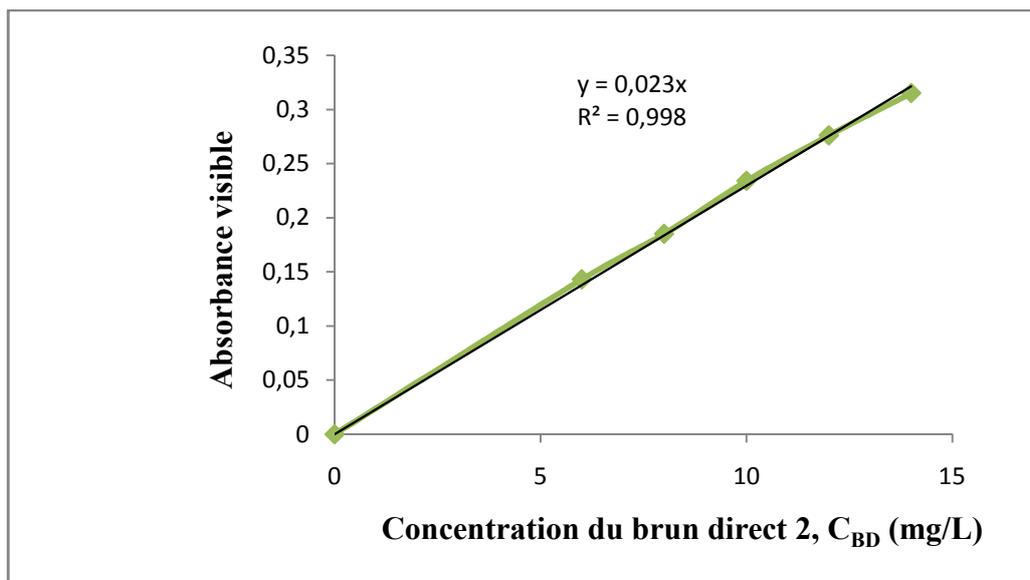


Figure IV.1. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g L^{-1} (pH = 6).

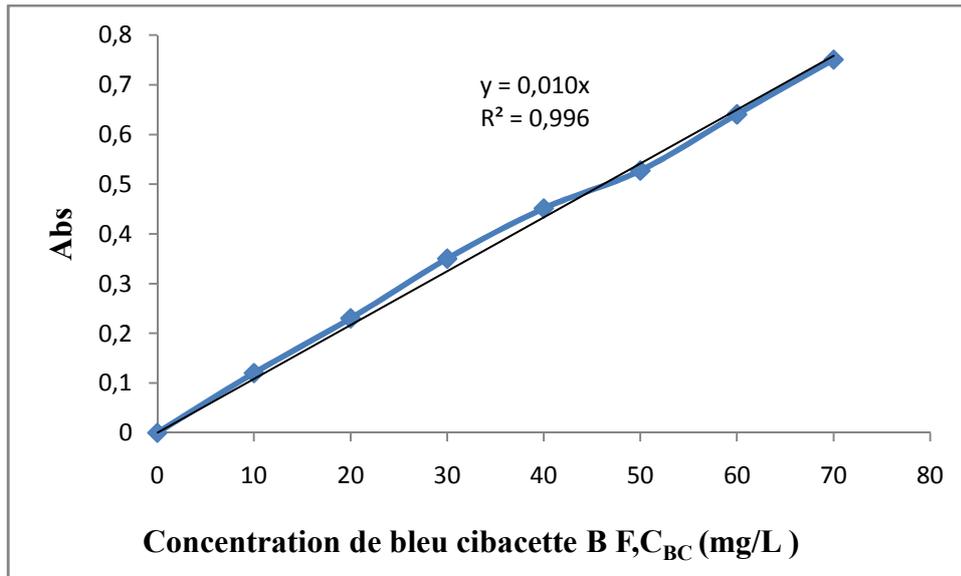


Figure IV.2. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (630 nm) du BC en présence de NaCl à 1 g L^{-1} (pH = 5.02).

Pour les Figures IV.1 et 2, nous remarquons que les courbes sont des droites qui passent par l'origine. En plus, les coefficients de corrélation sont satisfaisants (≈ 1) cela implique la faisabilité de la méthode spectrophotométrique dans l'intervalle de ces concentrations. Donc la loi de BEER-Lambert est vérifiée.

IV.1.2. Courbes d'étalonnages à différents pH

Pour examiner l'effet du pH sur la linéarité de la méthode spectrophotométrique et sur l'absorbance visible de nos solutions de colorants examinés, des séries de solutions identiques à celles préparées précédemment (pH 6 pour BD et 5 pour BC) ont été ajustées à différentes valeurs de pH : à savoir 4, 8 et 10. Les résultats obtenus sont regroupés aux Tableaux A.3 et B.3, respectivement. Les courbes d'étalonnage sont représentées dans les Figures IV.3 et 4, respectivement

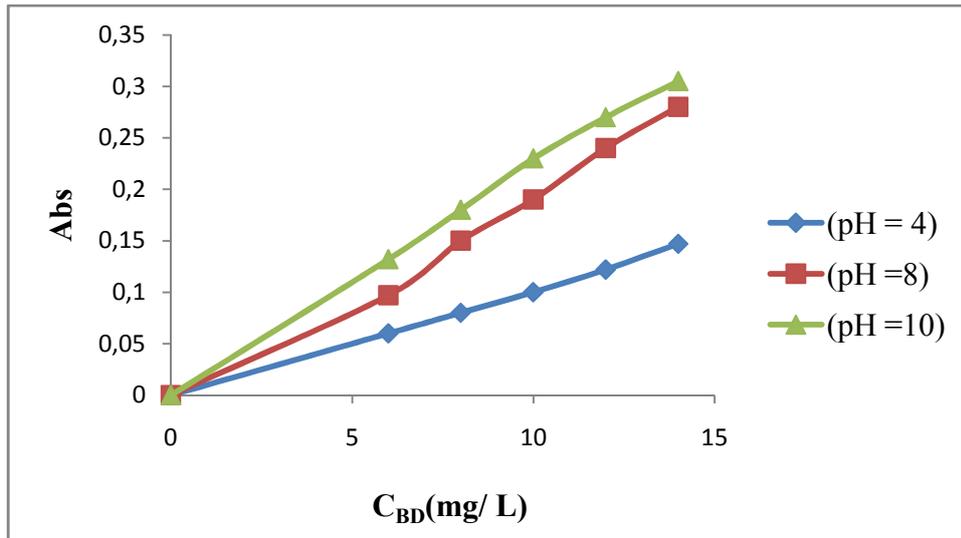


Figure IV. 3. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g L^{-1} pour différentes.

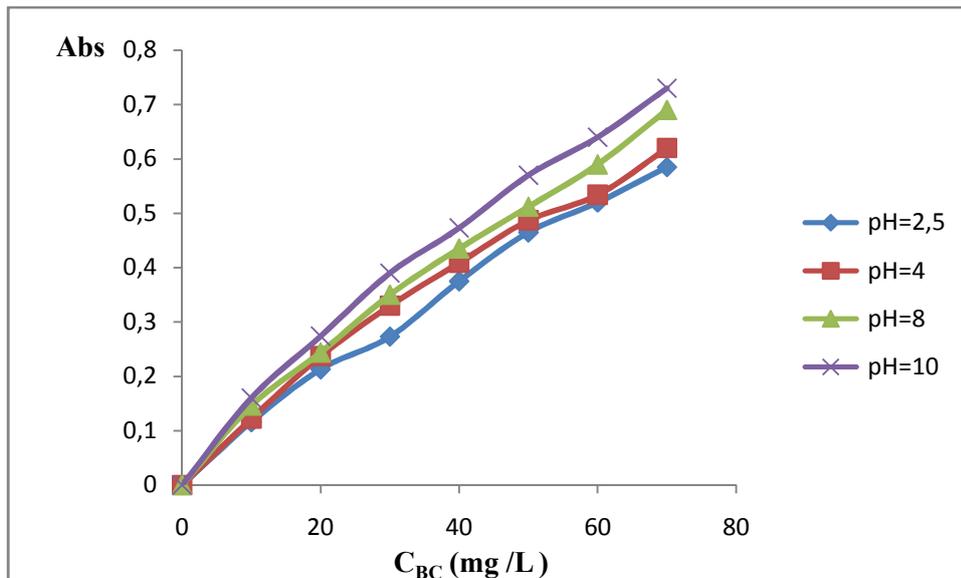


Figure IV.4. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (630 nm) du BC en présence de NaCl à 1 g L^{-1} a différentes pH.

D'après les Figures IV.3 et 4, le pH n'a aucune influence sur la linéarité de la courbe d'étalonnage des deux colorants examinés. Cependant, l'absorbance de BD et BC est fortement influencée par le pH. En effet, au fur et à mesure que le pH augmente de 4 vers 10 en passant par 8, l'absorbance augmente. Cette tendance est plus remarquable pour le BD que pour le BC même s'ils ne sont pas au même ordre de grandeur de concentrations (de 0 à 15 mg/L pour BD et de 0 à 70 mg/L pour BC). A priori, le pH où l'absorbance est minimale

devrait être favorable à une bonne coagulation/floculation du colorant. En effet, une faible absorbance à un pH donné, en l'occurrence il s'agit du pH acide (2,5 et 4), indique que la molécule est moins dissoute et donc elle est fermée sur elle-même. Quand le pH diminue, les ions H^+ neutralisent les groupements fonctionnels (carboxyliques, phénoliques, et hydroxyles) des macromolécules organiques qui sont chargés négativement diminuant ainsi leur solubilité dans l'eau, ce qui facilite leur colloïdisation avant leur agglomération. En fait c'est l'étape clé de la coagulation, d'où la naissance du concept de « *coagulation améliorée* » [12].

Pour 10 mg/L de concentration pour les deux colorants, l'absorbance pour les différentes valeurs de pH est comme suit :

- Pour BD : pH = 4, $A = 0,10$; pH = 8, $A = 0,19$; pH = 10, $A = 0,23$.
- Pour BC : pH = 4, $A = 0,122$; pH = 8, $A = 0,146$; pH = 10, $A = 0,160$.

Comparativement entre les deux colorants BD et BC, il semble que le colorant BD est relativement moins dissous que le colorant BC à pH 4. Cependant, cette tendance s'inverse pour les deux autres pH, à savoir pH 8 et 10. Ce comportement en fonction du pH pour les deux colorants devrait laisser supposer que le BD est facilement éliminable à pH 4, par contre le BC l'est aux pH 8 et 10.

IV.1.3. Balayage de l'intensité en fonction du voltage pour les différentes solutions

Pour étudier la variation de l'intensité du courant électrique I (A) en fonction de la tension appliquée U (V) plusieurs solutions ont été préparées :

- Eau distillée,
- Eau distillée + 1 g de NaCl,
- Première solution colorée : 10 mg/L BD + eau distillée,
- Deuxième solution colorée : 10 mg/L BD + eau distillée + 1 g de NaCl,
- Troisième solution colorée : 40 mg/L BC + eau distillée,
- Quatrième solution colorée : 40 mg/L BC + eau distillée + 1 g de NaCl.

Les résultats obtenus sont représentés dans les Figures IV.5 et 6.

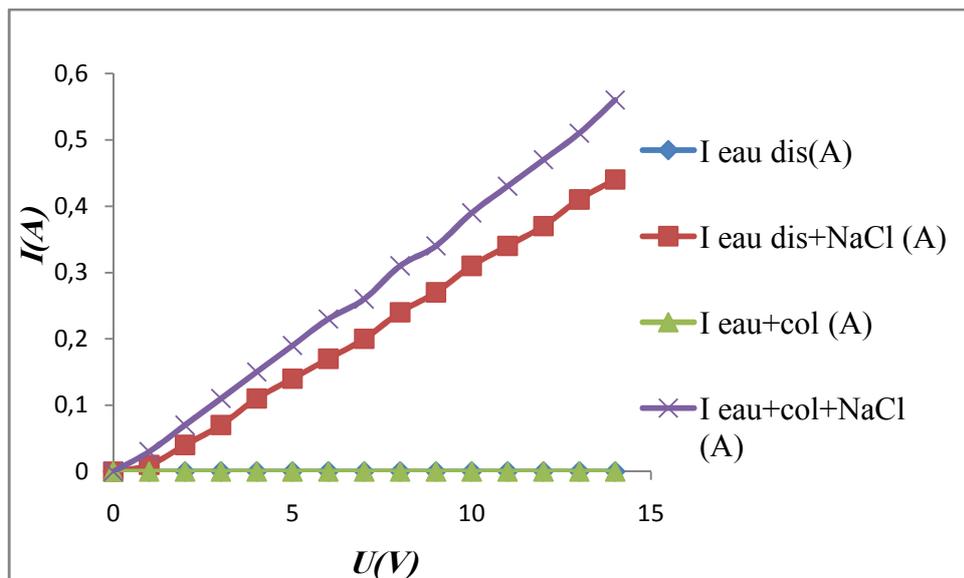


Figure IV.5. Variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour des différentes solutions du BD (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).

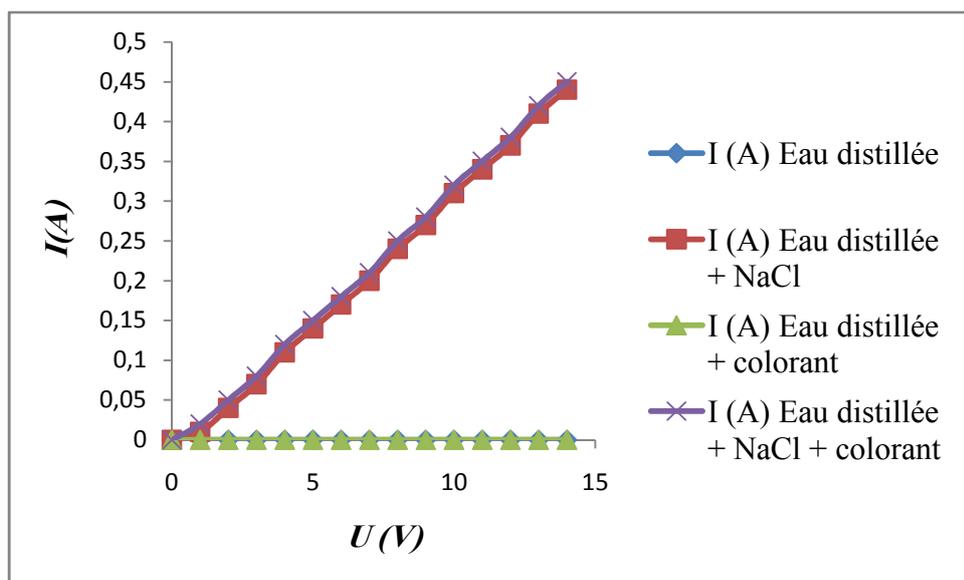


Figure IV.6. Variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour des différentes solutions du BC (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).

Selon les Figures IV.5 et 6, il est évident de ne pas appliquer l'EC pour l'eau distillée seule et les solutions colorées sans l'ajout de NaCl parce que l'eau distillée seule n'est pas un bon conducteur d'électricité. Donc, l'ajout du chlorure de sodium comme support électrolytique est utilisé pour accroître la conductivité de la solution [19]. Par conséquent, une concentration de 1 g de NaCl/L a été choisie pour toute notre étude.

IV.1.4. Balayage du voltage à différents pH

Pour vérifier l'influence du pH sur la variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U , les mêmes solutions ont été préparées à différentes valeurs de pH pour les deux colorants. Les résultats sont montrés dans les Figures IV.7 et 8 pour BD et BC, respectivement. En examinant les Figures IV.7 et 8, nous observons que le pH a une forte influence sur la variation de l'intensité du courant en fonction de la tension appliquée. Pour cela, pour chaque expérience, nous allons fixer le voltage et mesurer l'intensité du courant avant et après chaque essai.

D'autre part, comme le montre la Figure IV.7, au pH 4 et 10 le courant électrique passe mieux dans le système électrochimique qu'au pH 6 et 8.

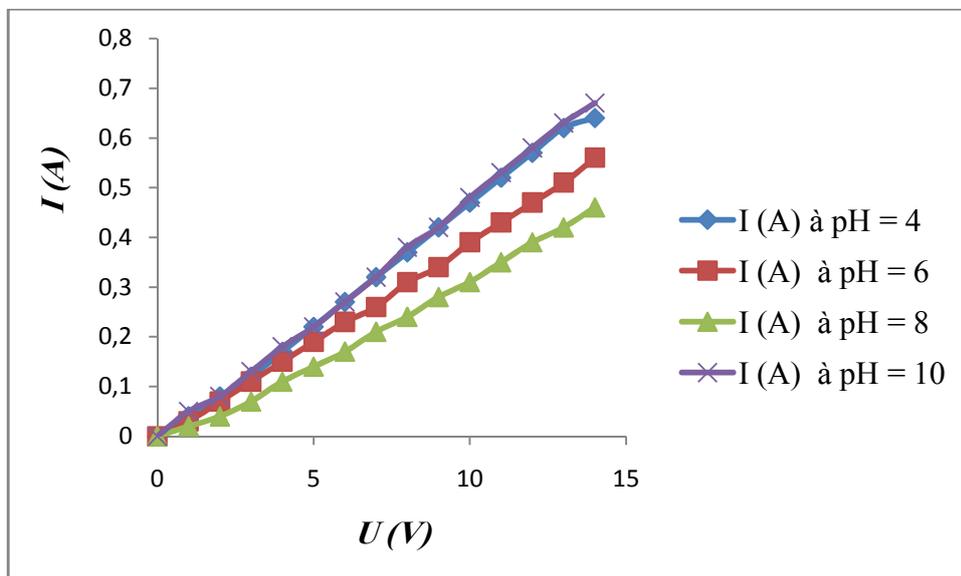


Figure IV.7. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour la solution du BD à 10 mg L^{-1} .

Cependant, pour le BC, comme le montre la Figure IV.8, le courant électrique passe mieux au pH 8 et 10 qu'au pH 6, 4 et 2,5. Au pH 2,5, le passage du courant électrique semble être perturbé par la libération intense des bulles de $\text{H}_{2(\text{g})}$ à partir de la cathode.

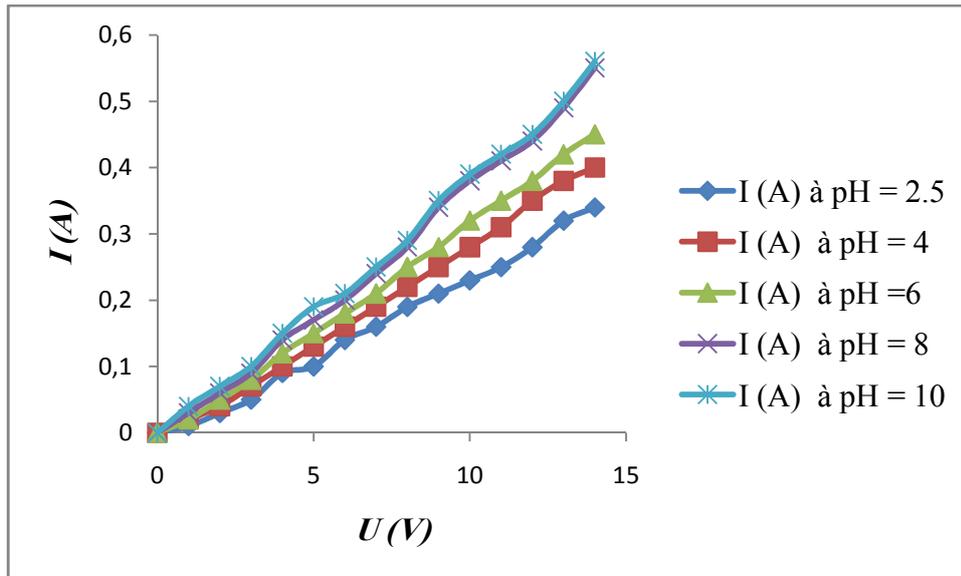


Figure IV .8. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour la solution du BC à 40 mg/L.

IV.2. Traitement d'électrocoagulation

Le but de cette partie est l'optimisation des différents paramètres qui influencent l'efficacité du traitement d'EC pour éliminer les deux colorants choisis dans cette étude.

D'une manière générale, les observations communes aux différentes solutions examinées pendant le traitement sont :

- Dégagement des bulles d'hydrogène au niveau de la cathode.
- Dégagement des bulles de chlore (quand NaCl est ajouté comme support électrolytique) et des bulles d'oxygène au niveau de l'anode.
- Formation des petits floccs qui sont entraînés par les bulles de gaz pour s'accumuler à la surface de la solution sous forme d'une couche de mousse comme le montre la Figure IV.9.
- Diminution de la masse de l'anode (amoindrissement de l'épaisseur, voire même de la largeur de l'anode) et formation d'un dépôt blanchâtre au niveau de la cathode.
- Les solutions colorées des deux colorants deviennent incolores.

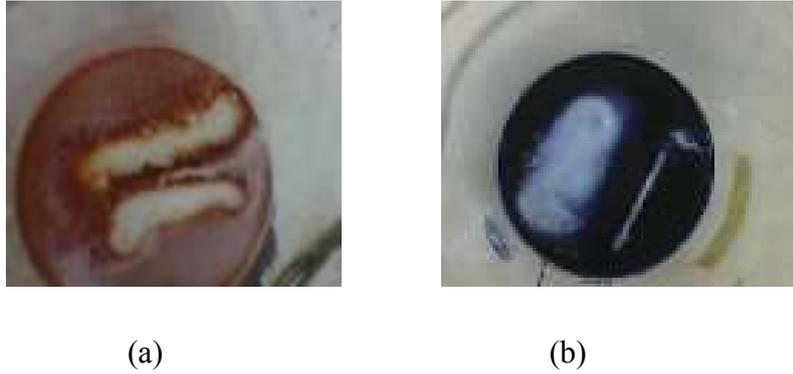


Figure IV.9. Photos de l'écume formé pendant le traitement d'EC. (a) pour BD et (b) pour BC.

IV.2. 1. Effet du pH initial sur l'électrocoagulation

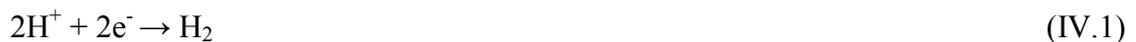
Dans l'EC, le pH de la solution joue un rôle important dans l'élimination des polluants [24]. Pour ce faire, l'effet du pH initial sur la réduction des deux colorants contenus dans des solutions synthétiques préparées à différents pH a été suivi. Le pH initial varie entre 2,5 et 10 et tous les autres paramètres sont maintenus constants.

IV.2.1.1. Evolution du pH en fonction du temps

Nous avons suivi l'évolution du pH au cours d'EC pour les deux colorants, les résultats obtenus sont représentés dans la Figure IV.10 ((a) pour BD et (b) pour BC). Le pH augmente au cours du traitement pour les milieux acides (2,5, 4 et 6) et diminue pour les milieux basiques (8 et 10) à cause de la consommation et la production des ions OH^- au cours du traitement [6]. Nous constatons une stabilisation du pH avec le temps du au pouvoir neutralisant du procédé électrochimique.

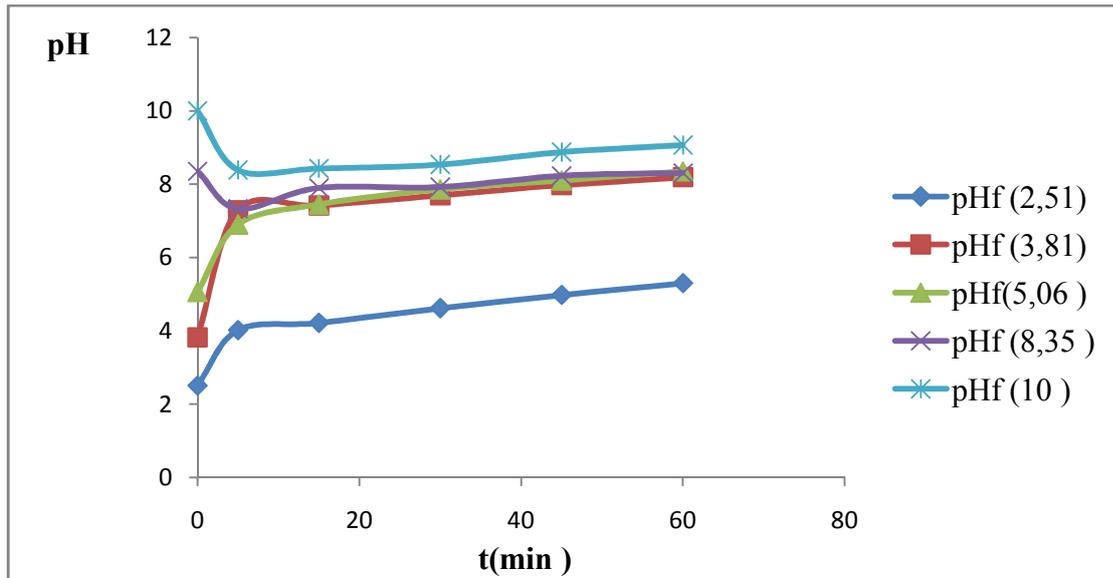
Nous pouvons expliquer ces phénomènes par les réactions suivantes :

- L'augmentation du pH au milieu acide est due à l'hydrolyse de l'eau et dégagement d'hydrogène, donc production des OH^- : [14]

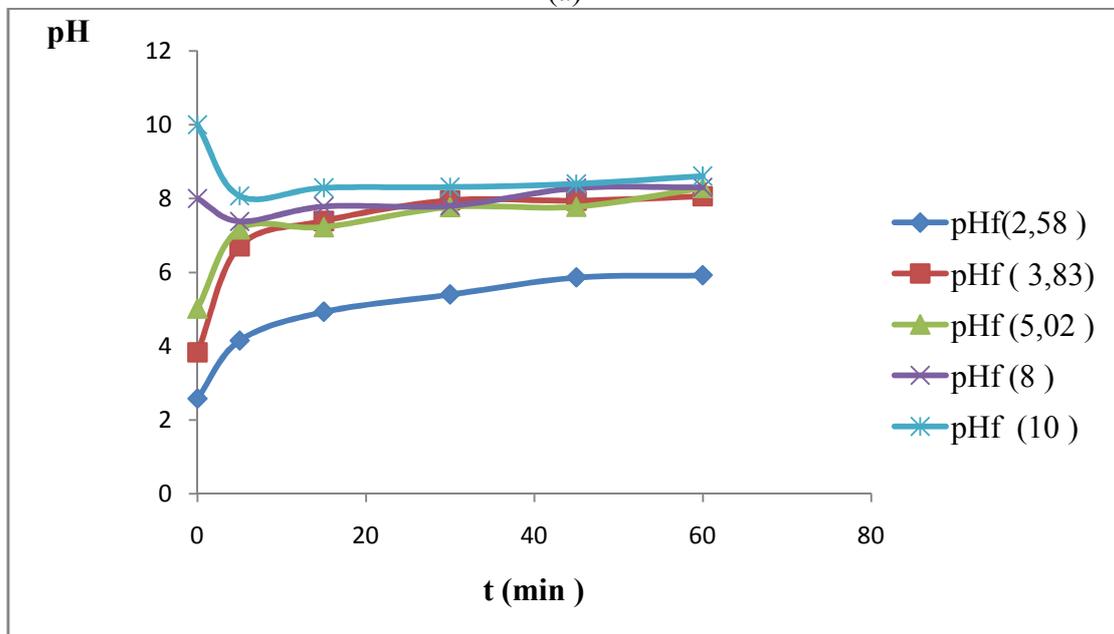


- La diminution du pH au milieu basique est due à la consommation des ions OH^- : [19]





(a)

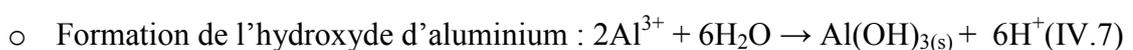
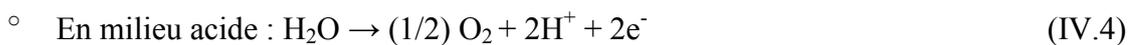


(b)

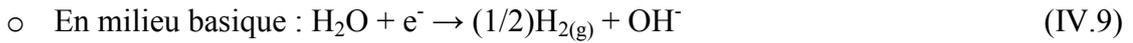
Figure IV.10. Evolution du pH au cours du traitement d'EC. $C_{BD} = 40$ mg/L, $C_{BC} = 40$ mg/L, $d = 2$ cm, $U = 4$ V, $C_{NaCl} = 1$ g/L. (a) pour BD et (b) pour BC.

Donc, les principales réactions aux électrodes sont, d'après [19] :

A l'anode:



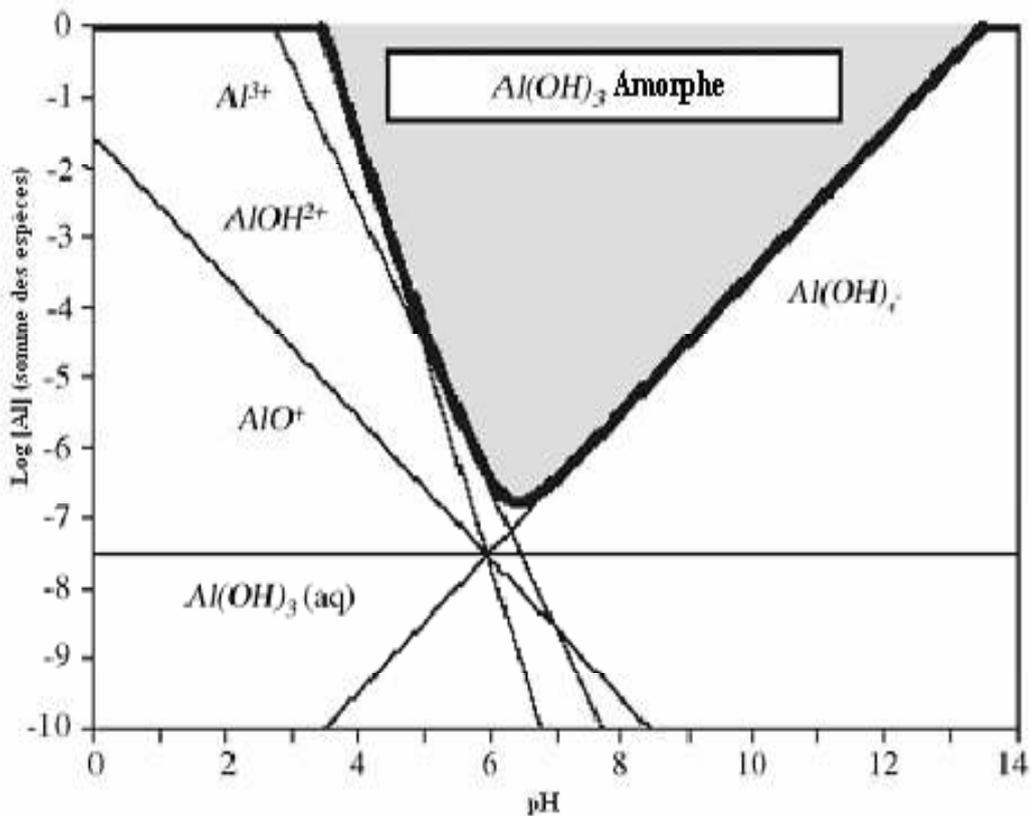
A la cathode :



Donc au cours du traitement, il y'a formation de plusieurs espèces [6] :

- Pour un pH faible d'environ 2-3, les espèces cationiques monomères Al^{3+} et $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ sont prédominantes.
- Lorsque le pH est compris entre 4 et 9, les Al^{3+} et les OH^- produits par les électrodes (à l'anode pour Al^{3+} et à la cathode pour OH^-) réagissent pour former différentes espèces telles que : $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$, pour se transformer finalement en un composé amorphe insoluble dans l'eau : $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$, via une cinétique de polymérisation/précipitation complexe.
- A $\text{pH} > 10$, la concentration de l'espèce anionique monomérique $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ augmente au détriment de la formation $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$. De plus, la cathode pourrait être chimiquement attaquée par les ions OH^- générés en même temps que le gaz hydrogène à des valeurs de pH élevées.

Les différentes espèces formées sont représentées dans la Figure IV.11.



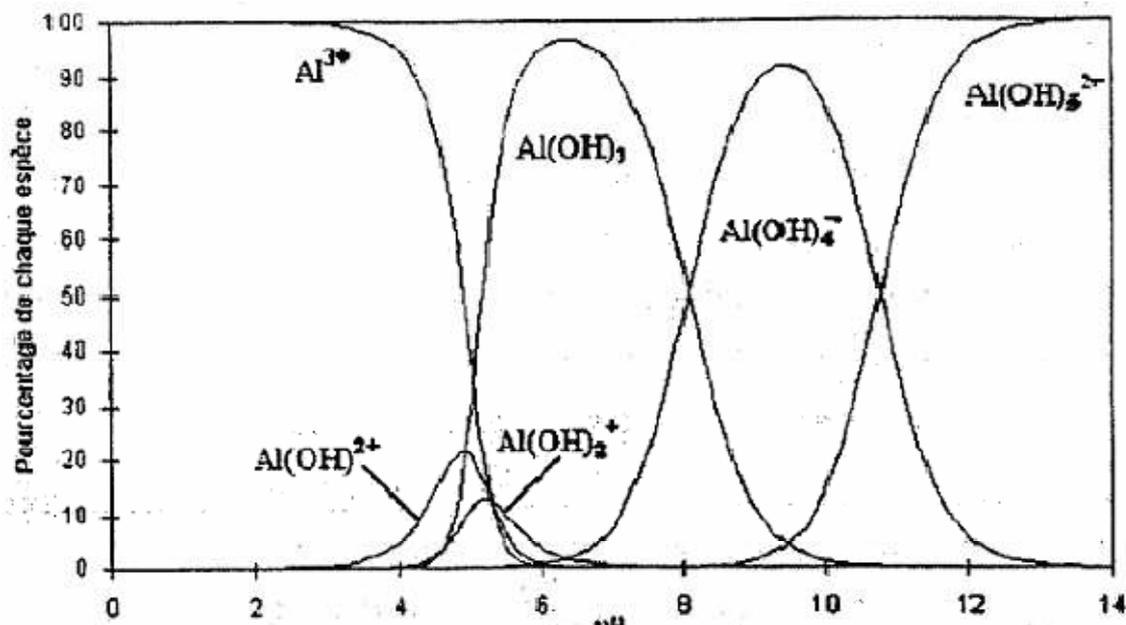


Figure IV.11: Diagrammes de prédominance des espèces d'aluminium et effet du pH [6].

D'après la Figure IV.12, l'allure de la courbe du pH final de BC présente une augmentation plus élevée par rapport au BD. Cela pourrait s'expliquer par la différence de structure des deux colorants : le BC contient 1 groupement OH et 2 groupements CO qui sont fort susceptibles d'attirer H^+ par contre le BD contient seulement 2 groupements OH.

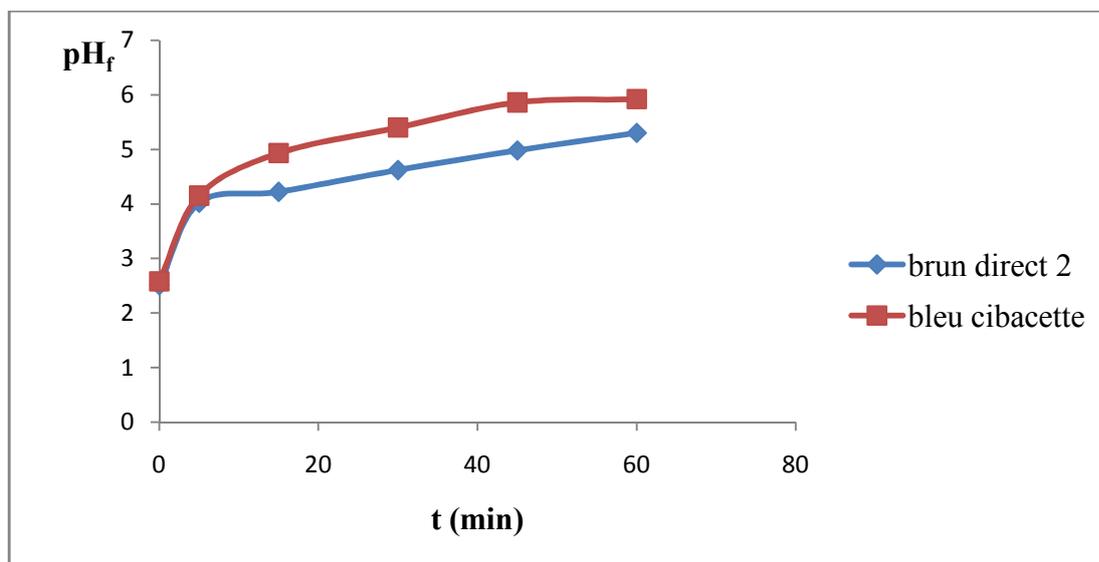
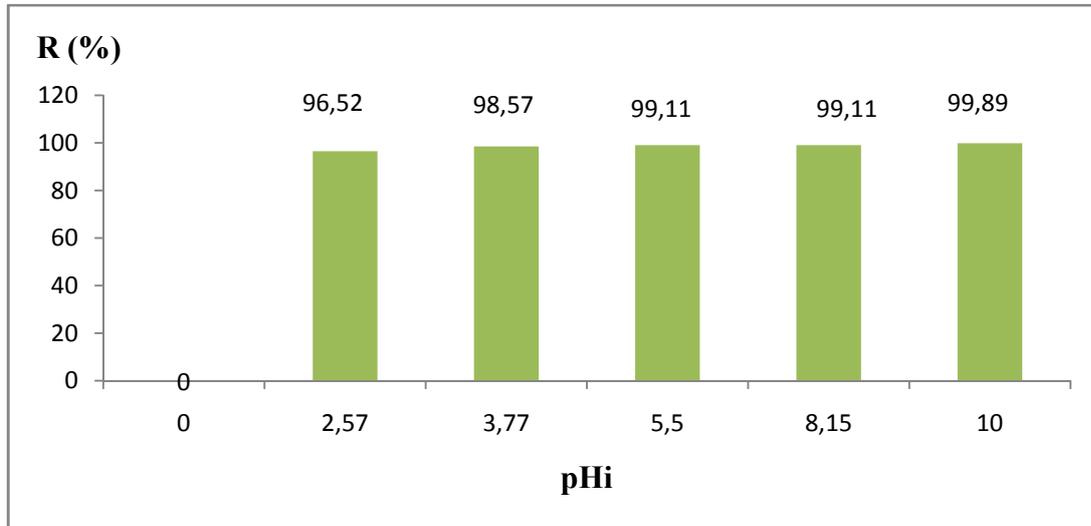


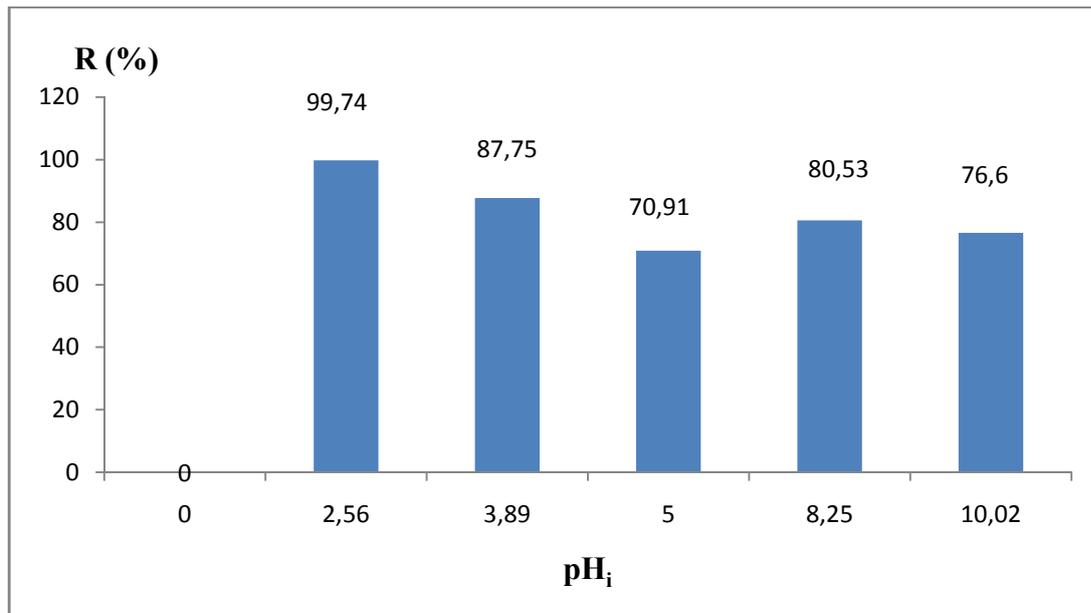
Figure IV.12. Evolution du pH_f de BD et BC pour : $U = 4 \text{ V}$, $pH_i = 2,5$, $C_{BD} = C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$.

Nous constatons que cette augmentation est d'autant plus importante que la densité de courant et plus élevée comme l'avaient observé [6].

IV.2.1.2. Evolution du rendement d'efficacité en fonction du pH initial



(a)



(b)

Figure IV.13. Evolution du rendement d'efficacité en fonction de pH_i. $C_{BD}=C_{BC}=40\text{mg/L}$, $U=12\text{V}$; $t=60\text{ min}$. (a) pour BD et (b) pour BC.

D'après la Figure IV.13, nous observons que le rendement d'élimination du BD est élevé pour n'importe quelle valeur de pH, donc pour les milieux acide ou basique nous avons une décoloration totale du colorant. Par contre, pour le BC le rendement d'élimination est élevé arrivant à 99,74% pour un pH_i très acide (2,5), pour les autres milieux nous remarquons une décoloration entre 87,75 et 70,91%.

IV.2. 2. Effet de la conductivité de la solution

L'un des principaux facteurs influençant l'EC est la conductivité de la solution à traiter. Pour étudier l'effet de la conductivité nous avons fait varier la concentration du chlorure de sodium comme support électrolytique le plus utilisé dans les procédés électrochimiques.

Observations :

- Lorsqu'on augmente la concentration du sel dans la solution, le dégagement des gaz devient plus fort surtout au niveau de la cathode (hydrogène).
- Élévation de la température de la solution traitée.
- La conductivité diminue en fonction du temps de traitement (consommation des ions).
- Avec l'augmentation de la concentration de NaCl, les boues formées deviennent plus denses et occupent presque tout le volume du réacteur.

Les résultats de l'examen de l'effet de la concentration de NaCl (0 à 2 g/L) sur l'efficacité d'élimination de la concentration de BD sont rassemblés au Tableau IV.1 et présentés à la Figure IV.14.

Tableau IV.1. Effet de la conductivité sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de différentes concentration de NaCl ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).

$C_{NaCl}(\text{g/L})$	0	0.4	0.8	1	1.5	2
$I_i \text{ (A)}$	0	0.14	0.24	0.47	0.43	0.60
$I_f \text{ (A)}$	0	0.16	0.28	0.50	0.55	0.73
pH_i	5	5.20	5.15	6	5.43	5.59
$T_i \text{ (}^\circ\text{C)}$	19.8	20	19.8	23.6	19.8	19.7
$Cd_i \text{ (}\mu\text{S/cm)}$	190	911	1680	2220	3200	4320
Abs_i	0.156	0.292	0.220	0.254	0.260	0.220
pH_f	6.08	8.37	8.55	9.21	8.95	9.38
$T_f \text{ (}^\circ\text{C)}$	21.4	21.4	22.2	20.3	23	20.9
$Cd_f \text{ (}\mu\text{S/cm)}$	310	849	1530	1817	2790	3800
Abs_f	0.099	0.032	0.020	0.006	0.022	0.040
R (%)	36.53	89.04	90.90	97.63	91.53	80

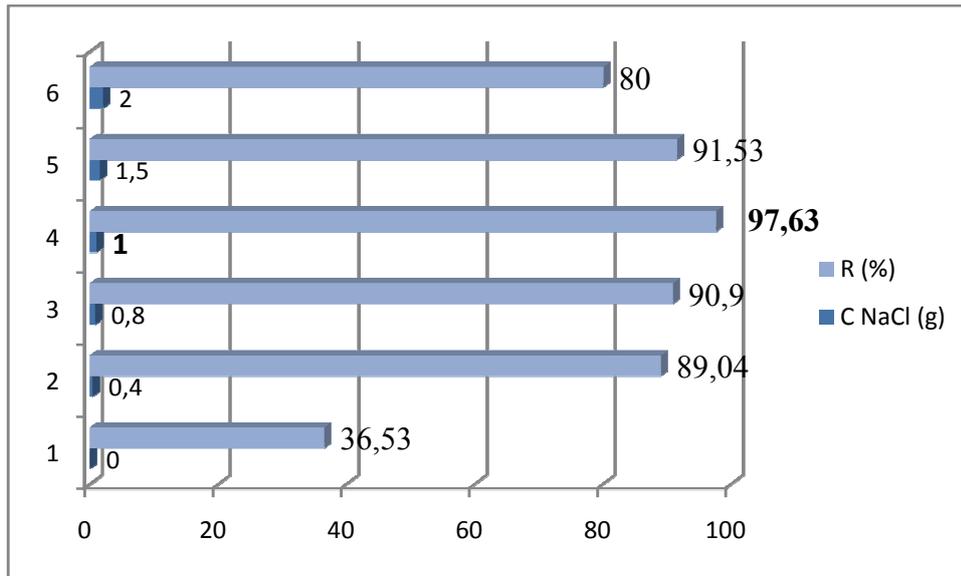


Figure IV.14. Effet de la conductivité sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de différentes concentration de NaCl ($C_{BD}= 10 \text{ mg/L}$; $U=12 \text{ V}$; $t=45 \text{ min}$).

Nous observons que quand la concentration de NaCl augmente de 0 à 1 g/L, l'efficacité d'élimination du BD (en matière d'absorbance) augmente de 36,53 à 97,63% pour un temps optimum de 45 min. En revanche au-delà de 1 g/L, nous observons que l'efficacité d'élimination diminue à 91,53 et 80% pour 1,5 et 2 g/L, respectivement. Cette diminution pourrait s'expliquer par :

- le fait que la présence dans le milieu d'ions Cl^- en excès réagissent avec les cations aluminium (Al^{3+}) produits à l'anode pour produire AlCl_3 selon la réaction (IV.10).



De ce fait, les ions aluminium produits, ne sont pas utilisés pour la coagulation/floculation de la matière organique, ce qui conduit à la diminution du rendement d'EC [17].

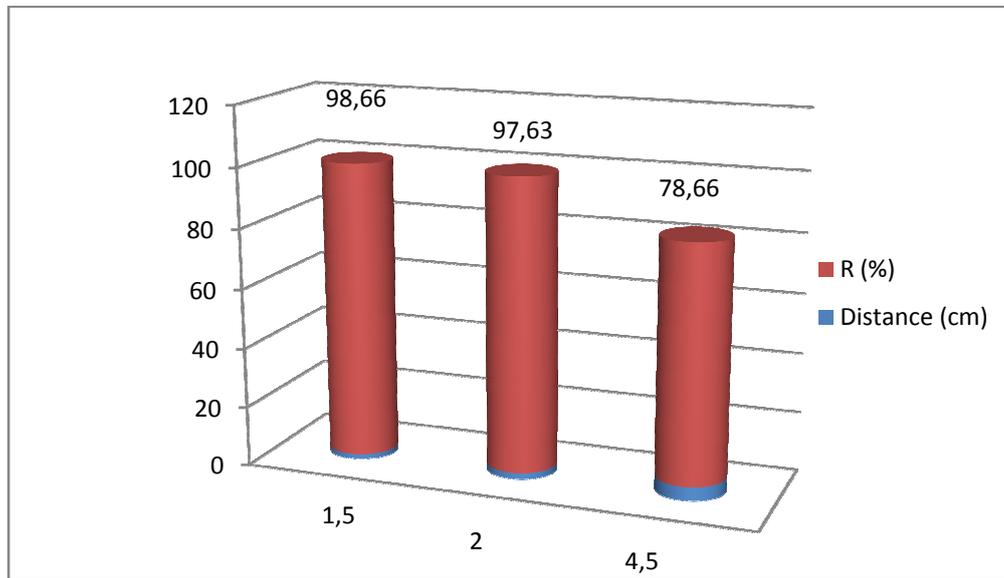
- En plus, une concentration excessive de NaCl dans l'eau polluée à traiter induit une consommation importante des électrodes d'aluminium par corrosion. Il en résulte donc une attaque sur la plaque d'aluminium de l'anode, par conséquent une diminution de l'efficacité du traitement [6].

IV.2.3. Effet de la distance inter-électrodes

La distance inter-électrodes varie de 1,5 à 4,5 cm pour BD. Les résultats obtenus sont représentés au Tableau IV.2.

Tableau IV.2. Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10$ mg/L; $C_{NaCl} = 1$ g/L; $U = 12$ V; $t = 45$ min).

Distance (cm)	1.5	2	4.5
I_i (A)	0.34	0.47	0.17
I_f (A)	0.42	0.50	0.21
pH _i	5.51	6	5.51
T_i (°C)	21.3	23.6	21.3
Cd_i (μS/cm)	2110	2220	2110
Abs_i	0.225	0.254	0.225
pH _f	9.01	9.21	8.88
T_f (°C)	22.8	20.3	22.5
Cd_f (μS/cm)	1990	1817	1920
Abs_f	0.003	0.006	0.048
R (%)	98.66	97.63	78.66

Figure IV.15. Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10$ mg/L; $C_{NaCl} = 1$ g/L; $U = 12$ V; $t = 45$ min).

D'après la Figure IV.15, le meilleur rendement $\sim 99\%$ est atteint à une distance $d = 1,5$ cm. Donc, quand la distance inter-électrodes diminue, l'efficacité d'élimination du colorant augmente. Daneshvar [14] a montré qu'avec l'augmentation de la distance inter-électrodes, il y aurait peu d'interactions possibles des ions et formation faible des polymères hydroxydes [14]. Plus les électrodes sont proches, plus le champ électrique E ($E = U/d$) devient important et plus l'intensité du courant I augmente par conséquent la densité de courant i augmente également ce qui favorise la rencontre entre les particules de charges opposées (neutralisation de charge) et la collision des bulles de gaz (H_2 , O_2 et Cl_2) avec les floes formés [12].

IV.2. 3. Effet de la concentration initiale

Pour évaluer l'effet de la concentration initiale du colorant sur l'efficacité de traitement d'EC, nous avons varié la concentration de BD de 10 à 100 mg/L en gardant les autres paramètres constants. Les résultats obtenus sont rassemblés au Tableau IV.3 et représentés dans la Figure IV.16.

Nous observons qu'avec l'augmentation de la concentration du colorant, la réduction de ce dernier diminue. En effet, pour les mêmes conditions opératoires imposées aux essais effectués pour les différentes concentrations allant de 10 à 100 mg/L, il semble que la quantité croissante du colorant n'arrive pas à être déstabilisée (coagulée) et floculée par la même quantité du métal (Al^{3+}). D'autre part, rappelons que les conditions opératoires imposées dans ces expériences sont optimales pour la concentration 10 mg/L. Par conséquent, pour 40, 60, 80 et 100 mg/L, il faudrait optimiser une nouvelle fois les conditions opératoires.

Tableau IV.3. Influence de la concentration initiale du BD sur l'efficacité du traitement d'EC.

C_{BD} (mg/L)	10	40	60	80	100
I_i (A)	0.47	0.27	0.35	0.26	0.36
I_f (A)	0.50	0.32	0.42	0.30	0.42
pH _i	6	6.32	5.95	6.03	6.08
T_i (°C)	23.2	21.3	19.6	19.6	21.5
Cd_i (μS/cm)	2220	2160	2130	2140	2200
Abs_i	0.254	0.981	1.359	1.850	2.380
pH _f	9.21	8.80	8.84	8.90	8.89
T_f (°C)	20.3	22.8	22.1	21.9	23.1
Cd_f (μS/cm)	1817	1870	1980	1847	1931
Abs_f	0.006	0.036	0.063	0.127	0.166
R (%)	97.63	96.33	95.63	93.13	93.02

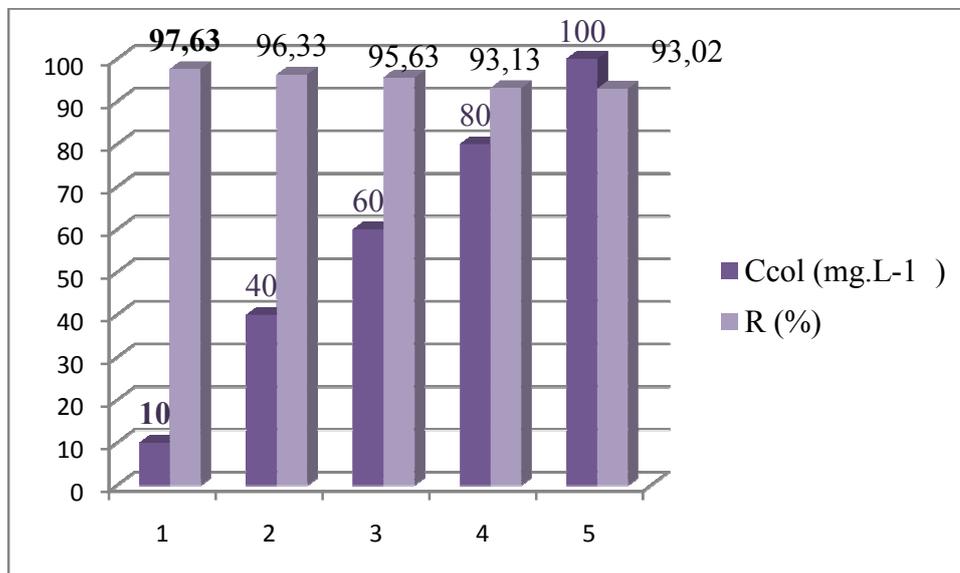


Figure IV.16. Influence de la concentration initiale du BD sur l'efficacité du traitement.

IV.2.4. Effet de l'agitation

L'un des principaux facteurs qui influencent le traitement d'EC est l'agitation de la solution (ou la suspension) au cours du procédé. L'agitation peut être bénéfique pour augmenter le contact entre le coagulant (Al^{3+}) et le polluant (le colorant BD) comme elle ne peut l'être si elle est trop forte où le cassage des floccs dépassera leur formation. Pour cela des essais d'EC avec et sans agitation ont été effectués. Les photos suivantes montrent les béchers après EC et lors de la décantation des solutions du BD électrocoagulées avec agitation faible, moyenne, et forte :

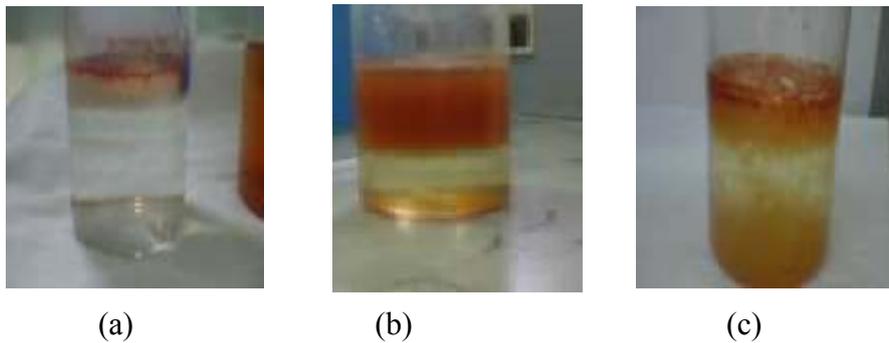


Figure IV.17. Photos des solutions traitées du BD en fonction de l'agitation :

(a) agitation faible, (b) agitation moyenne, (c) agitation forte.

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau IV.4.

Tableau IV.4. Effet de l'agitation sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10$ mg/L ; $C_{NaCl} = 1$ g/L ; $d = 2$ cm ; $U = 12$ V ; $t = 45$ min).

Agitation	Sans	Faible	Moyenne	Forte
I_i (A)	0.29	0.47	0.34	0.40
I_f (A)	0.33	0.50	0.40	0.50
pH _i	6	6	5.73	5.73
T_i (°C)	21.5	23.6	20.5	20.5
Cd_i (μS/cm)	2200	2220	2250	2250
Abs_i	0.222	0.254	0.250	0.251
pH _f	9.06	9.21	8.82	8.31
T_f (°C)	21.5	20.3	22.5	26.9
Cd_f (μS/cm)	1930	1817	1800	2230
Abs_f	0.017	0.006	0.005	0.009
R (%)	92.34	97.63	98	96.4

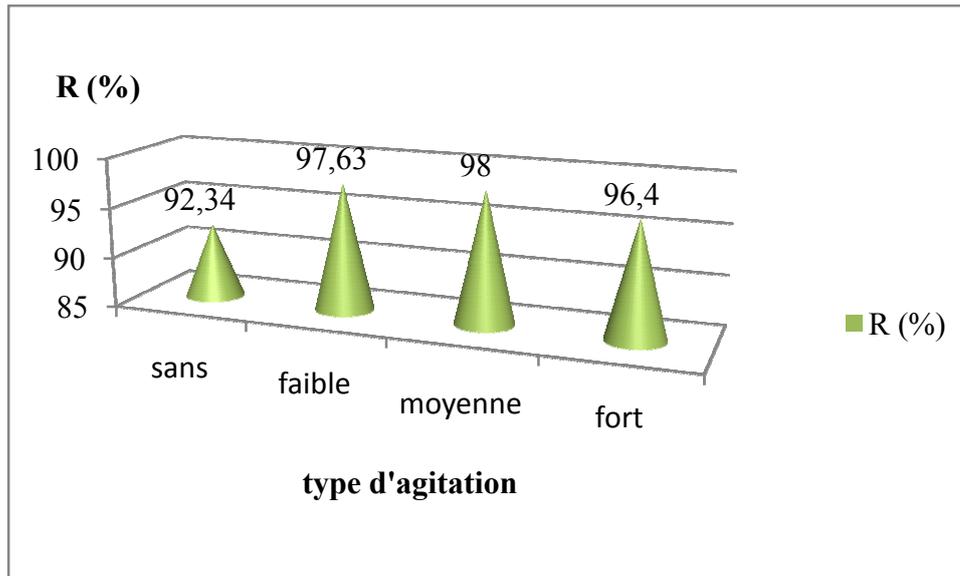


Figure IV.18. Effet de l'agitation sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $d = 2 \text{ cm}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).

D'après la Figure IV.18, il apparaît que la présence du gradient de vitesse optimal (ni faible ni fort, donc moyen) permet la création d'un courant de convection pour homogénéiser la solution et permettre le contact entre le coagulant et le colorant. Le rendement d'élimination augmente de 92,34% sans agitation à 98% avec agitation moyenne, et diminue à 96,4% pour une forte agitation.

D'autre part, le champ électrique intervient dans la répartition des charges électriques autour des colloïdes dans l'eau et l'agitation forte fait une perturbation de l'action du champ électrique.

Remarque :

La vitesse d'agitation « faible » est autour de 100 trs/min (nous avons comparé l'agitation créée par notre agitateur qui ne porte pas de graduations chiffrées de vitesse avec un agitateur d'un autre Laboratoire portant des graduations chiffrées).

IV.2. 5. Effet de la nature des électrodes

Le taux de réduction du colorant dépend aussi de la nature des électrodes utilisées. Pour cela, nous avons réalisé cette expérience supplémentaire avec des électrodes en fer pour comparer avec des électrodes en aluminium qui sont utilisées jusqu'à présent.

Nous constatons une diminution de l'absorbance au cours du traitement avec les deux électrodes d'Al et Fe. Cependant, l'aluminium permet d'avoir un meilleur abattement de l'absorbance comparativement au fer.



Electrodes en Fe Electrodes en Al

Pour les électrodes en fer, l'apparition de floes verts ($\text{Fe(OH)}_{2(s)}$) suivis des floes rouges-marrons ($\text{Fe(OH)}_{3(s)}$) dans la solution avec production d'hydrogène à la cathode. Nous proposons ici deux mécanismes qui expliquent la formation de $\text{Fe(OH)}_{2(s)}$ et $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$:

Mécanisme 1 (coloration verte)



Mécanisme 2 (coloration marron)



Tableau IV .5. Effet de la nature des électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).

Nature d'électrode	Fe	Al
I_i (A)	0.61	0.47
I_f (A)	0.80	0.50
pH _i	6	6
T_i (°C)	23.6	23.2
Cd_i ($\mu\text{S/cm}$)	2240	2220
Abs_i	0.226	0.251
pH _f	9.99	9.21
T_f (°C)	25.7	20.3
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1005	1817
Abs_f	0.043	0.006
R (%)	80.97	97.63

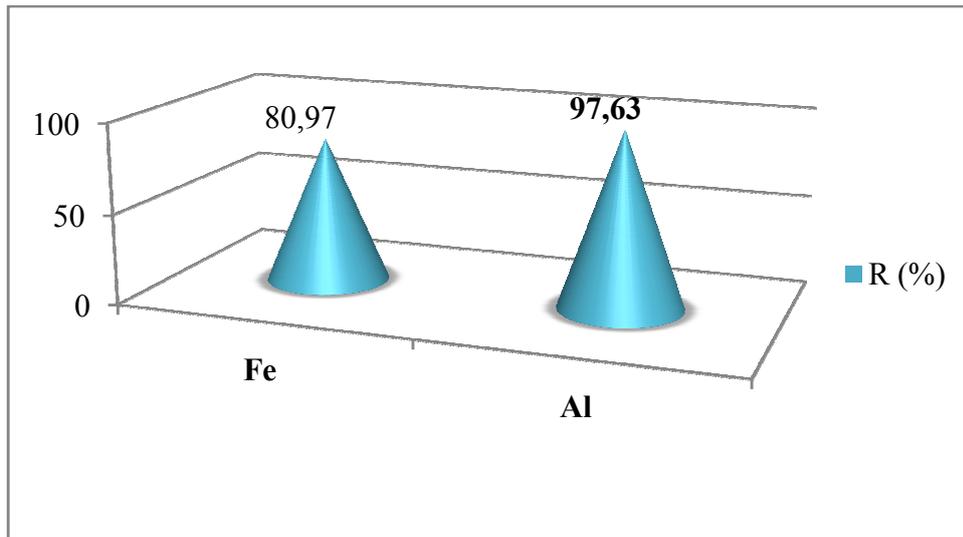


Figure IV.19. Effet de la nature des électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).

IV.2. 6. Effet de la nature des solutions utilisées

Pour mieux montrer l'efficacité de l'EC sur l'élimination de BD, nous avons appliqué ce procédé sur différents types d'eau : eau distillée, eau déminéralisée et eau de robinet. En utilisant deux types d'électrodes : électrodes en Al et électrodes en Fe. Les résultats obtenus sont regroupés dans les Tableaux IV. 6 et 7.

Tableau IV.6. Effet de la nature de l'eau utilisée sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Al et avec agitation faible ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).

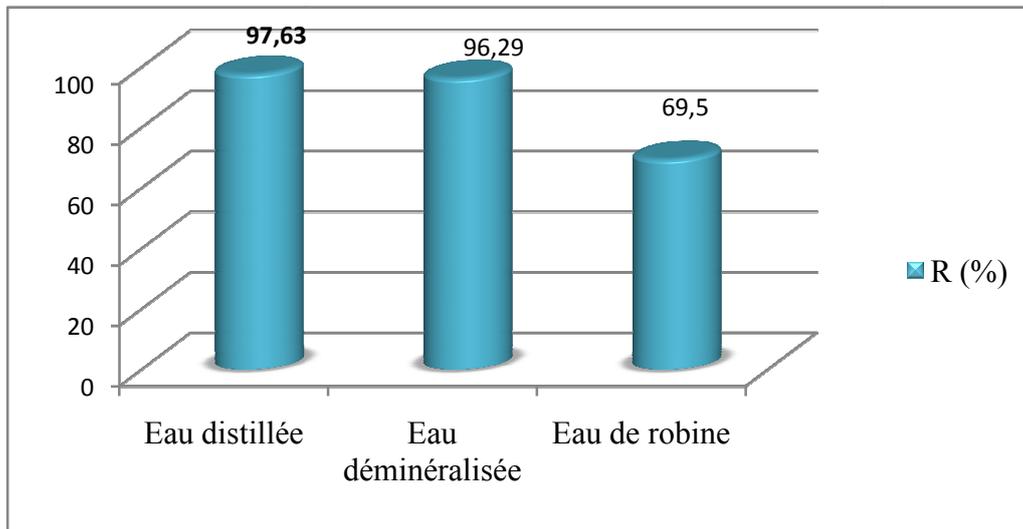
Nature de l'eau	Eau distillée	Eau déminéralisée	Eau de robinet
I_i (A)	0.47	0.11	0.14
I_f (A)	0.50	0.19	0.10
pH_i	6	7.41	7.52
T_i (°C)	23.2	21.5	23.8
Cd_i ($\mu\text{S/cm}$)	2220	1030	959
Abs_i	0.251	0.108	0.233
pH_f	9.21	8	7.50
T_f (°C)	20.3	25.4	25.3
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1817	814	683
Abs_f	0.006	0.004	0.070
R (%)	97.63	96.29	69.50

Tableau IV .7. Effet de la nature de l'eau utilisée sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Fe et avec agitation faible ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g.L}^{-1}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).

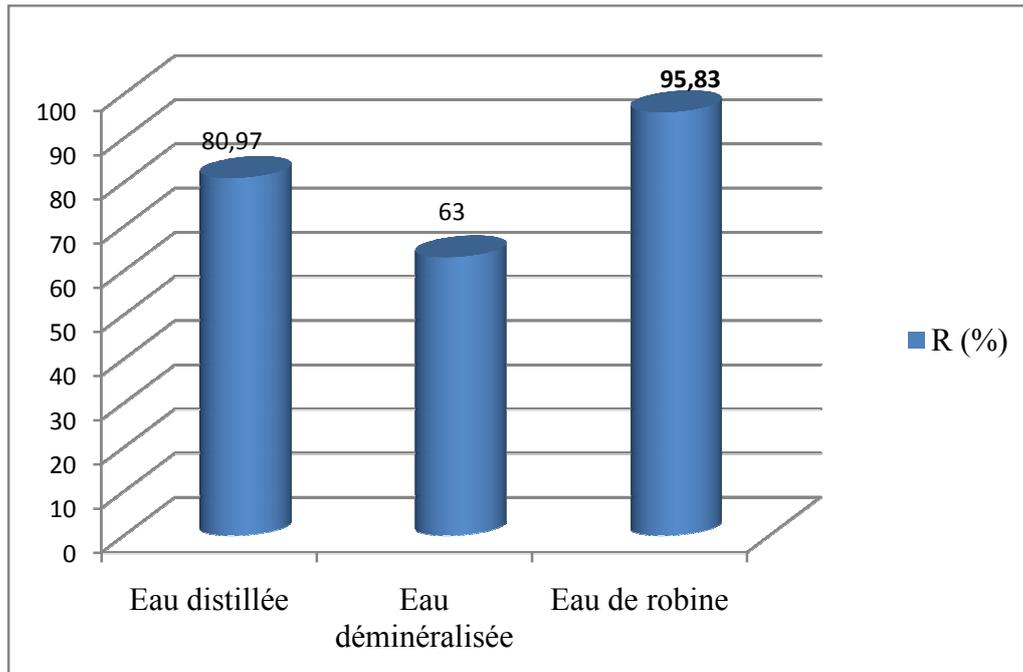
Nature de l'eau	Eau distillée	Eau déminéralisée	Eau de robinet
I_i (A)	0.61	0.50	0.28
I_f (A)	0.80	0.40	0.20
pH _i	6	7.93	7.83
T_i (°C)	23.6	19	23.9
Cd_i (μS/cm)	2240	1017	956
Abs_i	0.226	0.394	0.192
pH _f	9.99	9.30	8.40
T_f (°C)	25.7	19.7	24.9
Cd_f (μS/cm)	1005	849	408
Abs_f	0.043	0.143	0.008
R (%)	80.97	63.70	95.83

D'après la Figure IV.20, nous remarquons que :

- les électrodes en Al sont plus efficaces pour les solutions préparées à base d'eau distillée et eau déminéralisée, par contre,
- les électrodes en fer sont plus efficaces pour le traitement des solutions préparées à base d'eau de robinet



(a)



(b)

Figure IV.20. Effet de la nature de l'eau utilisée sur l'efficacité d'EC du BD avec agitation faible ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$). (a) avec électrodes en Al ; (b) avec électrodes en Fe.

IV.2.7. Effet de la tension appliquée de système et durée de traitement

Comme nous l'avons vu précédemment, la tension appliquée U (V) est fonction de l'intensité du courant I (A) ainsi que du matériau d'électrode (Al ou Fe) et de l'effluent (colorant préparé à base d'eau distillée). Pour un effluent dont la conductivité est élevée (autre que l'eau distillée), pour une intensité donnée la tension est faible s'il n'y a pas de dépôts sur la surface des électrodes qui empêcheraient le passage du courant électrique. Les densités les plus élevées évoluent sur des lignes de tensions plus hautes. La formule de la tension de cellule peut se simplifier en :

$$U = R \times I \quad (\text{IV.15})$$

Où :

R : est la résistance de la cellule qui inversement proportionnelle de la conductivité de l'effluent.

I : est l'intensité du courant (A).

La formule de la densité de courant i est :

$$i = \frac{I}{S} \quad (\text{IV.16})$$

S : surface active (m^2).

Alors :

$$i = \frac{U}{RS} \quad (\text{IV.17})$$

Nous pouvons, donc, comprendre pourquoi les densités de courant les plus élevées correspondent à des tensions de cellule plus importantes étant donné que l'intensité augmente et l'effluent reste le même donc sa résistance en plus ne varie pas [11].

- Pour étudier l'effet du voltage et du temps sur l'efficacité de traitement, nous avons préparé 3 solutions :
 - Première solution : 10 mg/L de BD + 1 g de NaCl + 500 mL d'eau distillée.
 - Deuxième solution : 40 mg/L de BD + 1 g de NaCl + 500 mL d'eau distillée.
 - Troisième solution : 40 mg/L de BC + 1 g de NaCl + 500 mL d'eau distillée.

Pour chaque solution nous avons ajusté le pH pour les milieux acides et basiques. La durée du traitement varie de 5 à 60 min pour chaque pH et voltage. Les valeurs initiales et finales de l'intensité de courant I , correspondantes à chaque voltage appliqué, sont mesurées. Les résultats obtenus pour chaque expérience sont regroupés dans l'Annexe.

Nous avons observé un certain nombre de phénomènes :

- 1) $E = 4 \text{ V}$
 - Dégagement d'hydrogène et de chlore au niveau de la cathode et l'oxygène au niveau de l'anode.
 - Pour BC : Formation des floccs bleus qui flottent à la surface du réacteur (bêcher) après décantation pour former une couche moussante bleue-blanche.
 - Pour BD: Formation des floccs marrons qui flottent à la surface du réacteur après décantation pour former une couche moussante marron-blanche.
- 2) $E = 8 \text{ V}$
 - La vitesse de dégagement au niveau de la cathode augmente.

- Formation d'une mousse blanche sous la surface et bleue foncée au-dessus de la solution pour BC et marron foncée pour BD.
- La couleur des deux solutions devient moins intense et plus claire.

$E = 12 \text{ V}$

- La solution devient limpide avec formation continue de bulles d'hydrogène.
- Après décantation, les deux solutions deviennent totales incolores.



4 V



8 V



12 V

Les résultats de nos essais effectués où nous avons trouvé de meilleurs rendements pour les trois solutions sont regroupés dans les Tableaux IV.8-10 et représentés dans les Figures IV.21-23.

- Brun direct 2 à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$



Avant traitement



Après traitement

Tableau IV.8. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$ pour $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{6}$ (sans ajustement) ; $T_i = 23,6^\circ\text{C}$; $Cd = 2220 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0,254$).

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.45	0.44	0.51	0.47	0.51
I_f (A)	0.48	0.47	0.56	0.50	0.56
pH_f	7.90	8.95	9.03	9.21	9.26
T_f ($^\circ\text{C}$)	24.8	20.7	20.3	20.3	21.8
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1950	1894	1835	1817	1882
Abs_f	0.047	0.027	0.014	0.006	0.008
R (%)	80.57	89.37	94.48	97.63	96.85
i (A/m^2)	125	122.22	141.66	130.55	141.66

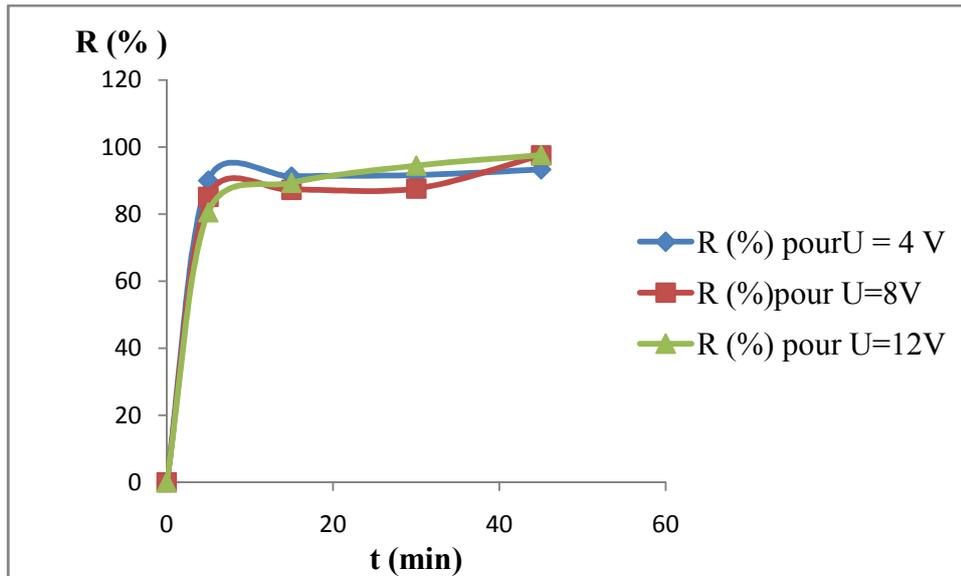


Figure IV.21. Effet du voltage sur l'efficacité du traitement de BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$ en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH}_i \approx 6$.

▪ Brun direct 2 à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$



Avant traitement



Après traitement

Tableau IV.9. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$ pour $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 10$; $T_i = 27,7^\circ\text{C}$; $Cd = 2540 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0,990$).

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.48	0.74	0.94	0.65	0.69
I_f (A)	0.49	0.78	1.13	0.77	1.20
pH_f	8.34	8.51	8.83	8.90	9.16
T_f ($^\circ\text{C}$)	27.9	29	29.9	29.7	30.1
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2210	2170	2110	2090	2070
Abs_f	0.213	0.087	0.014	0.013	0.001
R (%)	78.52	91.22	98.58	98.68	99.89
i (A/m^2)	133.33	205.55	261.11	180.55	191.66

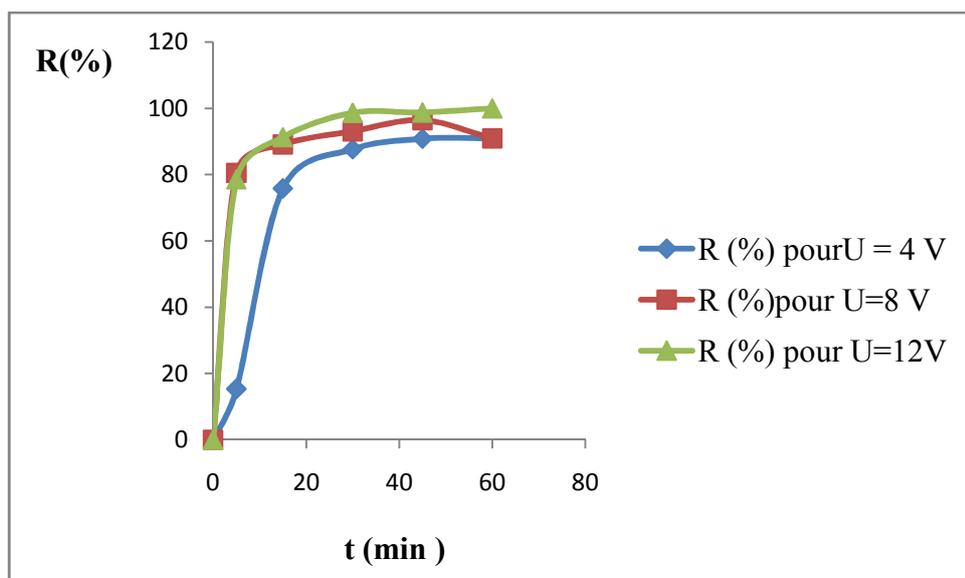


Figure IV.22. Effet du voltage sur l'efficacité de traitement de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH} \approx 10$.

- Bleu cibacette BF à $C_{BC} = 40$ mg/L



Avant et après traitement

- Tableau IV.10. EC pour BC à $C_{BC} = 40$ mg/L pour $U = 12$ V ($\text{pH}_i = 2.56$; $T_i = 28.5^\circ\text{C}$; $Cd = 2740$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0,397$).

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.60	0.60	0.53	0.55	0.71
I_f (A)	0.56	0.59	0.54	0.68	2.83
pH_f	4.42	4.53	4.71	6.67	7.77
T_f ($^\circ\text{C}$)	29.2	29.6	30.2	29.4	33.7
Cd_f ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2190	2136	2090	2050	2040
Abs_f	0.367	0.187	0.133	0.104	0.001
R (%)	07.55	52.89	66.49	73.80	99.74
i (A/m^2)	166.66	166.66	147.22	152.77	197.22

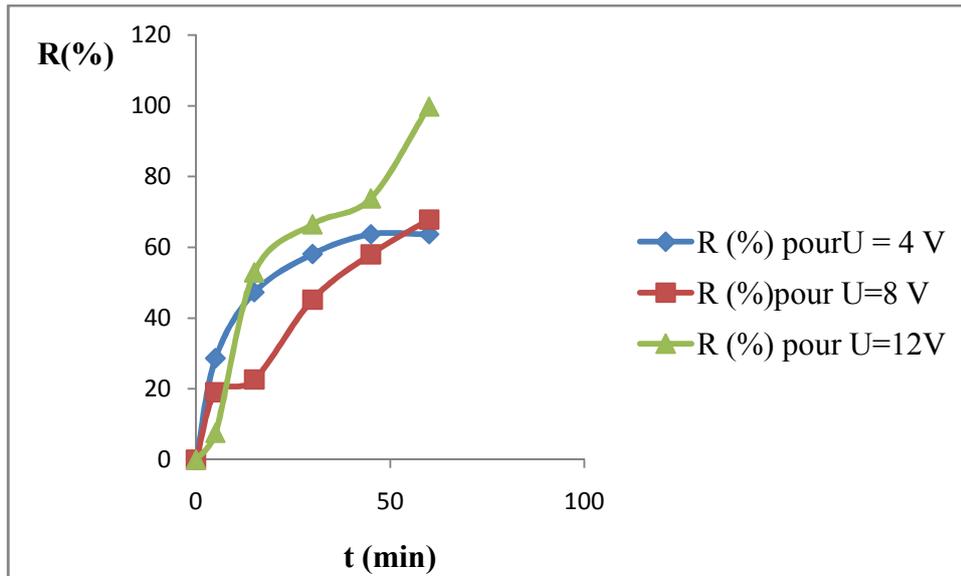


Figure IV.23. Effet du voltage sur l'efficacité de traitement du BC à $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 2.5$.

D'une manière générale, d'après les Figures IV.18-20, nous remarquons que :

- Pendant le traitement d'EC, l'intensité du courant I augmente du fait que le polluant commence à disparaître ce qui permet d'accroître le pouvoir de dégradation des composés organiques.
- Le traitement est plus efficace lorsque la densité de courant est plus élevée [11].
- Plus le voltage (densité de courant) est élevé, plus l'élimination du colorant est rapide et importante [11].
- Le meilleur rendement est atteint à $U = 12$ V.
- Les résultats obtenus montrent que la réduction des deux colorants augmente avec la durée du traitement jusqu'à 45 min pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L (97,63%) et jusqu'à 60 min pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L (99,89%) et (99,74%) pour BC à $C_{BD} = 40$ mg/L.

IV.2.7. Rapport r

Durant le dimensionnement d'électrocagulateur, il est utile d'introduire un nouveau paramètre à prendre en considération en même temps que la distance d entre les électrodes [12]. Il s'agit du rapport r : volume actif sur volume du réacteur plein d'eau à traiter.

$$r = \text{volume actif} / \text{volume du réacteur plein d'eau} = (d \times \text{surface active}) / \text{volume du réacteur}.$$

$r = (d \times \text{surface active})/\text{volume du réacteur plein d'eau}$.

Donc :

$$r = d \times 36 / (0,5 \times 1000) = 0,072 \times d \quad (\text{IV.18})$$

Pour :

- $d = 1,5 \text{ cm}, r = 0,108$.
- $d = 2 \text{ cm}, r = 0,144$.
- $d = 4,5 \text{ cm}, r = 0,324$.

r optimale est de 0.108.

IV.3. Vérification de la loi de Faraday

Nous pouvons évaluer la masse d'aluminium libérée par l'anode en appliquant la loi de Faraday [19] :

$$m = (I \times t \times M) / (n \times F) \quad (\text{IV.19})$$

Avec : $n = 3$, $F = 96500 \text{ C/mol}$, $M = 26,9815 \text{ g/mol}$.

Par exemple : - Pour BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$), $R = 97.63\%$, $t = 45 \text{ min} = 2700 \text{ s}$, $I = 0,47 \text{ A}$:

$$m = 0,118 \text{ g.}$$

- Pour BD ($C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$), $R = 99.89\%$, $t = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$, $I = 0,69 \text{ A}$:

$$m = 0,231 \text{ g}$$

- Pour BC ($C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$), $R = 99.74\%$, $t = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$, $I = 0,71 \text{ A}$:

$$m = 0,238 \text{ g}$$

Les rendements maximaux sont obtenus avec des concentrations de coagulant égales à **0.118 g** pour BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$), **0.231 g** pour BD ($C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$) et **0.238 g** pour BC ($C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$). Ces masses du coagulant sont nécessaires pour dimensionner les réacteurs d'EC en mode continu à l'échelle de laboratoire ou industrielle.

IV.4. Consommation électrique

La consommation électrique CE dans les tests d'EC a été étudiée. Le voltage U (V), l'ampérage I (A) et le temps d'EC t (en heures) sont enregistrés. Le volume actif V_a est maintenu constant (volume rempli de solution du bécher) : $V_a = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

L'énergie électrique consommée par m³ d'eau traitée est calculée [12] par la relation :

$$CE = (U \times I \times t) / (V_a) \quad (IV.20)$$

D'après les conditions optimales :

- Pour BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$), $R = 97,63\%$, $t = 45 \text{ min} = 0,75 \text{ h}$, $I = 0,47 \text{ A}$, $U = 12 \text{ V}$:

$$CE = 8,46 \text{ kWh/m}^3.$$

- pour BD ($C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$), $R = 99,89\%$, $t = 60 \text{ min} = 1 \text{ h}$, $I = 0,69 \text{ A}$, $U = 12 \text{ V}$

$$CE = 16,56 \text{ kWh/m}^3$$

- pour BC ($C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$), $R = 99,74\%$, $t = 60 \text{ min} = 1 \text{ h}$, $I = 0,71 \text{ A}$, $U = 12 \text{ V}$

$$CE = 17,28 \text{ kWh/m}^3$$

Les rendements maximaux soient obtenus avec une consommation électrique de $8,460 \text{ kWh/m}^3$ pour BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$), $16,560 \text{ kWh/m}^3$ pour BD ($C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$) Et $17,280 \text{ kWh/m}^3$ pour BC ($C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1. Effet de la conductivité sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de différentes concentration de NaCl ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).....	31
Tableau IV.2. Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).....	33
Tableau IV.3. Influence de la concentration initiale du BD sur l'efficacité du traitement d'EC.....	34
Tableau IV.4. Effet de l'agitation sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $d = 2 \text{ cm}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).....	35
Tableau IV .5. Effet de la nature des électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).....	37
Tableau IV.6. Effet de la nature de l'eau utilisée sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Al et avec agitation faible ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).....	38
Tableau IV .7. Effet de la nature de l'eau utilisée sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Fe et avec agitation faible ($C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$; $C_{NaCl} = 1 \text{ g.L}^{-1}$; $U = 12 \text{ V}$; $t = 45 \text{ min}$).....	39
Tableau IV.8.EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$ pour $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{6}$ (sans ajustement); $T_i = 23,6^\circ\text{C}$; $C_d = 2220 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $\text{Abs}_i = 0,254$).....	42
Tableau IV.9.EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$ pour $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 27,7^\circ\text{C}$; $C_d = 2540 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $\text{Abs}_i = 0,990$).....	43
Tableau IV.10. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$ pour $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{2.56}$; $T_i = 28.5^\circ\text{C}$; $C_d = 2740 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $\text{Abs}_i = 0,397$).....	44
Tableau A.1. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g/L ($\text{pH} = 6$).	

Tableau A.2. Variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour des différentes solutions du BD (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).

Tableau A.3. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g/L à différentes valeurs de pH.

Tableau A.4. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour la solution du BD à 10 mg/L.

Tableau A.5.1. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = \underline{5.93}$ (sans ajustement) ; $T_i = 21.6$ °C ; $Cd = 2060$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.24$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.2. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = \underline{6}$ (sans ajustement) ; $T_i = 23.6$ °C ; $Cd = 2130$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.243$, $C_{NaCl} = 1$ g/L).

Tableau A.5.3. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = \underline{6}$ (sans ajustement) ; $T_i = 23.6$ °C ; $Cd = 2220$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.254$, $C_{NaCl} = 1$ g/L).

Tableau A.5.4. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = \underline{4.03}$; $T_i = 21.2$ °C ; $Cd = 2060$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.250$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.5. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = \underline{3.85}$; $T_i = 23.9$ °C ; $Cd = 2220$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.190$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.6. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = 4.06$; $T_i = 23.7$ °C ; $Cd = 2220$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.141$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.7. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = \underline{7.95}$; $T_i = 23.1$ °C ; $Cd = 2280$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.251$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.8. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = \underline{8.09}$; $T_i = 24.1$ °C ; $Cd = 2250$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.240$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.9. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = \underline{8.07}$; $T_i = 21.6$ °C ; $Cd = 2170$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.259$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.5.10. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{9.98}$; $T_i = 19.6 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2150 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.264$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.5.11. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 22.4 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2130 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.269$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.5.12. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10.04}$; $T_i = 22.4 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2190 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.263$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6.1. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{2.51}$; $T_i = 28.2 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2590 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.824$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 2. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{2.56}$; $T_i = 28.4 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2600 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.867$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 3. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{2.57}$; $T_i = 28.7 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2620 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.920$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 4. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{5.06}$ (sans ajustement); $T_i = 29 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2230 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.089$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 5. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{5.06}$ (sans ajustement); $T_i = 29 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2230 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.064$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 6. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{5.50}$ (sans ajustement); $T_i = 28.4 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2300 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.013$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 7. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{3.83}$; $T_i = 28.8 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2320 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.983$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 8. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{3.77}$; $T_i = 27.9 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2320 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.914$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6. 9. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{3.77}$; $T_i = 27.9 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2320 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.914$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6.10. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 27.3 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2450 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.035$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau A.6.11. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 2470$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.996$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.6.12. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 27.7^\circ\text{C}$; $Cd = 2540$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.990$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.6.13. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = \underline{8.35}$; $T_i = 27.8^\circ\text{C}$; $Cd = 2380$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.974$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.6.14. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = \underline{8.15}$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 2260$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 1.014$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau A.6.15. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = \underline{8.15}$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 22690$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 1.012$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau B.1. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (630 nm) du BC en présence de NaCl à 1 g/L ($\text{pH} = 5.02$).

Tableau B.2. Variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour des différentes solutions du bleu cibacette BF (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).

Tableau B.3. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (630 nm) du BC en présence de NaCl à 1 g/L à différentes valeurs de pH.

Tableau B.4. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour la solution du BC à 40 mg/L.

Tableau B.5.1. EC pour BC à $C_{BC} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = \underline{2.58}$; $T_i = 28.6^\circ\text{C}$; $Cd = 2660$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.360$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau B.5. 2. EC pour BC à $C_{BC} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = \underline{2.56}$; $T_i = 28.6^\circ\text{C}$; $Cd = 2630$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.367$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau B.5. 3. EC pour BC à $C_{BC} = 40$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = \underline{2.56}$; $T_i = 28.5^\circ\text{C}$; $Cd = 2740$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.397$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

Tableau B.5. 4. EC pour BC à $C_{BC} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = \underline{5.02}$ (sans ajustement); $T_i = 21^\circ\text{C}$; $Cd = 2060$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, $Abs_i = 0.405$, $C_{NaCl} = 1$ g/L).

Tableau B.5. 5. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{5.02}$ (sans ajustement) ; $T_i = 21^\circ\text{C}$; $Cd = 2060 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.405$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$).

Tableau B.5. 6. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{5}$ (sans ajustement) ; $T_i = 24.4^\circ\text{C}$; $Cd = 2160 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.392$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B.5.7. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{3.83}$; $T_i = 23.7^\circ\text{C}$; $Cd = 2190 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.394$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B.5.8. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{3.85}$; $T_i = 22.5^\circ\text{C}$; $Cd = 2150 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.400$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$).

Tableau B.5. 9. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{3.89}$; $T_i = 23^\circ\text{C}$; $Cd = 2180 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.400$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B.5.10. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{8}$; $T_i = 26.7^\circ\text{C}$; $Cd = 2280 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.409$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$).

Tableau B.5.11. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{8.06}$; $T_i = 26.3^\circ\text{C}$; $Cd = 2220 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.443$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B.5.12. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{8.25}$; $T_i = 28.2^\circ\text{C}$; $Cd = 2210 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.452$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B.5.13. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 24.6^\circ\text{C}$; $Cd = 2360 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.441$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B.5.14. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10}$; $T_i = 24.7^\circ\text{C}$; $Cd = 2330 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.434$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

Tableau B. 5.15. EC pour BC à $C_{BC} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = \underline{10.02}$; $T_i = 25.7^\circ\text{C}$; $Cd = 2410 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.406$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

LISTE DES ABREVIATIONS

Abs	Absorbance.
BC	Bleu cibacette BF.
BD	Brun direct 2.
CC	Coagulation chimique.
Cd	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
C_{BC}	Concentration de bleu cibacette BF (mg/L).
C_{BD}	Concentration de brun direct 2 (mg/L).
C_{NaCl}	Concentration de chlorure de sodium.
d	Distance inter électrodes (cm).
EC	Electrocoagulation.
H	Hauteur immergée (cm).
I	Intensité de courant (A).
l	Largeur d'électrode (cm).
L	Longueur d'électrode (cm).
MES	Matière en suspension
$R(\%)$	Rendement d'élimination de colorant.
R^2	Coefficient de corrélation.
T	Température ($^{\circ}\text{C}$).
U	Voltage en (V).
t	Temps d'électrocoagulation (min).
λ_{max}	Longueur d'onde au maximum d'absorption des deux colorants.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Conséquences de la bioaccumulation après déversement des colorants dans un cours d'eau [8].....	7
Figure I.2. Formule développée de BD.....	7
Figure I.3. Formule développée de BC.....	8
Figure II.1. Schéma du principe de l'EC.....	11
Figure III.1. Schéma explicatif de l'unité d'EC en batch.....	17
Figure IV.1. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g L ⁻¹ (pH = 6).....	19
Figure IV.2. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (630 nm) du BC en présence de NaCl à 1 g L ⁻¹ (pH = 5.02).....	20
Figure IV. 3. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g L ⁻¹ pour différentes valeurs de pH	21
Figure IV.4. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (630 nm) du BC en présence de NaCl à 1 g L ⁻¹ a différentes pH.....	21
Figure IV.5. Variation de l'intensité de courant <i>I</i> en fonction de la tension appliquée <i>U</i> pour des différentes solutions du BD (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).....	23
Figure IV.6. Variation de l'intensité de courant <i>I</i> en fonction de la tension appliquée <i>U</i> pour des différentes solutions du BC (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).....	23
Figure IV.7. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant <i>I</i> en fonction de la tension appliquée <i>U</i> pour la solution du BD à 10 mg L ⁻¹	24
Figure IV .8. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant <i>I</i> en fonction de la tension appliquée <i>U</i> pour la solution du BC à 40 mg/L.....	25

Figure IV.9. Photos de l'écume formé pendant le traitement d'EC. (a) pour BD et (b) pour BC.....	26
Figure IV.10. Evolution du pH au cours du traitement d'EC. $C_{BD} = 40$ mg/L, $C_{BC} = 40$ mg/L, $d = 2$ cm, $U = 4$ V, $C_{NaCl} = 1$ g/L. (a) pour BD et (b) pour BC.....	27
Figure IV.11: Diagrammes de prédominance des espèces d'aluminium et effet du pH [6]....	29
Figure IV.12. Evolution du pH_f de BD et BC pour : $U = 4$ V, $pH_i = 2,5$, $C_{BD} = C_{BC} = 40$ mg/L.....	29
Figure IV.13. Evolution du rendement d'efficacité en fonction de pH_i . $C_{BD}=C_{BC} = 40$ mg/L, $U = 12V$; $t = 60$ min. (a) pour BD et (b) pour BC.....	30
Figure IV.14. Effet de la conductivité sur l'efficacité d'EC du BD avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de différentes concentration de NaCl ($C_{BD}= 10$ mg/L ; $U = 12$ V ; $t = 45$ min)	32
Figure IV.15. Effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10$ mg/L ; $C_{NaCl} = 1$ g/L ; $U = 12$ V ; $t = 45$ min).....	33
Figure IV.16. Influence de la concontration initiale du BD sur l'efficacité du traitement.....	34
Figure IV.17. Photos des solutions traitées du BD en fonction de l'agitation :(a)agitation faible, (b) agitation moyenne, (c) agitation forte.....	35
Figure IV.18. Effet de l'agitation sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10$ mg/L ; $C_{NaCl} = 1$ g/L ; $d = 2$ cm ; $U = 12$ V ; $t = 45$ min).....	36
Figure IV.19. Effet de la nature des électrodes sur l'efficacité d'EC du BD ($C_{BD} = 10$ mg/L ; $C_{NaCl} = 1$ g/L ; $U = 12$ V ; $t = 45$ min).....	38
Figure IV.20. Effet de la nature de l'eau utilisée sur l'efficacité d'EC du BD avec agitation faible ($C_{BD} = 10$ mg/L ; $C_{NaCl} = 1$ g/L ; $U = 12$ V ; $t = 45$ min). (a) avec électrodes en Al ; (b) avec électrodes en Fe.....	40
Figure IV.21. Effet du voltage sur l'effécacité du traitement de BD à $C_{BD} = 10$ mg/L en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH_i \approx 6$	43

Figure IV.22. Effet du voltage sur l'efficacité de traitement de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 10$44

Figure IV.23. Effet du voltage sur l'efficacité de traitement du BC à $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 2.5$45

Figure A.5. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC de BD à $C_{BD} = 10$ mg/L en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH_i \approx 6$.

Figure A.6. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC de BD à $C_{BD} = 10$ mg/L en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH_i \approx 4$.

Figure A.7. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 10$ mg/L en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH_i \approx 8$.

Figure A.8. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 10$ mg/L en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH_i \approx 10$.

Figure A.9. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 2.5$.

Figure A.10. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) sans ajustement du pH.

Figure A.11. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 4$.

Figure A.12. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 10$.

Figure A.13. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 8$.

Figure B.5. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC du BC $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 2.5$.

Figure B.6. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC du BC à $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) sans ajustement.

Figure B.7. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC du BC à $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 4$.

Figure B.8 .Effet du voltage sur l'efficacité d'EC du BC à $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH} \approx 8$.

Figure B.9 .Effet du voltage sur L'EC du BC à $C_{BC} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/ L) pour $\text{pH} \approx 10$.

INTRODUCTION GENERALE

La contamination des ressources en eau, principalement au niveau de la qualité, est un problème qui se pose avec acuité de nos jours. Elle est le résultat de l'utilisation massive de polluants organiques et minéraux d'origine agricole, urbaine et industrielle [1]. La dégradation des polluants organiques est devenue le point central des efforts de recherche dans le monde scientifique d'aujourd'hui [2].

De nos jours, après la qualité et la productivité, l'environnement constitue le troisième défi industriel à relever par les entreprises Algériennes. Face à une réglementation environnementale de plus en plus drastique et une limitation des performances des procédés physico-chimiques classiques de traitement des rejets, la prise en compte par les industriels des nouvelles technologies d'épuration des effluents apparaît comme une nécessité [3]. Une réglementation de plus en plus rigoureuse s'est mise progressivement en place, contraignant les différents acteurs de pollution à une réduction des rejets polluants, soit par l'adoption de techniques de dépollution des eaux résiduaires urbaines et industrielles avant leur rejet dans le milieu naturel, soit par la mise en place de technologies propres [4]. L'industrie des textiles consomme de grandes quantités d'eau et produit des rejets liquides ayant une charge élevée en polluants de divers types [1]. Les colorants synthétiques employés dans l'industrie textile représentent ce type de contaminants. Dans ces conditions, la contamination est essentiellement due à leurs rejets dans les rivières [5]. Ces polluants toxiques, dans la plupart des cas, présentent un danger certain pour l'environnement.

Pour traiter ces effluents, nous avons opté dans ce travail pour une technique relativement récente dans le domaine de traitement des eaux usées industrielles, à savoir l'électrocoagulation (EC) [3]. Dans l'EC, le coagulant est libéré dans la solution *in situ*, en utilisant la dissolution d'une anode sacrificielle. Lors de l'alimentation des électrodes en courant continu, il y a simultanément une dissolution du métal de l'anode et un dégagement

du gaz d'hydrogène (H_2) au voisinage de la cathode. Les métaux aluminium et fer sont généralement utilisés comme anode. Leur dissolution conduit à la formation des hydroxydes métalliques. Ces composés ont généralement une meilleure efficacité de coagulation que celle des produits chimiques utilisés dans les techniques conventionnelles. Ils peuvent déstabiliser les colloïdes en suspension, en adsorbant, neutralisant ou précipitant les espèces polluantes dissoutes dans le liquide, pour les transformer finalement en floccs facilement extractibles par précipitation, filtration ou flottation [6].

Dans ce travail, nous avons choisi deux colorants utilisés dans l'industrie des textiles : le brun direct 2 (BD) et le bleu cibacette BF (BC) pour étudier leur élimination par EC en mode discontinu en utilisant des électrodes en aluminium et fer (pour quelques expériences à titre comparatif).

Nous commençons ce mémoire avec un bref aperçu sur les colorants et l'EC. Nous présenterons les techniques expérimentales et nous discutons les résultats expérimentaux obtenus. En dernier lieu, nous terminons avec une conclusion générale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[1] : N. Boudesocque

« Contribution à l'étude de plasmas d'arc immergé. Application à la décontamination et à la gazéification d'effluent organiques aqueux ».Thèse de doctorat, Université de LIMOGES. (5 juillet 2007).

[2]: D. Chatterjee; S. Ddasgupta;

« Visible light induced photocatalytic degradation of organic polants », journal of photochemistry and photobiology »photochemistry Reviewus, p.186-205. (2005)

[3] : L. BEN MANSOUR ; S. GABSI

« Optimisation des paramètres de traitement des émulsions hydrocarbures/eau par Electroflottation », *Université de SFAX*.

[4] : R.TAFER.

« Photodégradation directe et induite de micropolluants organiques (cas d'un colorant azoïque) ». Mémoire de magister. (11 Février 2007).

[5] : S.ALIUCHE

« Etude de l'élimination d'un colorant par différentes méthodes photochimiques en milieu aqueux », Option : chimie analytique, physique et environnement .Mémoire de magister. (18 Février 2007).

[6] : M. BENNAJAH

« Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift ». Thèse de doctorat, Institut national polytechnique deToulouse (07 Décembre 2007).

[7] : Cours de colorants, Monsieur khoja. Université Saad Dahleb de BLIDA.2008

[8] : S. HAMMAMI

« Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels ».Thèse de doctorat, (12 Décembre 2008). Université Tunis El Manar et Université Paris-Est.

[9] : www.futura-sciences.com.

[10] : F. TEBOUL

« Biodégradation des colorants industriels à l'aide d'une souche bactérienne issue de la betterave rouge ». Mémoire de magister. Université Saad Dahleb de BLIDA.

[11] : I.ZONGO

« Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie ». Institut national polytechnique de LORRAINE. (3 novembre 2009).

[12] : D.GHERNAOUT

« Elimination des substances humiques et des germes indicateurs de contamination bactériologique par électrocoagulation assistée d'un traitement magnétique de l'eau ». Thèse de doctorat. (4 Octobre 2008). Université Saad Dahleb de BLIDA.

[13]: P. K. Holt, G. W. Barton, C. A. Mitchell.

« The future of electro coagulation as a localised water treatment technology », *Chemosphere*, 59, 13, 2005, p. 355-367.

[14] : I.IBRAHIME ; CH.BENBLIDIA

« Electrocoagulation des eaux polluées par un Herbicide-LA METRIBUZINE ; ». Mémoire de fin études. Université Saad Dahleb de BLIDA. 2009/2010.

[15] : « Revitalisation fluviale et protection des eaux souterraines », p.15, Eawag news.

[16] : A. Saiba.S.Kourdali

« Electrocoagulation de l'eau de barrage Ghrib en batch et en continue utilisant des électrodes en Fe et Al » mémoire de fin d'études. Université Saad Dahleb de BLIDA. (2005).

[17]: N.EL HANAFI; K.BENSADOK.

« Effet de la nature et de la concentration de l'électrolyte sur le traitement électrochimique d'émulsions de lait ». Université Saad Dahleb de BLIDA.

[18] : A.HEBBICHE, M.DJOUBAR.

« Prétraitement des eaux de mer par électrocoagulation ». Université Saad Dahleb de BLIDA. (2009).

[19] : C.Mesli.

« Renforcement du prétraitement de l'eau de mer par ultrafiltration ». Mémoire de magister. Université SAAD DAHLEB DE BLIDA.

[20]: A. Gurses, M. Yalcin et C. Dogar.

« Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables», Waste Management, 22: 5, 2002, p. 491-499.

[21]: M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. R. Parga et D. L. Cocke.

« Electrocoagulation (EC)-science and applications », Journal of Hazardous Materials, B 84, 2001, p. 29-41.

[22] : M .Bouziani.

« Lexique de l'eau en santé publique ».Livre .Edition dar el Gharb.

[23] : A.Marouf.

« Analyse instrumentale ». Livre. Edition dar el Gharb. P. 126-127.

[24]: Holt, P.K., Barton, G.W., Wark, M., & Mitchell, C.A.

« A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, Colloids Surface »,p 248-223. (2002).

SOMMAIRE

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

Chapitre I : Colorants

I.1. Introduction.....	2
I.2. Colorants et l'environnement.....	2
I.3. Classification des colorants.....	2
I.3.1. Classification selon la constitution chimique.....	3
I.3.2. Classification selon le mode d'application sur les fibres et les tissus	5
I.4. Toxicité des colorants.....	5
I.5. Impact des colorants sur l'environnement.....	6
I.6. Colorants utilisées.....	7

Chapitre II : Electrocoagulation

II. Procédé d'électrocoagulation.....	10
II.1. Historique du procédé.....	10
II.2. Principe d'électrocoagulation.....	10
II.3. Paramètres influençant l'EC.....	11
II.4. Seconde loi de Faraday.....	13
II.5. Inconvénients et avantages d'EC.....	13

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.1. Matériels et méthodes.....	15
III.2. Choix des polluants.....	15
III.3. Préparation des solutions synthétiques.....	16
III.4. Nettoyage des électrodes.....	16
III.5. Etapes de traitement.....	16
III.5.1. Unité d'électrocoagulation.....	16
III .5.2. Décantation.....	17
III.5.3. Analyses des échantillons.....	17

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Essais préliminaires.....	19
IV.1.1. Courbe d'étalonnage.....	19
IV.1.2. Courbes d'étalonnages à différents pH.....	20
IV.1.3. Balayage de l'intensité en fonction du voltage pour les différentes solutions.....	22
IV.1.4. Balayage du voltage à différents pH.....	24
IV.2. Traitement d'électrocoagulation.....	25
IV.2. 1. Effet du pH initial sur l'électrocoagulation.....	26
IV.2. 2. Effet de la conductivité de la solution.....	31
IV.2. 3. Effet de la distance inter-électrodes.....	32
IV.2. 3. Effet de la concentration initiale.....	34
IV.2.4. Effet de l'agitation.....	35
IV.2. 5. Effet de la nature des électrodes.....	36
IV.2. 6. Effet de la nature des solutions utilisées.....	38
IV.2.7. Effet de la tension appliquée de système et durée de traitement.....	40

IV.2.7. Rapport r	45
IV.3. Vérification de la loi de Faraday.....	46
IV.4. Consommation électrique.....	46
Conclusion Générale.....	48

I.1. Introduction

Depuis longtemps, l'Homme a toujours cherché à imiter la nature dans tout les domaines de la vie, entre autres, au niveau de la diversité des couleurs et les nuances qu'elle présente à sa vue. En effet, la couleur a joué et joue encore un grand rôle dans la vie de l'Homme et dans ses activités professionnelles. La nature nous offre un riche choix de magnifiques couleurs parmi elles celles des fleurs, des insectes, des oiseaux, etc. [7].

Par ailleurs, souvent les matières premières comme le bois, les pierres, les fibres, sont dépourvues de couleurs. Pour cette raison, l'Homme s'est servi de substances colorées qui sont capables de transmettre leur couleur à des différents supports et en premier lieu aux matières fibreuses. Ces substances sont appelés « matières colorantes » ou tout simplement colorants [7].

Aujourd'hui, la chimie des colorants a pris une grande part dans le domaine chimique. Elle s'occupe de l'étude de la fabrication des colorants, leurs structures chimiques et leurs applications dans différentes industries telles que celle des textiles, pharmaceutique, etc. [7].

I.2. Colorants et l'environnement

Les colorants constituent l'une des plus grandes classes de composés organiques à risque pour l'environnement. Environ 1 à 20% de la production mondiale se perd durant le processus de teinture des textiles et sera entraînée dans les effluents. Comme les standards internationaux de protection de l'environnement deviennent de plus en plus stricts (ISO 14001, oct. 1996), la décoloration des effluents colorés a reçu ces dernières années une attention croissante. Les colorants peuvent être éliminés avec une efficacité plus ou moins importante par des procédés physicochimiques de traitement tels que l'adsorption sur charbon actif, la filtration, la floculation par des agents chimiques etc. Ainsi donc, il y a un besoin urgent de développer des techniques plus efficaces d'élimination des colorants à la source de l'effluent.

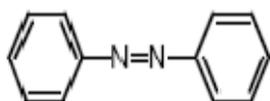
I.3. Classification des colorants

La classification des colorants peut être faite selon leur constitution chimique (colorants azoïques, anthraquinoniques, indigoïdes, etc.) ou selon leur domaine d'application [8].

I.3.1. Classification selon la constitution chimique

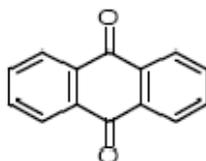
Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore [8].

I.3.1.1. Colorants azoïques



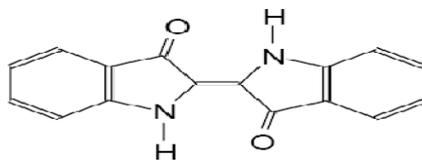
Les colorants "azoïques" sont caractérisés par le groupe fonctionnel azo (-N=N-) unissant deux groupements alkyles ou aryles identiques ou non (azoïque symétrique et dissymétrique). Ces structures qui reposent généralement sur le squelette de l'azobenzène, sont des systèmes aromatiques ou pseudo aromatiques liés par un groupe chromophore [8].

I.3.1.2. Colorants anthraquinoniques



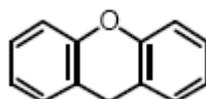
D'un point de vue commercial, ces colorants sont les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amines [8].

I.3.1.3. Colorants indigoïdes



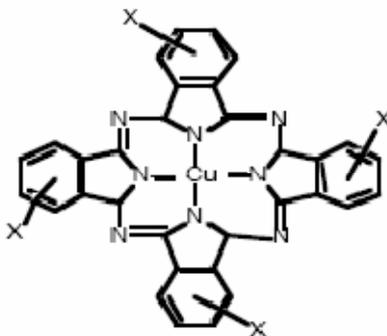
Ils tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues séléniés, soufrés et oxygénés du Bleu Indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise [8].

I.3.1.4. Colorants xanthène



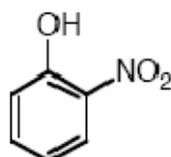
Ces colorants sont dotés d'une intense fluorescence. Le composé le plus connu est la fluorescéine. Peu utilisés en tant que teinture, leur faculté de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie [8].

I.3.1.5. Phtalocyanines



Ils ont une structure complexe basée sur l'atome central du cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.) [8].

I.3.1.6. Colorants nitro et nitroso

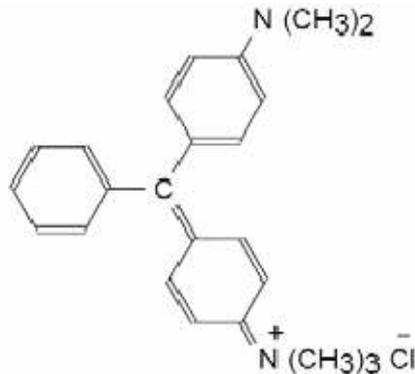


Ces colorants forment une classe très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électro donneur (hydroxyle ou groupes aminés) [8].

I.3.1.7. Colorants triphénylméthanés

Les triphénylméthanés sont des dérivés du méthane pour lesquels les atomes d'hydrogène sont remplacés par des groupes phényles substitués dont au moins un est porteur d'un atome d'oxygène ou d'azote en para vis-à-vis du carbone méthanique. Le triphénylméthane et ses homologues constituent les hydrocarbures fondamentaux d'où dérivent toute une série de matières colorantes [8].

Exemple : C.I. Basic Green 4



I.3.2. Classification selon le mode d'application sur les fibres et les tissus

- Colorants anioniques (acides),
- Colorants cationiques (basiques),
- Colorants directs,
- Colorants dispersables,
- Colorants développables,
- Colorants de cuve,
- Colorants réactifs,
- Colorants pour mordants, à complexes métallifères [7].

I.4. Toxicité des colorants

La toxicité des différents types de colorants (mortalité, effet mutagénique et cancérigène) a été étudiée par plusieurs travaux de recherche aussi bien sur des organismes aquatiques (poissons, algues, bactéries, etc.) que sur les mammifères. En outre, des recherches ont été effectuées pour étudier l'effet des colorants sur l'activité des bactéries aérobies et anaérobies dans des systèmes de traitement des eaux résiduaires. Des études faites sur divers colorants commerciaux ont démontré que les colorants basiques sont les plus toxiques pour les algues. Par ailleurs, les poissons semblent être relativement sensibles aux colorants acides. Cependant, il faut sensibiliser l'être humain quant à l'utilisation de certains colorants. En effet, il a été prouvé que quelques colorants dispersés peuvent causer des réactions allergiques, dermatologiques, etc. Par ailleurs, l'effet d'exposition des ouvriers dans l'industrie de textile aux colorants a suscité l'attention. Par conséquent, il s'est avéré que l'augmentation du nombre de cancers de la vessie observés chez des ouvriers de l'industrie textile, est reliée à leur exposition prolongée aux colorants azoïques. La plupart des colorants azoïques ne sont pas

initialement toxiques, excepté ceux à groupement amine libre. La toxicité des colorants azoïques dépend ainsi de la nature et de la position des substituants. Elle est accrue par la présence de substituants sur le noyau aromatique notamment des groupes nitro ($-\text{NO}_2$) et halogènes (particulièrement Cl). Cependant, la substitution avec des groupes carboxyliques ou sulfonâtes diminue la toxicité.

En raison des effets mentionnés ci-dessus, il est clair que les colorants, essentiellement les azoïques, ne devraient pas envahir notre environnement. Par conséquent, il est nécessaire de traiter les eaux résiduaires chargées de colorants jusqu'à leur élimination totale [8].

I.5. Impact des colorants sur l'environnement

Les colorants contribuent aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eaux usées contenant des colorants résiduels. Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source dramatique de pollution [8].

- ❖ *Eutrophisation* : Détérioration d'un écosystème aquatique par la prolifération de certains végétaux, en particulier des algues planctoniques. La cause peut être le rejet d'origine anthropique de nitrates (engrais azotés par exemple), de phosphates (lessives par exemples) et de matières organiques. Les conséquences sont variables et nombreuses : prolifération des algues planctoniques et de certains types de zooplancton, modification des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, disparition ou forte réduction du nombre d'animaux et de certains végétaux, réduction de la teneur en oxygène, etc. [9].

- ❖ *Sous oxygénation* : Lorsque des charges importantes de matières organiques sont apportées au milieu via des rejets ponctuels, les processus naturels de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène [10].

- ❖ *Bioaccumulation* : Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule (Figure I.1). Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'Homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant aller jusqu'à cent mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau [8].

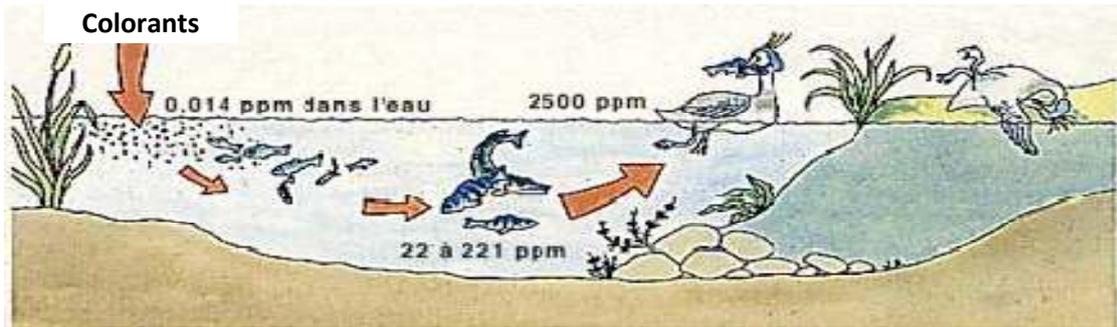


Figure I.1. Conséquences de la bioaccumulation après déversement des colorants dans un cours d'eau [8].

- ❖ *Couleur, turbidité, odeur* : L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvaises odeurs, prolifération bactérienne et coloration anormale [10].

I.6. Colorants utilisées

Dans ce travail, nous sommes intéressés à l'étude de deux colorants utilisés dans l'industrie de textiles appartenant à des familles différentes : le brun direct 2 (BD) et le bleu cibacette BF (BC). Les concentrations utilisées sont de 10 et 40 mg/L pour BD et 40 mg/L pour BC. La concentration des colorants pratiqués au sein de l'usine de SOTRADAL oscille entre 40 et 90 mg/L [10]. Nous avons choisi la concentration 10 mg/L pour BD pour mieux voir les différents phénomènes impliqués lors du procédé d'électrocoagulation.

- ❖ Brun direct 2

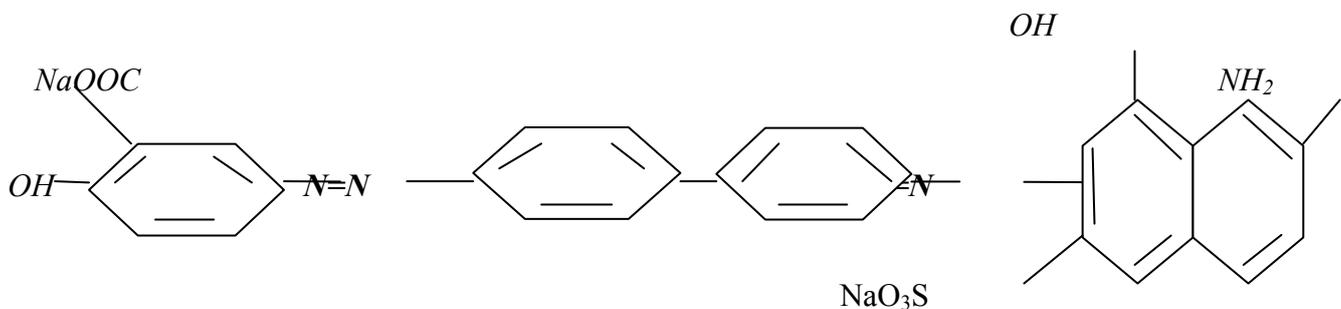


Figure I.2. Formule développée de BD.

Nom : l'acide benzoïque, 5-((4((7-amino-1-hydroxy-3-sulfo-2-naphtyl)azo)(1,biphényl)-4-yl)azo)-2-hydroxy-, le sel disodique

Classe : Colorant azoïque.

Formule brute : $C_{29}H_{19}N_5Na_2O_7S$ (Figure I.2) .

PM = 627,45 g/mol.

Ionisation : acide.

Application : Principalement pour le coton et la fibre visqueuse teignant, avec l'excellente exécution de teinture. Il peut être employé avec le vert direct B, le brown jaune EX et le noir direct 3G ; et également pour le papier et le cuir teignant. La meilleure température de teinture est entre 60~80°C.

Propriétés chimiques : Brun-rougeâtre en poudre.

Air & Réactions de l'eau :

Les colorants azoïques peuvent être explosifs quand ils sont suspendus dans l'air à des concentrations spécifiques. Légèrement soluble dans l'eau.

Profil de réactivité :

Le BD est un composé diazoïque. Les gaz toxiques sont formés en mélangeant des matériaux de cette classe avec des acides, des aldéhydes, les amides, les carbamates, les cyanures, les fluorures inorganiques, organiques halogénés, les cétones, les métaux, les nitrures, les peroxydes, les phénols, époxydes, halogénures d'acyle, et forts agents oxydants ou réducteurs. Les gaz inflammables sont formés en mélangeant des matériaux dans ce groupe avec des métaux alcalins. Une combinaison explosive peut se produire avec des agents oxydants, les sels métalliques, les peroxydes et les sulfures.

❖ Bleu cibacette BF

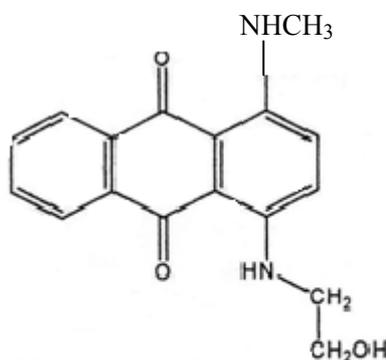


Figure I.3. Formule développée de BC.

Nom : 1-méthylamino-4-éthanolamino anthraquinone.

Classe : colorant anthraquinonique.

Formule brute : $C_{17}H_{16}N_2O_3$.

PM = 296,325 g/mol.

Ionisation : acide.

Point de fusion : 332°C.

Solubilité : soluble dans l'eau, acétone, éthanol, benzène.

Couleur : bleu.

Stabilité : ce produit est instable dans les conditions suivantes : lorsqu'il est chauffé, le produit émet des fumées toxiques.

Application : Le BC est employé comme colorant de tissu pour le nylon, cellulose, acétate et pollyester.

III.1. Matériels et méthodes

III.1.1. Produits chimiques

- Brun direct 2 (BD).
- Bleu cibacette BF (BC).
- Acide chlorhydrique.
- Chlorure de sodium.
- Hydroxyde de sodium.
- Acide sulfurique (H_2SO_4)

III.1.2. Matériels

- Spectrophotomètre de type UV-1700 PharmaSpect/UV-Vis spectrophotometer/Shimadzu.
- Générateur du courant électrique de type Elektrolyser /Arbeitsplatz I (10 A-15 V).
- Multimètre digital de marque DT830B.
- pH-mètre de type Inolab level 1.
- Conductimètre de type HANNA instruments.
- Agitateur magnétique de type VWR.
- Balance de type Sartius analytic (max 202 g, $d_d = 0,2$ mg).
- Bêchers en verre de capacité de 800 mL.
- Electrodes en aluminium (4,5 cm \times 20 cm).
- Electrodes en fer (4,5 cm \times 20 cm).
- Verrerie de laboratoire (pipettes, éprouvettes, etc.).
- Barreaux magnétiques.

III.2. Choix des polluants

Nous avons choisi deux types de colorants organiques industriels, à savoir BD (colorant azoïque) et BC (anthraquinonique), comme deux modèles de polluants organiques à cause de leur forte utilisation dans l'industrie des textiles. Ainsi donc, l'objectif de cette étude est de montrer l'intérêt du procédé d'électrocoagulation (EC) pour la dégradation des colorants des textiles en optimisant les paramètres influençants. Un intérêt particulier sera accordé aux mécanismes réactionnels impliqués lors du procédé d'EC pour des solutions synthétiques à base d'eau distillée, d'eau déminéralisée, et d'eau de robinet. L'extrapolation devrait être faite vers des eaux de surface (eaux de barrages) contenant des polluants

organiques émanant de rejets de l'industrie des textiles ou de l'industrie des papiers ou même des eaux résiduaires urbaines.

III.3. Préparation des solutions synthétiques

L'étude a porté sur la dégradation de deux colorants en solution synthétique en vue d'application à la dépollution d'un effluent réel issu de l'industrie de textile. Nous avons préparé plusieurs solutions de différentes concentrations. Par exemple, pour préparer une solution colorée de concentration 10 mg/L : il faut peser 0,01 g de colorant et le dissoudre dans un litre d'eau distillée, en suite on ajoutera 1 g de NaCl. La solution doit être bien agitée. L'ajustement des solutions pour les milieux acides ou basiques a été réalisé avec le chlorure de sodium (1 N) et le chlorure d'hydrogène (1 N).

III.4. Nettoyage des électrodes

Les électrodes (en aluminium le plus souvent et en fer pour quelques essais) doivent être propres pour mieux évaluer l'efficacité du traitement électrochimique. Pour cela, il faut nettoyer les électrodes avant chaque expérience pour éliminer les impuretés.

Etapas de nettoyage pour les électrodes en aluminium :

- Rinçage avec de l'eau distillée.
- Rinçage avec la solution de soude (NaOH, 2 N).
- Rinçage avec de l'eau distillée.

Etapas de nettoyage pour les électrodes en fer :

- Polissage à l'aide d'un papier abrasif (pour éliminer la couche de passivation après chaque essai).
- Rinçage avec de l'eau distillée.
- Décapage dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4 à 20% en masse) pendant 10 min.
- Rinçage avec de l'eau distillée.

III.5. Etapes de traitement

III.5.1. Unité d'électrocoagulation

Afin de déterminer l'efficacité du traitement d'EC, plusieurs paramètres sont étudiés, à savoir : le pH de milieu, la conductivité, la concentration initiale du colorant, la distance entre les électrodes, la nature des électrodes, l'intensité de l'agitation, le voltage appliqué (intensité

du courant électrique, densité du courant), le type de l'eau qui a servi à préparer les solutions synthétiques (eau distillée, eau déminéralisée, et eau du robinet). Les essais sont réalisés dans un réacteur en batch, composé de deux électrodes en aluminium (ou en fer pour quelques essais) plongées dans un bécher de 800 mL (rempli de 500 mL de solution synthétique). Les dimensions des électrodes sont : L (= 20 cm (longueur)) \times l (= 4,5 cm (largeur)), la surface immergée (active) est ainsi donc : H (= 8 cm (hauteur immergée)) \times l (= 4,5 cm) = 36 cm². Les électrodes sont branchées aux bornes d'un générateur de courant électrique. On fixe le voltage appliqué U (V) et on mesure l'intensité du courant I (A) passant dans la solution à l'aide d'un multimètre. L'homogénéisation de la solution est faite à l'aide d'un agitateur magnétique. La Figure III.1 présente un schéma explicatif de l'unité d'EC.

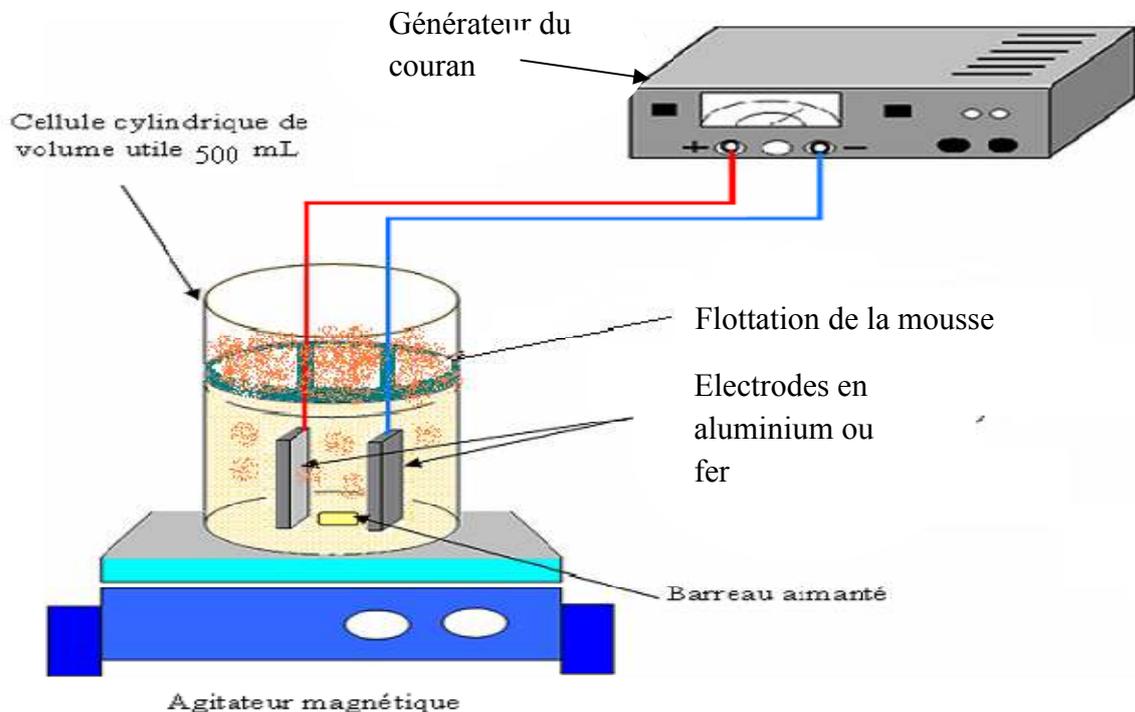


Figure III.1. Schéma explicatif de l'unité d'EC en batch.

III .5.2. Décantation

La décantation est un procédé physique de séparation des matières en suspension dans un liquide, faisant appel à l'action de la pesanteur pour les rassembler en totalité ou en partie et pour les collecter au fond d'un réservoir [22]. Après un temps précis d'EC on laisse le bécher décanter pendant 30 min.

III.5.3. Analyses des échantillons

Après la décantation, des échantillons de 20 mL ont été prélevés régulièrement afin de

procéder les différentes analyses :

- *Mesure du pH et de la conductivité*

Il faut mesurer ces deux paramètres avant et après le traitement pour voir l'effet d'EC sur la solution synthétique.

- *Mesure de l'absorbance*

Au lieu de mesurer la turbidité (du fait que les solutions étalons du turbidimètre sont périmées) qui évalue l'état le plus ou moins trouble d'une eau usée ou de surface [22] et mesurer l'absorbance de nos solutions synthétiques de colorants, on s'est contenté de mesurer l'absorbance de la solution qui est proportionnelle à la concentration de la substance dissoute [23]. Nous avons procédé au balayage dans le domaine visible (380-780 nm) des échantillons bruts afin de trouver les longueurs d'ondes les plus représentatives de l'absorbance des deux solutions colorées. Ces longueurs d'ondes correspondant à un maximum d'absorption. Nous avons trouvé :

$$\lambda_{max} (\text{BD2}) = 424 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{max} (\text{BC}) = 630 \text{ nm.}$$

Les différentes mesures sont effectuées à ces longueurs d'onde. L'efficacité du procédé est déterminée en calculant les taux de réduction $R(\%)$ des deux colorants en utilisant la relation suivante :

$$R(\%) = (Abs_i - Abs_f) / (Abs_i) \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Où :

Abs_i est l'absorbance de la solution avant traitement,

Abs_f est l'absorbance de la solution après traitement.

II. Procédé d'électrocoagulation

II.1. Historique du procédé

L'électrocoagulation (EC) est une technique de traitement développée avant le 20^{ème} siècle. Un pilote a été construit à Londres en 1889 pour traiter de l'eau de mer par électrolyse. Une demande de licence a été déposée par A.E. Dietrich en 1906 pour le traitement des eaux usées de manufactures [11]. En 1909, J.T. Harries reçut une licence des Etats-Unis pour le traitement des eaux usées par des électrodes de fer et d'aluminium. En 1947, Matheson et al décrivaient un « coagulateur électronique » qui consistait à faire dissoudre une anode en Al pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui coagulent et flocculent en entraînant les matières en suspension (MES) et purifient l'eau [10]. Un procédé similaire a été développé en Grande Bretagne pour traiter les eaux de rivières par des électrodes en fer [11].

La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité de traitement. Son efficacité a été démontrée sur divers polluants tels que les métaux lourds, les argiles, les composés organiques et inorganiques, les microorganismes, et les micro-algues, etc. [11].

II.2. Principe d'électrocoagulation

L'EC est un processus complexe, avec une multitude de mécanismes opérant de façon synergiste pour enlever les polluants d'eau [12]. L'EC est une technologie qui résulte de l'interaction de trois technologies fondamentales qui sont : l'électrochimie, la coagulation et la floculation [13]. L'EC est une technique dérivée de la coagulation classique (CC). Elle permet d'éliminer les particules colloïdales et la pollution dissoute grâce à la production *in situ* dans le réacteur des floes d'hydroxydes obtenus par dissolution anodique d'électrodes solubles (Fe, Al). Les floes d'hydroxydes générés par voie électrochimique sont plus compacts que ceux obtenus par la méthode chimique. En outre, l'EC requiert moins de réactifs et permet de réduire le volume de boues générées comparativement à la CC qui nécessite des concentrations très élevées de réactifs, entraînant ainsi une augmentation du volume de boues [24]. Mollah *et al.* (2001), cités par [11], résument ce processus comme suit :

1. La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels.

2. La déstabilisation des contaminants, des polluants, des MES et la cassure des émulsions.
3. L'agrégation des phases déstabilisées pour former les floes.

Les réactions électrochimiques avec un métal M comme anode peuvent être résumées comme suit [14] :

A l'anode :



A la cathode :

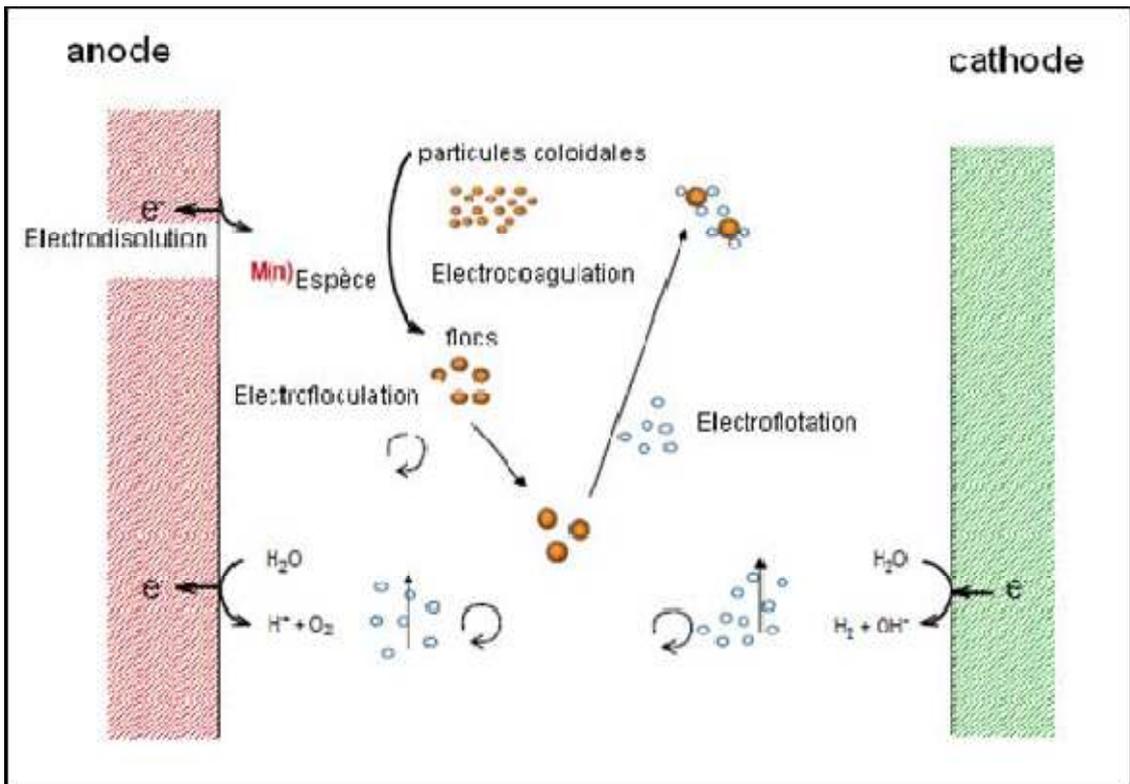


Figure II.1. Schéma du principe de l'EC.

II.3. Paramètres influençant l'EC

II .3.1. Conductivité

Ce paramètre indique la capacité de l'eau à transporter le courant électrique ; sa valeur

étant d'autant plus élevée que le teneur en ions de l'eau est forte [15]. Si elle est trop faible, la résistance au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, par analogie avec les exploitations d'installation d'EC d'effluents industriel, le chlorure de sodium est souvent ajouté. Le problème de la conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'EC [16].

Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions, tels que HCO_3^- et SO_4^{2-} par exemple, en évitant la précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes et augmenter ainsi la résistance de la cellule électrochimique [17].

II.3.2. pH

Le pH de la solution détermine la spécification d'ions métalliques. Il influence l'état d'autres espèces en solution et la solubilité de produits formés. Ainsi, le pH de la solution affecte le rendement global de l'efficacité d'EC [18].

II.3.3. Matériau d'électrodes

Le matériau d'électrodes influence visiblement la performance du réacteur d'EC. Le matériau d'électrodes détermine le cation introduit en solution. Les électrodes les plus communes sont des plaques en fer ou aluminium, en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité prouvée [16].

II.3.3. Densité de courant

La densité de courant i est le courant délivré à l'électrode divisé par l'aire active S de l'électrode. Pour contrôler ce paramètre, il suffit donc de contrôler l'intensité du courant I [18]. Pour cela, dans notre travail, nous avons fixé la tension appliquée U et mesuré l'intensité de courant avant et après traitement.

II.3.4. Passivation

L'une des plus grandes questions opérationnelles avec l'EC est la passivation des

électrodes qui sont en rapport avec la longévité du processus. Il existe diverses méthodes de contrôle de la passivation d'électrode :

- Changement de la polarité des électrodes.
- Nettoyage hydromécanique.
- Introduction d'agents inhibiteurs.

Selon les chercheurs, la plus rentable et fiable méthode de maintenance d'électrodes était de nettoyer mécaniquement l'électrode à certaines périodes [16].

II.4. Seconde loi de Faraday

Une des principales lois explicitant les réactions d'EC est la seconde loi de Faraday. Cette loi montre que la quantité d'ions métalliques dissous par oxydation anodique est proportionnelle à l'intensité de courant I imposée et à la durée d'électrolyse t mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion émis n [19].

La seconde loi de Faraday s'exprime, come suit :

$$m = (I \times t \times M)/(n \times F) \quad (\text{II.5})$$

avec :

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

I : intensité du courant (A).

t : temps d'électrolyse (s).

M : poids moléculaire de l'élément considéré (g/mol).

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

F : constante de Faraday (96500 C/mol).

II.5. Inconvénients et avantages d'EC

II. 5.1. Inconvénients d'EC

- Les « électrodes sacrificatoires » sont dissoutes au cours du traitement d'eau usée

comme une conséquence d'oxydation et nécessitent d'être régulièrement remplacées,

- Un imperméable film d'oxyde peut être formé sur la cathode causant une perte d'efficacité de l'unité d'EC [12].
- La technique d'EC nécessite que la suspension d'eau usée traitée soit à une conductivité élevée [14].
- L'usage d'électricité peut être coûteux en certains endroits.

II. 5.2. Avantages d'EC

- Un équipement simple avec un mode opérationnel facile [14].
- L'eau usée épurée par EC donne une eau agréable (au goût), limpide, incolore, et inodore,
- L'EC produit un effluent avec une moindre teneur en solides dissous totaux comparée à la CC,
- Le processus d'EC a l'avantage d'enlever les plus fines particules colloïdales, parce que le champ électrique appliqué les met en plus rapide mouvement, en conséquence facilitant leur coagulation,
- Les bulles de gaz produites durant l'électrolyse peuvent transporter le polluant vers le haut de la solution où il peut être facilement concentré, collecté et éliminé [12].
- Une pollution secondaire peut être causée par les substances chimiques ajoutées à grandes concentrations quand la CC est appliquée pour traiter les pesticides. L'addition excessive des coagulants peut être évitée dans le cas de l'EC car la génération des coagulants se fait par l'électro-oxydation de l'anode sacrificielle [20].
- La technique d'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 [21].

Brun direct 2

Tableau A.1. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g/L (pH = 6).

<i>Abs</i>	0	0,143	0,174	0.234	0.276	0.315
C_{BD} (mg/L)	0	06	08	10	12	14

Tableau A.2. Variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour des différentes solutions du BD (eau distillée, eau distillée + NaCl, eau distillée + colorant, eau distillée + colorant + NaCl).

U (V)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
I (A) Eau distillée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I (A) Eau distillée + NaCl	0.01	0.04	0.07	0.11	0.14	0.17	0.20	0.24	0.27	0.31
I (A) Eau distillée + colorant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I (A) Eau distillée + NaCl + colorant	0.03	0.07	0.11	0.15	0.19	0.23	0.26	0.30	0.34	0.39
U (V)	11	12	13	14						
I (A) Eau distillée	0	0	0	0						
I (A) Eau distillée + NaCl	0.34	0.37	0.44	0.41						
I (A) Eau distillée + colorant	0	0	0	0						
I (A) Eau distillée + NaCl + colorant	0.43	0.47	0.56	0.51						

Tableau A.3. Courbe d'étalonnage de l'absorbance visible (424 nm) du BD en présence de NaCl à 1 g/L à différentes valeurs de pH.

<i>Abs</i> (pH = 4)	0	0.06	0.08	0.10	0.122	0.147
<i>Abs</i> (pH = 8)	0	0.097	0.15	0.19	0.24	0.28
<i>Abs</i> (pH = 10)	0	0.132	0.18	0.23	0.2	0.305
C_{BD} (mg/L)	0	6	8	10	12	14

Tableau A.4. Effet du pH sur la variation de l'intensité de courant I en fonction de la tension appliquée U pour la solution du BD à 10 mg/L.

U (V)	01	02	03	04	05	06	07	08	09
I (A) à pH = 4	0.04	0.08	0.12	0.17	0.22	0.27	0.32	0.37	0.42
I (A) à pH = 6	0.03	0.07	0.11	0.15	0.19	0.23	0.26	0.31	0.34
I (A) à pH = 8	0.02	0.04	0.07	0.11	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28
I (A) à pH = 10	0.05	0.08	0.13	0.18	0.22	0.27	0.32	0.38	0.42
U (V)	10	11	12	13	14				
I (A) à pH = 4	0.47	0.52	0.57	0.62	0.64				

$I(A)$ à pH = 6	0.39	0.43	0.47	0.51	0.56
$I(A)$ à pH = 8	0.31	0.35	0.39	0.42	0.46
$I(A)$ à pH = 10	0.48	0.53	0.58	0.63	0.67

A.5. EC pour brun direct à $C_{BD} = 10$ mg/L :

Tableau A.5.1. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 4$ V ($pH_i = 5,93$ (sans ajustement) ; $T_i = 21.6$ °C ; $Cd = 2060$ μ S/cm, $Abs_i = 0.24$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.13	0.11	0.12	0.12	0.11
I_f (A)	0.14	0.12	0.14	0.13	0.12
pH _f	8.44	8.50	8.68	8.86	8.95
T_f (°C)	20.1	21.6	20.3	18.9	19
Cd_f (μ S/cm)	1904	1883	1865	1860	1845
Abs_f	0.024	0.021	0.020	0.016	0.013
R (%)	90	91.25	91.66	93.33	94.58
i (A/m ²)	36.11	30.55	36.11	633.33	30.55

Tableau A.5.2. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 8$ V ($pH_i = 6$ (sans ajustement) ; $T_i = 23.6$ °C ; $Cd = 2130$ μ S/cm, $Abs_i = 0.243$, $C_{NaCl} = 1$ g/L).

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.24	0.21	0.23	0.29	0.30
I_f (A)	0.24	0.22	0.25	0.33	0.39
pH _f	8.30	8.73	8.87	8.92	9.29
T_f (°C)	24.4	24.6	24.7	25.1	24.9
Cd_f (μ S/cm)	1923	1892	1882	1872	1875
Abs_f	0.036	0.031	0.030	0.006	0.014
R (%)	85.18	87.24	87.65	97.53	94.23
i (A/m ²)	66.66	58.33	63.88	80.55	83.33

Tableau A.5.3. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 12$ V ($pH_i = 6$ (sans ajustement) ; $T_i = 23.6$ °C ; $Cd = 2220$ μ S/cm, $Abs_i = 0.254$, $C_{NaCl} = 1$ g/L).

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.45	0.44	0.51	0.47	0.51
I_f (A)	0.48	0.47	0.56	0.50	0.56
pH _f	7.90	8.95	9.03	9.21	9.26
T_f (°C)	24.8	20.7	20.3	20.3	21.8
Cd_f (μ S/cm)	1950	1894	1835	1817	1882
Abs_f	0.047	0.027	0.014	0.006	0.008
R (%)	80.57	89.37	94.48	97.63	96.85
i (A/m ²)	125	122.22	141.66	130.55	141.66

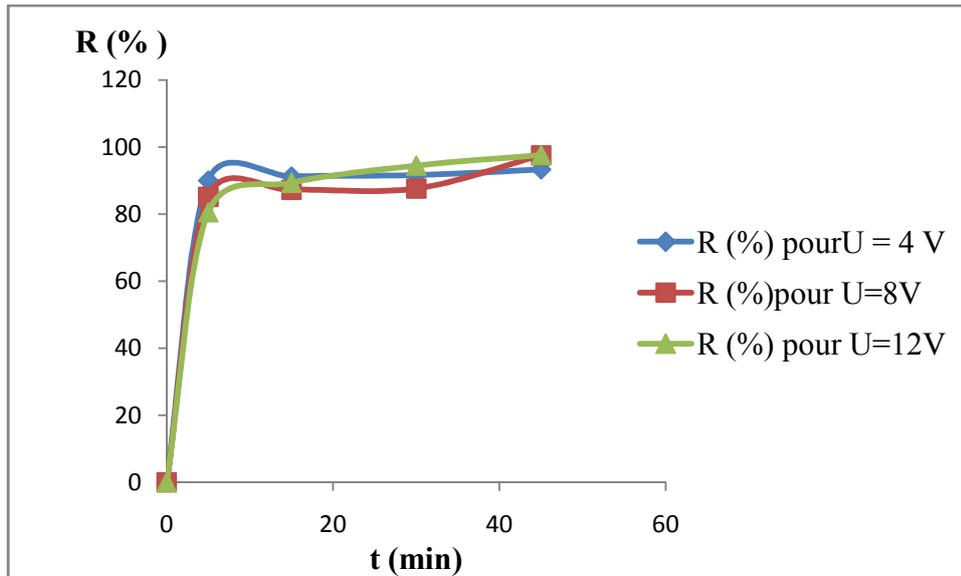


Figure A.5. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC de BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$ en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH}_i \approx 6$.

Tableau A.5.4. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 4.03$; $T_i = 21.2^\circ\text{C}$; $Cd = 2060 \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.250$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.12	0.12	0.10	0.12	0.09
I_f (A)	0.13	0.13	0.11	0.13	0.10
pH_f	6	6.63	8.19	8.30	8.37
T_f ($^\circ\text{C}$)	22.4	22.4	23	22.7	23
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2080	2060	2050	2040	2030
Abs_f	0.046	0.034	0.016	0.012	0.007
R (%)	81.6	86.4	93.6	95.2	97.2
i (A/m^2)	33.33	33.33	27.77	33.33	25

Tableau A.5.5. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 3.85$; $T_i = 23.9^\circ\text{C}$; $Cd = 2220 \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.190$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.22	0.22	0.21	0.19	0.20
I_f (A)	0.24	0.24	0.24	0.22	0.24
pH_f	7.12	8.07	8.43	8.50	8.55
T_f ($^\circ\text{C}$)	24.9	24.8	25.6	25.2	25.6
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1960	1900	1930	1948	2000
Abs_f	0.011	0.005	0.007	0.010	0.026
R (%)	94.21	97.36	96.31	94.73	86.31
i (A/m^2)	61.11	61.11	58.33	52.77	55.55

Tableau A.5.6. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 4.06$; $T_i = 23.7 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2220 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.141$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.29	0.30	0.29	0.27	0.27
I_f (A)	0.32	0.31	0.35	0.32	0.33
pH_f	7.55	7.60	8.46	8.57	8.78
T_f ($^\circ\text{C}$)	24.6	24.7	25	24.9	25.2
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1963	1940	1930	1910	1980
Abs_f	0.010	0.008	0.007	0.005	0.011
R (%)	92.90	94.32	95.03	96.45	92.19
i (A/m^2)	80.55	83.33	80.55	75	75

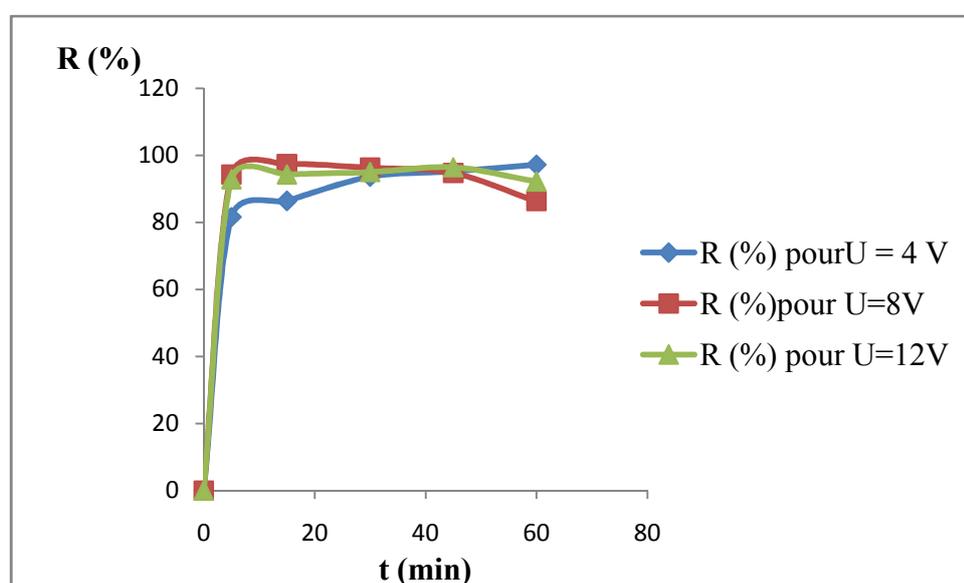


Figure A.6. Effet du voltage sur l'efficacité d'EC de BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$ en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH}_i \approx 4$.

Tableau A.5.7. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 4 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 7.95$; $T_i = 23.1 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2280 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.251$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.10	0.09	0.10	0.10	0.11
I_f (A)	0.10	0.10	0.11	0.13	0.13
pH_f	7.85	8.23	8.44	8.64	8.78
T_f ($^\circ\text{C}$)	23.5	23.4	23.3	23.8	23.9
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2080	2070	2070	2110	1900
Abs_f	0.036	0.035	0.035	0.042	0.044
R (%)	85.65	86.05	86.05	83.26	82.47
i (A/m^2)	27.77	25	27.77	27.77	30.55

Tableau A.5.8. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 8.09$; $T_i = 24.1 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2250 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.240$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

$t \text{ (min)}$	5	15	30	45	60
$I_i \text{ (A)}$	0.21	0.19	0.21	0.15	0.22
$I_f \text{ (A)}$	0.21	0.20	0.24	0.18	0.34
pH_f	8.04	8.30	8.67	8.77	8.79
$T_f \text{ (}^\circ\text{C)}$	22.6	23.5	22.9	22.7	23.8
$Cd_f \text{ (} \mu\text{S/cm)}$	1980	1950	1890	1900	2010
Abs_f	0.055	0.025	0.024	0.026	0.062
$R \text{ (\%)}$	70.08	89.58	90	89.16	74.16
$i \text{ (A/m}^2\text{)}$	58.33	52.77	58.33	41.66	61.11

Tableau A.5.9. EC pour BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 8.07$; $T_i = 21.6 \text{ }^\circ\text{C}$; $Cd = 2170 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.259$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$)

$t \text{ (min)}$	5	15	30	45	60
$I_i \text{ (A)}$	0.36	0.25	0.30	0.33	0.36
$I_f \text{ (A)}$	0.39	0.27	0.33	0.39	0.43
pH_f	8.40	8.49	8.76	8.79	8.91
$T_f \text{ (}^\circ\text{C)}$	22.4	22.6	23.5	23.7	23.5
$Cd_f \text{ (} \mu\text{S/cm)}$	1960	1950	1930	1940	1970
Abs_f	0.038	0.026	0.017	0.022	0.053
$R \text{ (\%)}$	85.32	89.96	93.43	91.50	79.53
$i \text{ (A/m}^2\text{)}$	100	69.44	83.33	91.66	100

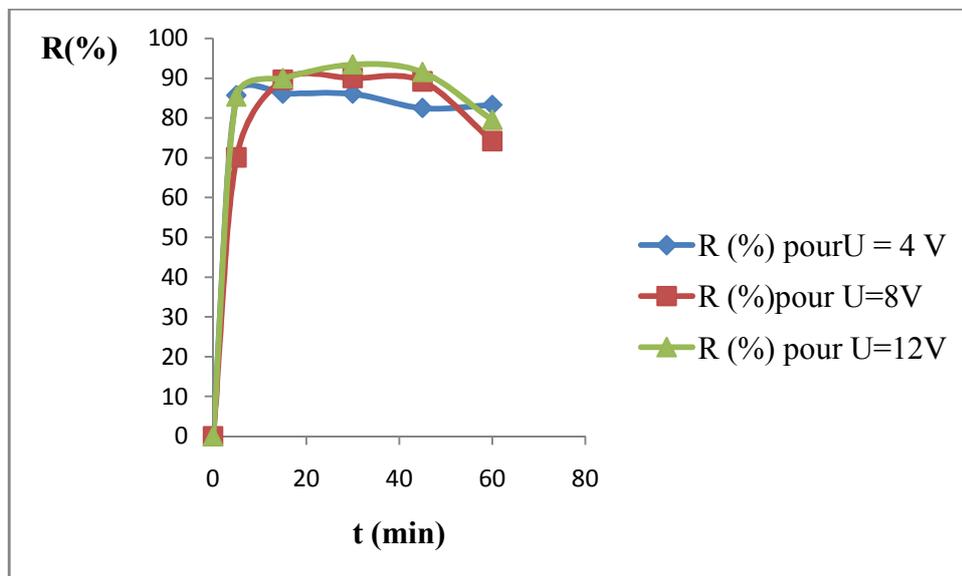


Figure A.7. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 10 \text{ mg/L}$ en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH}_i \approx 8$.

Tableau A.5.10. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = 9.98$; $T_i = 19.6$ °C ; $Cd = 2150$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.264$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07
I_f (A)	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08
pH_f	8.48	8.66	8.77	8.89	9.08
T_f (°C)	20.5	21	20.5	20.7	20.6
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1930	1900	1870	1843	1843
Abs_f	0.066	0.043	0.034	0.018	0.018
R (%)	75	83.71	87.12	93.18	93.18
i (A/m^2)	22.22	22.22	19.44	19.44	19.44

Tableau A.5.11. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = 10$; $T_i = 22.4$ °C ; $Cd = 2130$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.269$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.23	0.26	0.22	0.28	0.26
I_f (A)	0.25	0.29	0.23	0.30	0.28
pH_f	8.49	8.50	8.87	9.12	9.27
T_f (°C)	24.7	22.5	22.4	22.7	22.5
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	1987	1864	1859	1815	1823
Abs_f	0.041	0.023	0.020	0.009	0.013
R (%)	84.75	91.44	92.56	96.65	95.16
i (A/m^2)	63.88	72.22	61.11	113.88	72.22

Tableau A.5.12. EC pour BD à $C_{BD} = 10$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = 10.04$; $T_i = 22.4$ °C ; $Cd = 2190$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.263$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.44	0.35	0.38	0.39	0.45
I_f (A)	0.47	0.36	0.43	0.45	0.57
pH_f	8.26	8.34	8.88	8.96	9.19
T_f (°C)	24.1	24.4	24.9	24.9	24.4
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2003	1990	1859	1880	1922
Abs_f	0.048	0.027	0.010	0.021	0.025
R (%)	81.74	89.73	96.19	92.01	90.49
i (A/m^2)	122.22	97.22	105.55	108.33	125

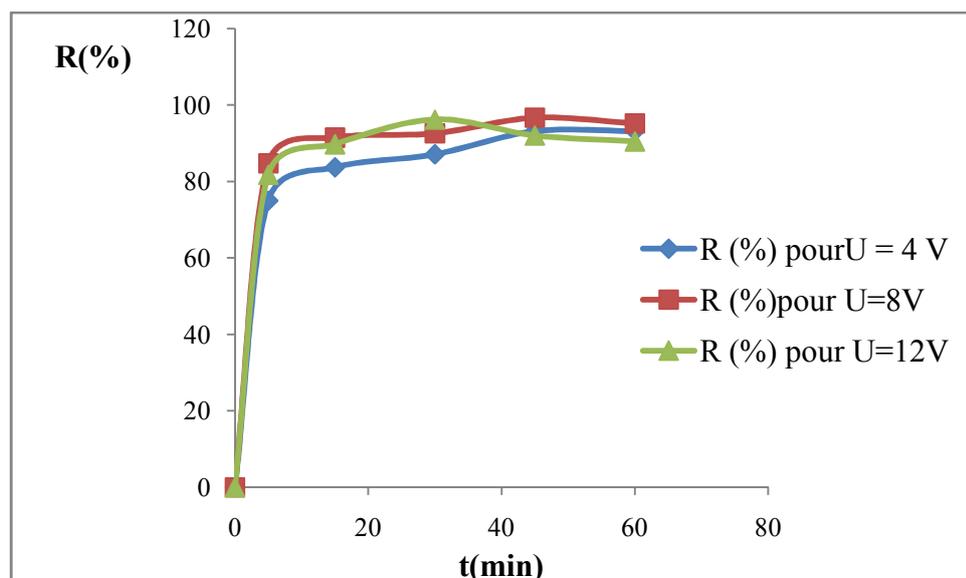


Figure A.8. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 10$ mg/L en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH}_i \approx 10$.

A.6. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L

Tableau A.6.1. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = 2.51$; $T_i = 28.2^\circ\text{C}$; $Cd = 2590$ $\mu\text{S/cm}$, $\text{Abs}_i = 0.824$, $C_{\text{NaCl}} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.12	0.12	0.10	0.09	0.09
I_f (A)	0.10	0.11	0.11	0.09	0.10
pH_f	4.02	4.22	4.62	4.98	5.30
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.5	28.3	29	29.4	29
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2100	2090	2050	2040	2030
Abs_f	0.523	0.318	0.361	0.330	0.285
R (%)	36.52	61.40	56.18	59.95	65.41
i (A/m^2)	33.33	33.33	27.77	25	25

Tableau A.6. 2. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = 2.56$; $T_i = 28.4^\circ\text{C}$; $Cd = 2600$ $\mu\text{S/cm}$), $\text{Abs}_i = 0.867$, $C_{\text{NaCl}} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.37	0.37	0.36	0.48	0.34
I_f (A)	0.36	0.35	0.38	0.55	0.40
pf	4.22	4.95	5.33	7.32	7.93
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.7	29.4	29.7	30.1	29.7
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2110	2070	2060	2020	2000
Abs_f	0.599	0.322	0.180	0.035	0.032
R (%)	30.91	62.86	79.23	95.96	96.30
i (A/m^2)	102.77	102.77	100	133.33	96.64

Tableau A.6. 3. EC pour BD à $C_{BD}=40$ mg/L, $U=12$ V ($pH_i=2.57$; $T_i=28.7^\circ\text{C}$; $C_d=2620$ $\mu\text{S/cm}$), $Abs_i=0.920$, $C_{NaCl}=1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.39	0.52	0.45	0.47	0.44
I_f (A)	0.37	0.50	0.52	0.59	0.46
pH_f	4.21	5.96	7.12	7.46	8.21
T_f ($^\circ\text{C}$)	29.4	29.5	29	32	30.1
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2060	2050	2040	2000	2000
Abs_f	0.505	0.051	0.046	0.032	0.032
R (%)	45.10	94.45	95	96.52	96.52
i (A/m^2)	108.33	144.44	125	130.55	122.22

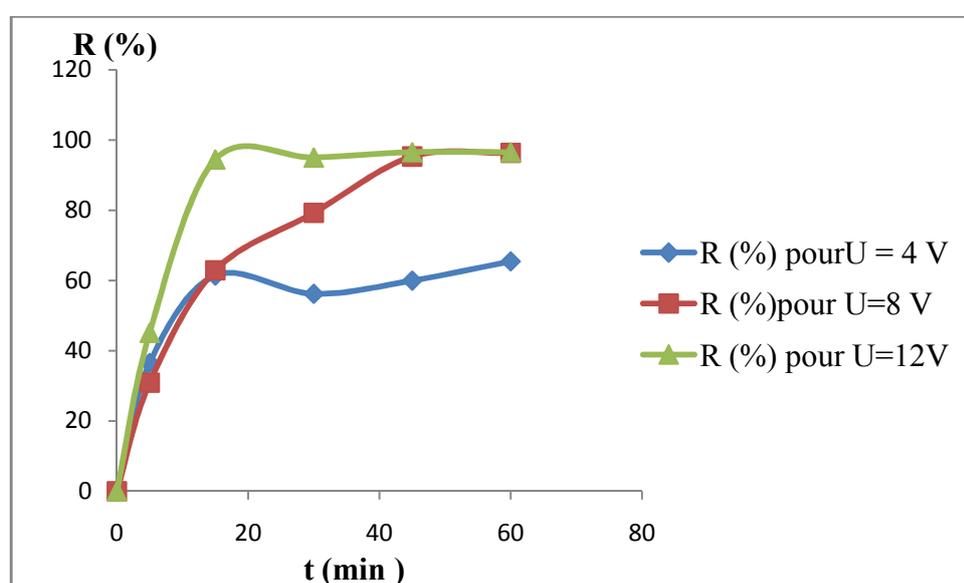


Figure A.9. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD}=40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 2.5$.

Tableau A.6. 4. EC pour BD à $C_{BD}=40$ mg/L, $U=4$ V ($pH_i=5.06$ (sans ajustement); $T_i=29^\circ\text{C}$; $C_d=2230$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i=1.089$, $C_{NaCl}=1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11
I_f (A)	0.09	0.12	0.10	0.09	0.12
pH_f	6.90	7.45	7.86	8.1	8.35
T_f ($^\circ\text{C}$)	27.8	28.4	28.7	28.4	28.8
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2040	2020	2010	1990	1980
Abs_f	0.100	0.088	0.086	0.078	0.056
R (%)	90.81	91.91	92.10	92.83	94.85
i (A/m^2)	25	25	25	25	30.55

Tableau A.6. 5. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 8 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 5.06$ (sans ajustement)); $T_i = 29^\circ\text{C}$; $Cd = 2230 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.064$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.26	0.30	0.23	0.30	0.17
I_f (A)	0.26	0.31	0.23	0.34	0.19
pH_f	7.43	7.85	8.12	8.44	8.52
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.1	28.6	28.8	28.6	28.9
Cd ($\mu\text{S/cm}$)	2060	2040	2010	1990	1960
Abs_f	0.093	0.073	0.063	0.057	0.056
R (%)	91.25	93.13	94.07	94.64	94.73
i (A/m^2)	72.22	83.33	63.88	83.33	47.22

Tableau A.6. 6. EC pour BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$, $U = 12 \text{ V}$ ($\text{pH}_i = 5.50$ (sans ajustement)); $T_i = 28.4^\circ\text{C}$; $Cd = 2300 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.013$, $C_{NaCl} = 1 \text{ g/L}$

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.32	0.31	0.30	0.35	0.45
I_f (A)	0.34	0.32	0.36	0.45	0.53
pH_f	7.42	7.87	8.31	8.35	8.74
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.4	28.9	28.8	29.5	29.5
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2080	2060	2030	2000	1990
Abs_f	0.100	0.078	0.062	0.033	0.008
R (%)	90.12	92.30	93.87	96.74	99.11
i (A/m^2)	88.88	86.11	83.33	97.22	125

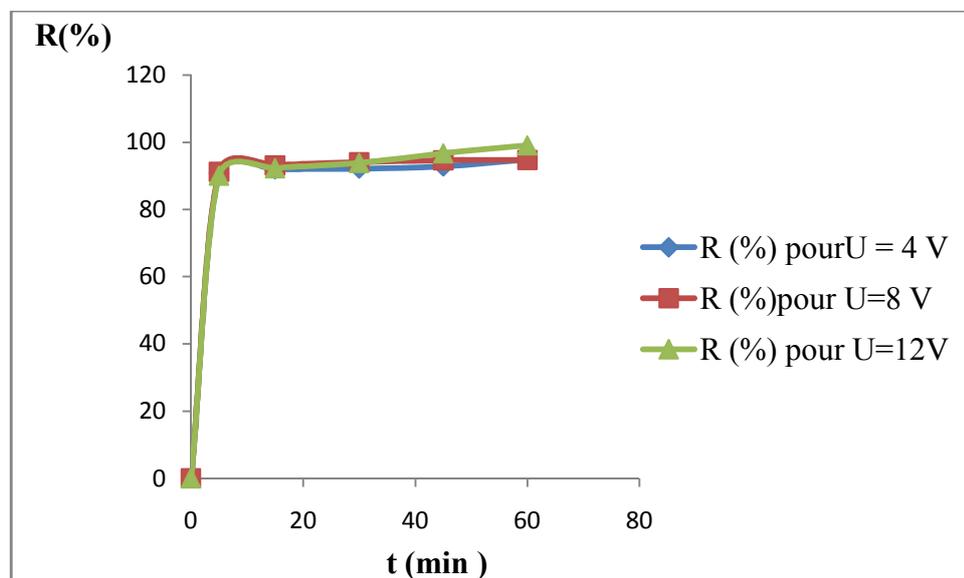


Figure A.10. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40 \text{ mg/L}$ avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) sans ajustement du pH.

Tableau A.6. 7. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = 3.83$; $T_i = 28.8^\circ\text{C}$; $Cd = 2320$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.983$, $C_{NaCl} = 1\text{g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.09	0.09	0.09	0.11	0.08
I_f (A)	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
pH_f	7.29	7.42	7.70	7.98	8.19
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.9	29	29	29.1	28.3
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2030	1990	1950	1940	1900
Abs_f	0.087	0.085	0.074	0.066	0.063
R (%)	91.14	91.35	92.47	93.48	93.59
i (A/m^2)	25	25	25	30.55	22.22

Tableau A.6. 8. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = 3.77$; $T_i = 27.9^\circ\text{C}$; $Cd = 2320$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.914$, $C_{NaCl} = 1\text{g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.26	0.20	0.28	0.26	0.27
I_f (A)	0.27	0.24	0.29	0.28	0.30
pH_f	7.69	7.73	8	8.16	8.17
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.5	28.1	29.9	29.6	30.1
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2100	2060	2030	2000	1900
Abs_f	0.091	0.087	0.064	0.050	0.028
R (%)	90.04	90.48	92.99	94.52	96.93
i (A/m^2)	72.22	55.55	77.77	72.22	75

Tableau A.6. 9. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 12$ V ($\text{pH}_i = 3.77$; $T_i = 27.9^\circ\text{C}$; $Cd = 2320$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.914$, $C_{NaCl} = 1\text{g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.43	0.38	0.42	0.42	0.44
I_f (A)	0.44	0.39	0.48	0.48	0.46
pH_f	7.95	8.01	8.28	8.78	8.89
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.2	28.2	28.4	28.1	28.1
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2010	1990	1980	1960	1940
Abs_f	0.092	0.071	0.041	0.020	0.013
R (%)	89.93	92.23	95.51	97.81	98.57
i (A/m^2)	119.44	105.55	116.66	116.66	122.22

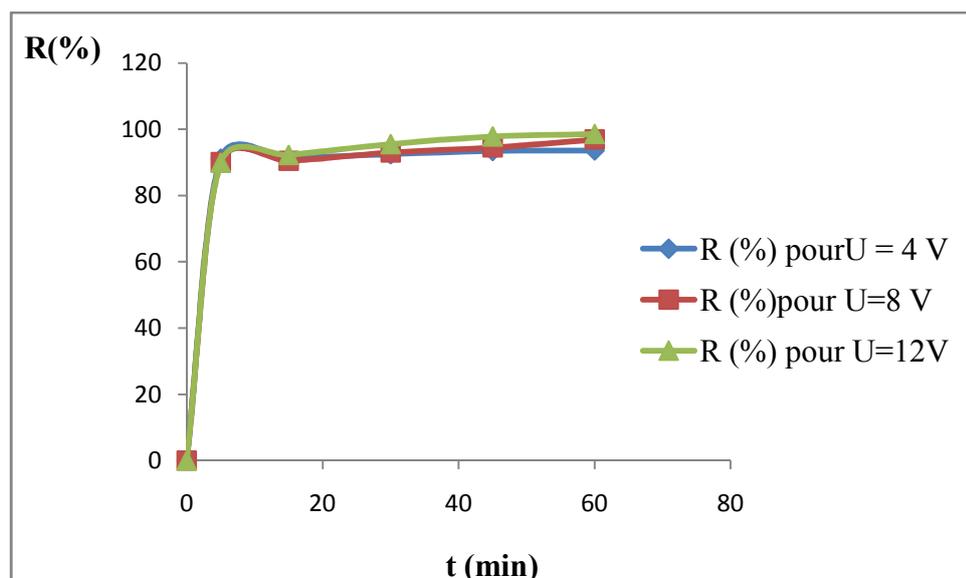


Figure A.11. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $\text{pH} \approx 4$.

Tableau A.6.10. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($\text{pH}_i = 10$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 2450$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.035$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09
I_f (A)	0.10	0.09	0.11	0.12	0.11
pH_f	8.39	8.43	8.54	8.88	9.07
T_f ($^\circ\text{C}$)	27.1	27.3	27.8	27.8	27.7
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2100	2080	2070	2050	2030
Abs_f	0.876	0.250	0.128	0.095	0.094
R (%)	15.36	75.84	87.63	90.82	90.91
i (A/m^2)	25	25	27.77	27.77	25

Tableau A.6.11. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($\text{pH}_i = 10$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 2470$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.996$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.32	0.25	0.31	0.28	0.28
I_f (A)	0.32	0.26	0.32	0.30	0.29
pH_f	8.37	8.49	8.60	8.71	8.78
T_f ($^\circ\text{C}$)	27.5	27.2	28.1	28.1	28.5
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2120	2100	2060	2040	2030
Abs_f	0.194	0.109	0.064	0.036	0.047
R (%)	80.52	89.05	93.07	96.38	95.28
i (A/m^2)	88.88	69.44	86.11	77.77	77.77

Tableau A.6.12. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 12$ V ($pH_i = 10$; $T_i = 27.7^\circ\text{C}$; $Cd = 2540$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.990$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.48	0.74	0.94	0.65	0.69
I_f (A)	0.49	0.78	1.13	0.77	1.20
pH_f	8.34	8.51	8.83	8.90	9.16
T_f ($^\circ\text{C}$)	27.9	29	29.9	29.7	30.1
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2210	2170	2110	2090	2070
Abs_f	0.213	0.087	0.014	0.013	0.001
R (%)	78.52	91.22	98.58	98.68	99.89
i (A/m^2)	133.33	205.55	261.11	180.55	191.66

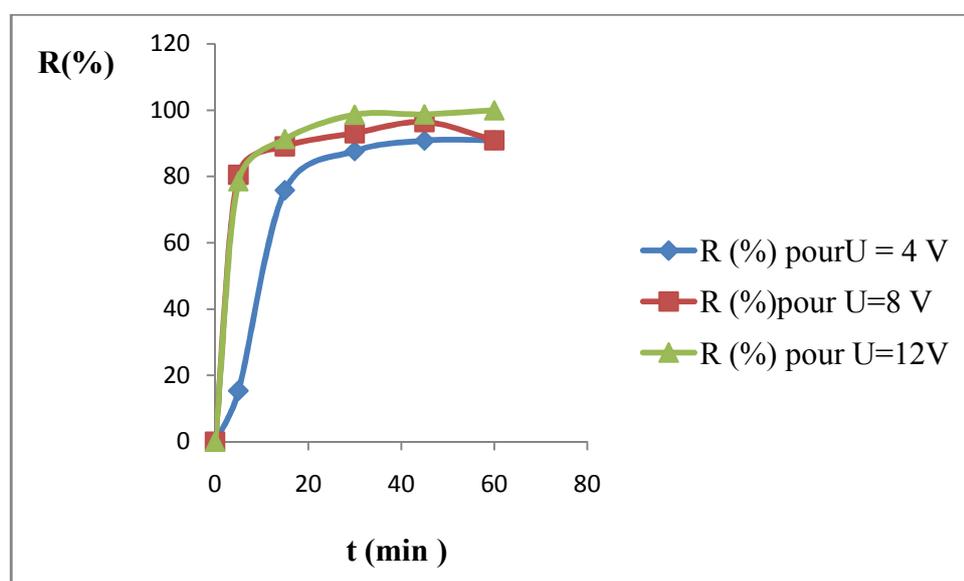


Figure A.12. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 10$.

Tableau A.6.13. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 4$ V ($pH_i = 8.35$; $T_i = 27.8^\circ\text{C}$; $Cd = 2380$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 0.974$, $C_{NaCl} = 1$ g/L)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.12	0.11	0.11	0.09	0.12
I_f (A)	0.12	0.12	0.11	0.09	0.13
pH_f	7.33	7.90	7.92	8.23	8.31
T_f ($^\circ\text{C}$)	27.5	27.8	27.9	27.9	28.1
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2080	2070	2040	2030	1980
Abs_f	0.181	0.073	0.068	0.056	0.034
R (%)	81.41	92.50	93.01	94.25	96.50
i (A/m^2)	33.33	30.55	30.55	25	33.33

Tableau A.6.14. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 8$ V ($pH_i = 8.15$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 2260$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.014$, $C_{NaCl} = 1\text{g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.21	0.21	0.28	0.29	0.31
I_f (A)	0.21	0.21	0.30	0.31	0.35
pH_f	7.65	7.71	8.12	8.43	8.50
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.3	28.7	29.6	29.1	29.7
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2040	2020	2000	1990	1980
Abs_f	0.105	0.084	0.065	0.047	0.030
R (%)	89.64	91.71	93.58	95.36	97.04
i (A/m^2)	58.33	58.33	77.77	80.55	86.11

Tableau A.6.15. EC pour BD à $C_{BD} = 40$ mg/L, $U = 12$ V ($pH_i = 8.15$; $T_i = 27.3^\circ\text{C}$; $Cd = 22690$ $\mu\text{S/cm}$, $Abs_i = 1.012$, $C_{NaCl} = 1\text{g/L}$)

t (min)	5	15	30	45	60
I_i (A)	0.59	0.56	0.50	0.65	0.62
I_f (A)	0.60	0.68	0.57	0.98	1.24
pH_f	7.88	8.12	8.36	8.81	8.74
T_f ($^\circ\text{C}$)	28.4	28.9	29.6	29.9	31.5
Cd_f ($\mu\text{S/cm}$)	2070	2050	2060	2020	2000
Abs_f	0.102	0.062	0.054	0.013	0.009
R (%)	89.92	93.87	94.66	98.71	99.11
i (A/m^2)	163.85	155.55	138.88	180.55	172.22

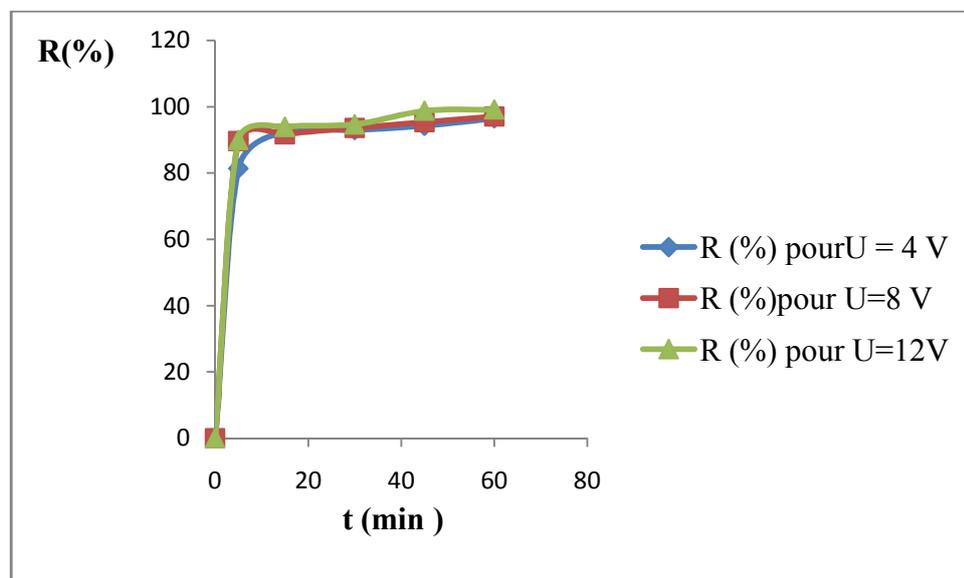


Figure A.13. Effet du voltage sur l'EC de BD à $C_{BD} = 40$ mg/L avec électrodes en Al et avec agitation faible en présence de NaCl (1 g/L) pour $pH \approx 8$.