

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 Fin d'Etude

*En vue de l'Obtention du Diplôme
de Master en Chimie Industrielle*

*Option : Procédés de Traitement des Effluents et Protection
de l'Environnement*

***ELIMINATION DES MICRO-ALGUES DES
EAUX DE BARRAGE GHRIB (W. AIN DEFLA)
PAR ELECTROFLOTTATION AVEC DES
ELECTRODES EN ACIER INOXYDABLE***

Par

Chahineze BENBLIDIA

Devant le jury composé de :

A. KHELIFA	Professeur, U. de Blida	Président
F.ATHMANI	Maître – Assistante, U. de Blida	Examinatrice
N. TAOUALIT	Maître – Assistante, U. de Blida	Examinatrice
W. NACEUR	Professeur, U. de Blida	Promoteur
D. GHERNAOUT	Maître de conférences (A), U. de Blida	Co-Promoteur

Blida, 2011.

LISTE DES ABBREVIATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Microalgues

Chapitre II

Electroflotation

TECHNIQUE EXPERIMENTALE

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

DEDICACE

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

- A celle, qui a tout donné et tout sacrifié, à la femme qui règne sur mon cœur, ma mère.

- A celui qui m'a toujours dirigée, guidée et encouragée afin de me voir affronter la vie avec sérénité et courage, à l'homme qui a toujours souhaité me voir à la hauteur, mon père.

- A mes frères, ma sœur, mon fiancé et à toute la famille.

- A mes très chers collègues et toute la promotion 2010 et 2011.

- A tous mes amis.

- A tous ceux que j'aime et tous ceux qui me sont très chers.

Chahineze

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Filtration (Labo 256) au Département de Chimie Industrielle, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Saad Dahlab de Blida, sous la direction de Monsieur le Professeur Wahib Naceur et Monsieur Djamel GHERNAOUT, Maître de Conférences (A) au même Département.

Je remercie mes deux Promoteurs pour leur suivi durant la réalisation de ce travail. Je tiens à leur exprimer toutes mes reconnaissances pour la grande attention et pour la confiance qu'ils m'ont accordées pendant toute la durée de ma formation.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Abdallah KHELIFA, Professeur au même Département, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider ce Jury.

Je suis très honorée de compter parmi les membres du jury Madame TAOUALIT et Madame ATHMANI, Maîtres-assistantes au même Département.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur Mohamed HOUARI, Chef du Département de Chimie Industrielle et Monsieur K. MOULOUD, Maître-assistant pour leurs conseils et leur suivi durant mes années d'étude au Département de Chimie Industrielle.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants et aux techniciens des laboratoires du Département.

Spécial remerciement pour ma collègue Yassamine KELLALI pour son soutien, son aide et son amitié.

Enfin, je suis heureuse de remercier mes camarades du Département, pour les bons moments passés ensemble.

ملخص

في دراستنا، طبقنا طريقة الكهروطفو لمعالجة مياه سد غريب من الطحالب المجهرية باستعمال مسارين من الفولاذ المقاوم للصدأ.

درسنا تأثير العوامل مثل : كثافة التيار الكهربائي و ال pH الأولي و المسافة بين المسريين و كذا مدة التطبيق. تم استنتاج القيم المناسبة التي تسمح بالوصول إلى أعلى النسب المئوية لنزع الطحالب المجهرية حيث قدر المرودود بنسبة 100%. النتائج التي تحصلنا عليها خلال مدة زمنية لا تتجاوز خمسة عشر دقيقة تظهر أن طريقة الكهروطفو مناسبة لمعالجة مياه السدود. لقد قمنا أيضا بتطبيق هذه التقنية على مياه سد لكحل.

كلمات مفاتيح : الكهروطفو ; الطحالب المجهرية ; سد غريب ; سد لكحل ; الفولاذ المقاوم للصدأ.

Résumé

Cette étude nous a permis de démontrer l'intérêt de l'application de la technique d'électroflottation (EF) dans le traitement de l'eau de Barrages Ghrib riche en micro-algues. L'effet des paramètres opérationnels tels que : densité de courant (i), pH initial, et distance entre les électrodes (d) a été étudié dans le cas d'EF avec des électrodes en acier inoxydable. Une élimination totale des micro-algues ($R = 100\%$) a été obtenue pour $i = 170 \text{ A m}^{-2}$, $d = 1 \text{ cm}$, pour un temps d'électrolyse de 15 min et sans ajustement du pH. Nous avons également appliqué l'EF pour le traitement des eaux du Barrage Lakhel.

Mots clés : Electroflottation ; Micro-algues ; Barrage Ghrib ; Barrage Lakhel ; Acier inoxydable.

Abstrat

The algae removal of Ghrib dam water by electroflotation (EF) technology was investigated in this study. The results indicated that stainless steel was an excellent electrode material for algae removal. The effect of parameters such as: current density (i), initial pH, distance between electrodes (d) has been studied. The optimal conditions are: $i = 170 \text{ A m}^{-2}$, $d = 1 \text{ cm}$ during 15 min at neutral pH. Under these optimal conditions, 100% of algae removal was achieved. We have also applied the EF process for the treatment of Lakhel dam.

Keywords: Electroflotation; Micro-algae; Ghrib dam; Lakhel dam; Stainless steel.

LISTE DES ABREVIATIONS

BG : Barrage Ghrib.

BL : Barrage Lakhel.

EF : Electroflottation.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

CE : Conductivité Electrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

$^{\circ}\text{F}$: Degré Français.

TH : Titre Hydrotimétrique (calcium, magnésium) ($^{\circ}\text{F}$).

TAC : Titre Alcalimétrique complet (taux d'hydroxydes) ($^{\circ}\text{F}$).

TA : Titre Alcalimétrique (carbonates et bases fortes) ($^{\circ}\text{F}$).

M.O : Matières Organiques ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

DCO : Demande Chimique en Oxygène ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

DBO_5 : Demande Biologique en Oxygène ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

MES : Matières En Suspension ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

R (%): Rendement d'élimination des microalgues.

N ($\text{alg}\cdot\text{mL}^{-1}$) : Nombre des microalgues par millilitre de volume concentré.

C_i : Concentration des microalgues avant traitement.

C_f : Concentration des microalgues après traitement.

pH : potentiel Hydrogène.

i : densité du courant électrique ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$).

U : voltage appliqué (V).

t : temps d'électrolyse (min).

d : distance inter-électrodes (cm).

T : température ($^{\circ}\text{C}$).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Différents types nutritionnels des algues microscopiques.....	5
Tableau I.2 Classification des micro-algues (quelques exemples).....	5
Tableau I.3 Principales espèces de métabolisme hétérotrophe pour la production de biodiesel.....	8
Tableau IV.1 Paramètres physicochimiques de l'eau du BG prélevées à la surface pendant la période : Février – Juin 2011.....	22
Tableau IV.2 Analyses algologiques de l'eau de surface du BG du mois d'Avril.....	23
Tableau IV.3 Caractéristiques morphométriques du BL	31
Tableau IV.4 Paramètres physicochimiques des eaux du BG et BL prélevées le mois de Février et à la surface.....	32
Tableau A.1 Taux d'élimination des microalgues en fonction du temps de traitement pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$ et $d = 2 \text{ cm}$	43
Tableau A.2 Effet de la densité de courant sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $pH = 7,8$ et $d = 2 \text{ cm}$	43
Tableau A.3 Effet de la densité de courant sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $pH = 7,8$; $d = 2 \text{ cm}$ et $t = 5 \text{ min}$	43
Tableau A.4 Influence du pH sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$	43
Tableau A.5 Influence du pH sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$ et $t = 10 \text{ min}$	43
Tableau A.6 Influence du pH sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$ et $t = 30 \text{ min}$	43
Tableau A.7 Evolution du pH au cours de l'EF.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau A.8 Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$ et $pH = 7,8$	44
Tableau A.9 Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$ et $pH = 7,8$	44
Tableau A.10 Influence de la conductivité de l'eau sur l'efficacité du traitement en fonction de la densité de courant pour $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	44
Tableau A. 11 Optimisation du temps et de la densité de courant pour $pH = 7,88$; $CE = 789 \mu\text{S.cm}^{-1}$ à $13,3 \text{ }^\circ\text{C}$; $d = 2 \text{ cm}$	45
Tableau A.12 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$...	45
Tableau A.13 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	45
Tableau A.14 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	46
Tableau A.15 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	46
Tableau A.16 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	46
Tableau A.17 Optimisation du temps et de la densité de courant pour $pH = 7,80$; $CE_i = 2800 \mu\text{S.cm}^{-1}$ à $11,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $d = 2 \text{ cm}$	47
Tableau A.18 Optimisation du temps et de la densité de courant en milieu acide pour $pH = 4,00$ et $d = 2 \text{ cm}$	47
Tableau A.19 Optimisation du temps et de la densité du courant en milieu basique pour $pH = 10,00$ et $d = 2 \text{ cm}$	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau A.20 Optimisation du temps en milieu acide pour $pH = 6,00$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$ et $d = 2$ cm.....	48
Tableau A.21 Optimisation du temps et de la densité du courant pour $pH = 7,88$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$ et $d = 1$ cm.....	48
Tableau A.22 Analyses algologiques de l'eau brute	49
Tableau A.23 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5$ min et $d = 2$ cm.....	49
Tableau A.24 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5$ min et $d = 2$ cm.....	49
Tableau A.25 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5$ min et $d = 2$ cm.....	49
Tableau A.26 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10$ min et $d = 2$ cm.....	50
Tableau A.27 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10$ min et $d = 2$ cm.....	50
Tableau A.28 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10$ min et $d = 2$ cm.....	50
Tableau A.29 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15$ min et $d = 2$ cm.....	50
Tableau A.30 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25$ min et $d = 2$ cm.....	50
Tableau A.31 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25$ min et $d = 2$ cm.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau A.32 Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	51
Tableau A.33 Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	51
Tableau A.34 Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 20 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	51
Tableau A.35 Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	51
Tableau A.36 Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	51
Tableau A.37 Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	52
Tableau A.38 Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.	52
Tableau A.39 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	52
Tableau A.40 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	52
Tableau A.41 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	52
Tableau A.42 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	52
Tableau A.43 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2$ cm.....	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau A.44 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	53
Tableau A.45 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	53
Tableau A.46 Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 20 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	53
Tableau A.47 Analyses algologiques pour $pH = 6,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$..	53
Tableau A.48 Analyses algologiques pour $pH = 6,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 20 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$	53
Tableau A.49 Analyses algologiques pour $pH = 6,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$..	53
Tableau A.50. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$...	53
Tableau A.51. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$..	54
Tableau A.52. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$..	54
Tableau A.53. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$	54

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Réaction de la photosynthèse	3
Figure I.2. Structure d'une algue unicellulaire colorée artificiellement ($\times 7000$).....	4
Figure III.1. Dispositif expérimental de l'EF.....	16
Figure III.2. Microscope inversé.....	17
Figure IV.1. Plan de situation du BG.....	19
Figure IV.2. Vue du BG.....	19
Figure IV.3. Taux d'élimination des microalgues en fonction du temps de traitement [$pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$].....	25
Figure IV.4. Effet de la densité de courant sur l'efficacité de l'EF [$pH = 7,8$; $d = 2 \text{ cm}$].....	26
Figure IV.5. Influence du pH sur l'efficacité de l'EF [$i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$] (a) : en fonction du temps ; (b) : $t = 10 \text{ min}$; (c) : $t = 30 \text{ min}$	28
Figure IV.6. Evolution du pH au cours de l'EF	29
Figure IV.7. Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de l'EF	30
Figure IV.8. Influence de la conductivité de l'eau sur l'efficacité du traitement [$t = 15 \text{ min}$; $d = 2 \text{ cm}$].....	33

Sommaire

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Liste des abréviations.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	x
Sommaire.....	xi
Introduction générale.....	1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Microalgues

I.1. Définition.....	3
I. 2. Mode de nutrition.....	4
I. 3. Classification.....	5
I.3.1. Algues rouges.....	6
I.3.2. Algues brunes.....	6
I.3.3. Algues vertes.....	7
I.3.4. Cyanobactéries ou algues bleues.....	7
I.3.5. Autres algues.....	7
I.4. Utilisation.....	8
I.5. Conséquences de l'eutrophisation sur le traitement de potabilisation.....	8

Chapitre II : Electroflottation

II.1. Définition.....	10
II.2. Théorie.....	10
II.3. Domaines d'utilisation.....	11
II.3. Avantages et inconvénients.....	12

TECHNIQUE EXPERIMENTALE

III.1. Matériels et méthodes	14
III.1.1. Réactifs.....	14
III.1.2. Matériels.....	14
III.2. Mode opératoire.....	14
III.2.1. Nettoyage des électrodes.....	14
III.2.2. Etapes de travail.....	15
• Traitement par EF.....	15
• Décantation.....	15
• Prélèvement	16
• Fixation des microalgues.....	16
• Analyses algologiques.....	16
• Calcul de la concentration en microalgues.....	17

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 Présentation du Barrage Ghrib (BG).....	18
IV.1.1. Aperçu géographique.....	18
IV.1.2. Caractéristiques de l'eau brute du BG.....	20
<i>IV.1.2.1. Paramètres physicochimiques.....</i>	<i>20</i>
<i>IV.1.2.2. Paramètres algologiques.....</i>	<i>23</i>
IV.2. Remarques et phénomènes observés au cours de l'EF.....	23
IV.3. Paramètres influençant l'EF.....	24
IV.3.1. Temps d'EF	24
IV. 3.2. Densité de courant.....	25
IV.3.3. pH initial d'eau brute.....	27
IV.3.4. Distance inter-électrodes.....	29
IV.3.5. EF des eaux du barrage Lakhel et Conductivité de l'eau.....	31

Conclusion.....	34
Bibliographie.....	35
Annexe.....	43

I.1. Définition

Les micro-algues sont des algues microscopiques unicellulaires. Elles peuvent être libres ou vivre en colonie. Leur cellule unique et indifférenciée assure toutes les fonctions. Ce sont des micro-organismes appartenant à deux groupes : les eucaryotes et les procaryotes. Elles vivent dans les milieux fortement aqueux. Les micro-algues eucaryotes possèdent une structure cellulaire végétale classique compartimentée, avec ou sans paroi cellulosique, et, avec des pigments photosynthétiques (Figure I.1) renfermés dans des plastes. Les micro-algues procaryotes, appelées aussi *cyanobactéries*, ont une structure bactérienne classique sans compartiment, les pigments photosynthétiques étant contenus dans des membranes lamellaires. Les micro-algues sont réparties dans différentes familles qui ont chacune leurs propres caractéristiques, mais elles ont aussi des points communs en particulier dans leur ultra-structure et leur métabolisme [5].

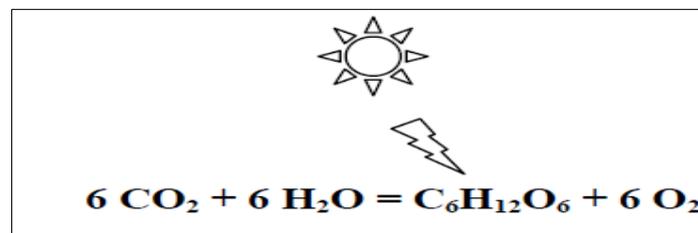


Figure I.1 Réaction de la photosynthèse [6].

Nous utilisons le terme « *micro* » car la taille d'une micro-algue varie de quelques micromètres à une centaine de micromètres (Figure I.2). En ce qui concerne la multiplication des micro-algues, elles ne grandissent pas. Par contre, certaines d'entre elles, comme les diatomées, peuvent voir leur taille diminuer. Comme toutes les micro-algues, elles colonisent leur milieu en se divisant par mitose, rapidement et activement, si les conditions physico-chimiques et nutritives sont favorables. Lors de cette reproduction asexuée, leur taille diminue

jusqu'à ce qu'elles ne puissent plus se diviser. C'est alors qu'elles produisent des gamètes, c'est ce que l'on appelle la *reproduction sexuée*. Les micro-algues, nouvellement formées, auront alors une taille normale et subiront de nouveau une multiplication asexuée [5,6].

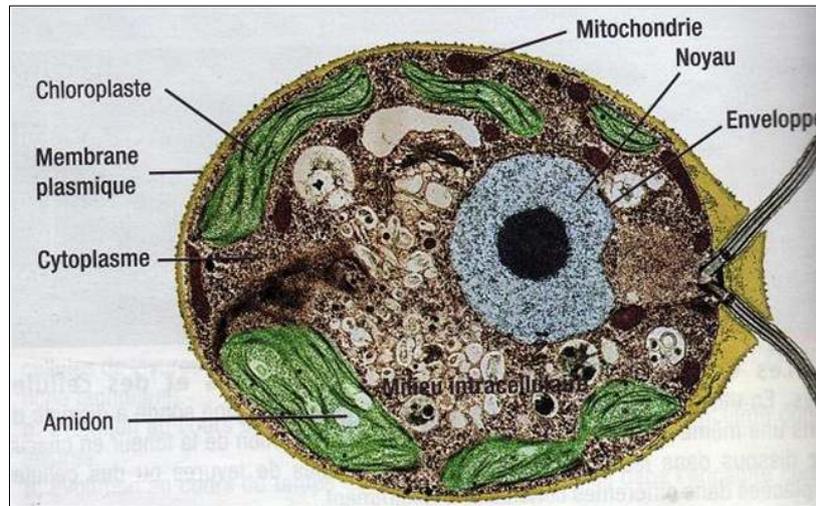


Figure I.2. Structure d'une algue unicellulaire colorée artificiellement ($\times 7000$) [6].

I. 2. Mode de nutrition

Les micro-algues sont largement et principalement connues comme étant des organismes photo-autotrophes (Tableau I.1). L'autotrophie est un mode de nutrition des micro-algues leur permettant d'utiliser les rayons solaires afin de synthétiser leur énergie. Les micro-algues de métabolisme autotrophe utilisent également une source de carbone inorganique comme le CO_2 et le HCO_3^- pour la synthèse du carbone organique [7,8]. Ce carbone organique est essentiel à la synthèse de toutes les composantes organiques nécessaires à leur survie (Figure I.1).

D'autre part, plusieurs micro-algues ont un métabolisme hétérotrophe de nutrition et celles-ci n'ont pas besoin de l'énergie solaire. Elles utilisent plutôt une source de carbone organique pour la production de l'énergie et des composants organiques [9,10].

Tableau I.1 Différents types nutritionnels des algues microscopiques [11,12].

Mode de nutrition	Source d'énergie	Source de carbone
Photoautotrophe	Radiation solaire	CO ₂ seulement
Photohétérotrophe	Radiation solaire	CO ₂ et carbone organique
Chemoautotrophe	Composé inorganique	CO ₂
Chemohétérotrophe	Composé organique	Carbone organique

Les micro-algues de métabolisme mixotrophe peuvent avoir soit un métabolisme autotrophe ou encore hétérotrophe. En effet, en absence d'énergie lumineuse, lorsqu'une source de carbone organique est disponible, le développement des chloroplastes est inhibé et ces micro-algues métabolisent leur énergie en mode hétérotrophe [7,11].

I. 3. Classification

Ce sont les pigments chlorophylliens ou non, présents dans leurs tissus, qui permettent de classer les algues en groupes, plus au moins homogènes (Tableau I.2).

Tableau I.2 Classification des micro-algues (quelques exemples) [13].

Embranchement	Classe	Ordre	Famille	Genre
Rhodophytes (algues rouges)	Rhodophycées	<i>Bangiales</i> <i>Floridées</i>		<i>Bangia</i> <i>Batrachospermum</i>
Phaeophytes (algues brunes)	Phaeophycées	<i>Fucales</i>		<i>Fucus</i>
Chlorophytes (algues vertes)	Chlorophycées	<i>Volvocales</i> <i>Chlorococcales</i> <i>Ulothrichales</i> <i>Chaetophorales</i> <i>Conjugales</i>	<i>Chlamidomonadacées</i> <i>Hydrodictyacées</i> <i>Ulothricacées</i> <i>Chaetophoracées</i> <i>Zygnematacées</i>	<i>Chlamydomonas</i> <i>Pediastrum</i> <i>Hormidium</i> <i>Draparnaldia</i> <i>spirogyra</i>
Cyanophytes (algues bleues)	Myxophycées	<i>Chroococcales</i> <i>Hormogonales</i>	<i>Chroococcacées</i> <i>Oscillatoriacées</i>	<i>Microcystis</i> <i>Oscillatoria</i>
Euglénophytes	Euglénophycées	<i>Euglénales</i>	<i>Euglénacées</i>	<i>Eugléna</i>

I.3.1. Algues rouges

Sur trois milliers de représentants, quelques espèces d'algues rouges sont présentes en eaux douces, mais la plupart sont marines que nous rencontrons en particulier sur les côtes tropicales et subtropicales. Leur couleur varie du noirâtre à de multiples nuances de rouge : brun rouge, lie-de-vin, rouge sang, rouge vif, rose violacé, rose. Ces teintes découlent de la présence de la phycoérythrine rouge, ou de la phycocyanine bleue, qui masque la chlorophylle-*a*.

Les autres caractéristiques des algues rouges portent sur la présence de synapses, des perforations des parois entre les cellules, obturées par des bouchons évoquant des têtes de rivet, et sur la composition chimique des parois cellulaires, riches en gélose ou carraghénane selon les espèces. Les réserves carbonées produites par la photosynthèse sont constituées d'un amidon particulier, l'amidon floridien, toujours situé hors des chloroplastes [14].

I.3.2. Algues brunes

Les plastes bruns de ces algues, qui comptent quelque 1500 espèces, contiennent trois chlorophylles (*a*, *c*₁ et *c*₂), plus ou moins masquées par divers pigments jaunes et oranges, en particulier la fucoxanthine. Les parois des celluloses sont riches en un polysaccharide particulier, l'acide alginique, présent sous forme d'alginate (sels de l'acide alginique). Le pyrénioïde (corpuscule contenu dans le plaste et impliqué dans la photosynthèse), quand il existe, fait saillie à la surface des chloroplastes, et les composés carbonés de réserve produits par la photosynthèse sont dissous dans des vacuoles. L'amidon est toujours absent chez les phéophycées. Par ailleurs, le cytoplasme des cellules contient de petites vacuoles spécialisées, les physodes remplies de composés phénoliques [14].

I.3.3. Algues vertes

Les algues vertes, réunissant entre 6000 et 7000 espèces, constituent le plus grand groupe d'algues. La forme fossile la plus ancienne connue date de deux milliards d'année. Comme les végétaux supérieurs, elles possèdent deux chlorophylles (*a* et *b*). Leurs réserves carbonées issues de la photosynthèse sont constituées d'amidon accumulé dans les plastes, et leurs parois cellulaires ont la cellulose pour principal composant. Les algues vertes unicellulaires, *cosmopolites*, sont majoritairement des algues d'eau douce, et constituent une grande part du phytoplancton [13].

I.3.4. Cyanobactéries ou algues bleues

« *Cyanobactéries* » est le nom scientifique que nous donnons aux algues bleues qui flottent à la surface des étangs. Les premières espèces identifiées étaient de couleur bleue, et c'est de là que les algues tiennent leur nom. Les espèces identifiées depuis sont de diverses couleurs, allant du vert olive au rouge [15].

Les algues bleues peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires, dans ce dernier cas, leurs cellules s'arrangent en amas de type colonies ou, le plus souvent en filaments composés de cellules alignées (ces filaments sont appelés *trichomes*) [16]. Elles sont composées de cellules, qui peuvent contenir des poisons, les toxines cyanobactériennes (les *cyanotoxines*).

I.3.5. Autres algues

D'autres algues sont également retrouvées dans les milieux très riches en nutriments organiques; ce sont des euglénophycées dont les genres les plus fréquemment rencontrés sont: *Trachelomonas*, *Phacus*, et *Euglena* [17].

I.4. Utilisation

La biodiversité des micro-algues est énorme puisque nous estimons qu'il y a entre 200 000 et plusieurs millions d'espèces. Certaines espèces pouvant produire une quantité d'huile plusieurs fois supérieure à celle des oléagineux terrestres, ce qui explique le projet de faire des biocarburants à partir de ces micro-algues. Parmi les principales classes ou phylums, certaines espèces de micro-algues possèdent un potentiel intéressant pour la production de biodiesel en raison de leur importante production d'acides gras. Ces principales espèces sont présentées dans le Tableau I.3 [11].

Tableau I.3 Principales espèces de métabolisme hétérotrophe pour la production de biodiesel.

Phylum ou Classe	Espèce	Contenu en huiles (% poids sec)	Référence
Chlorophycées	<i>Chlorella vulgaris</i>	56,6	[18,19]
Chlorophycées	<i>Chlorella</i>	44,3-48,7	[20]
Bacillariophycées	<i>Nitzschia sp.</i>	45-47	[21,22]
Dinoflagellées	<i>Cryptocodinium</i>	20-30	[21,23]
Chrysophycées	<i>Schyzochytrium</i>	50-77	[21,22]

I.5. Conséquences de l'eutrophisation sur le traitement de potabilisation

Le phénomène d'eutrophisation rend le traitement de potabilisation des eaux des retenues complexe et coûteux. En effet, le phénomène influe négativement sur l'ensemble de la chaîne de traitement, notamment aux niveaux suivants:

Pré-chloration : Le premier effet de l'eutrophisation est l'augmentation de la matière organique endogène et la libération du manganèse et du fer, ce qui augmente la demande en chlore et accroît la probabilité de la formation de trihalométhanes qui sont cancérigènes pour l'Homme.

Coagulation : L'eau brute provenant des retenues eutrophes favorise, à cause de l'augmentation du pH, la dissolution d'une partie du coagulant qui reprécipite dans le réseau de distribution dès que les conditions de pH sont modifiées, augmentant ainsi la turbidité de l'eau et favorisant la formation de nids de développement bactérien. L'on se trouve donc contraint, soit d'acidifier l'eau par surdosage de sulfate d'alumine ou par injection d'un acide (coagulation améliorée).

Filtration : Un grand nombre d'algues provoque le colmatage rapide des filtres à sable, réduisant ainsi la période d'opération entre deux lavages,

Elimination des goûts et odeurs : L'apparition de mauvais goûts et odeurs dans l'eau est sûrement la conséquence la mieux connue du phénomène d'eutrophisation. Un grand nombre d'algues favorise l'apparition de saveurs diverses dans l'eau (saveurs d'herbes, de poisson, voire odeurs septiques) [1,24].

Face aux normes des rejets de plus en plus sévères et aux coûts élevés du traitement des eaux usées et eaux destinées à la consommation humaine, les procédés physico-chimiques classiques atteignent leurs limites dans leur dépollution. Alors, et en vue d'améliorer les performances du traitement, le procédé d'électroflotation (EF) (soit en régime discontinu ou en régime continu), s'est présenté comme une technique de séparation alternative aux procédés physico-chimiques classiques particulièrement pour les micro-algues [25,26].

II.1. Définition

L'EF constitue la version électrochimique de la flottation traditionnelle par air dissous. C'est un procédé électrochimique qui permet une séparation liquide/solide par flottation grâce à la production de fines bulles d'hydrogène et d'oxygène, produites par l'électrolyse de l'eau à traiter en utilisant des électrodes insolubles, qui entraînent dans leurs mouvements ascensionnels les flocs ainsi formés. A la fin du traitement, il se produit une bonne séparation solide liquide [27-29].

II.2. Théorie

Dans un milieu liquide, le courant permet l'électrolyse de l'eau et donc la génération de microbulles de gaz (hydrogène et oxygène). Les gaz formés aux électrodes progressent vers la surface du liquide sous forme de bulles qui se fixent aux particules solides, entraînant celles-ci vers le haut. Ces particules peuvent ainsi former une nappe à la surface (flocs), soutenue par les bulles de gaz, sous laquelle reste le liquide clair. Plus de 90% des combinaisons entre les microbulles et les particules en suspension se produisent pendant les premières minutes dans la cellule d'EF [30,31]. Les réactions chimiques qui sont produites à la surface des électrodes pour générer les bulles de gaz sont les suivantes :

Réaction à l'anode : oxydation



Réaction à la cathode : réduction



Réaction totale :



II.3. Domaines d'utilisation

Historiquement, l'EF a trouvé des applications dans l'industrie minière (pour la séparation de fines particules dans une solution) [32,33], le prétraitement de l'eau usée, dans l'industrie des transports (automobile, véhicules industriels, aéronautique et chemins de fer) où elle est employée pour traiter les effluents des ateliers d'assemblage et des unités de réparation/maintenance [34] et dans l'industrie laitière, textile, métallurgique, galvanoplastique et agroalimentaire pour l'épuration des effluents [35,36]. Des résultats très intéressants ont été également obtenus pour l'extraction du Mn [37], aussi pour l'enlèvement du Plomb, arsenic, nitrates et fluorures de l'eau [38-40].

D'autre part, l'EF s'intègre facilement dans les ensembles de traitements électrolytiques notamment avec des techniques telles que l'électrocoagulation, elle permet en particulier de récupérer les métaux lourds présents dans les effluents de rinçage de pièces qui ont subi des traitements électrochimiques [34]. En outre, le traitement des eaux usées et la récupération des huiles et des protéines ont été les principales applications de ce procédé dans l'industrie alimentaire [41-43]. En général, pour le traitement des eaux usées la combinaison de l'électrocoagulation et de l'EF a été la principale application [44]. Dans le domaine de fruits et de légumes, peu d'applications ont été mises en place jusqu'à présent. Parmi celles-ci, on

peut mentionner : le traitement des effluents de l'industrie du vin [45], l'extraction de protéines du jus de luzerne [46] et la clarification du jus de pomme [47].

II.3. Avantages et inconvénients

L'EF est une technique de traitement/épuration des eaux qui, sans doute, présente des avantages ainsi que des inconvénients.

II.3.1. Avantages

En généralité, l'EF a trois avantages principaux qui la différencient des autres techniques :

- Des bulles très fines et dispersées avec un diamètre moyen de 20 μm . Cela augmente la surface de contact entre les particules en suspension et les bulles. De plus, les bulles formées sont uniformes.
- En variant la densité de courant, il est possible de créer n'importe quelle concentration de bulles dans le milieu de flottation, augmentant ainsi la probabilité de collision entre les bulles et les particules.
- Le choix de conditions de solution et d'une surface d'électrode appropriée permet d'obtenir des résultats de séparation optimaux [42].

Les autres avantages de l'EF incluent des coûts de démarrage et d'opération compétitifs, la capacité d'adaptation à des variations de débits, un faible temps de résidence, un volume de boues réduit, simplicité de l'installation et moindre encombrement, technique autorisant une automatisation poussée, un haut taux d'élimination de la demande biologique en oxygène (DBO) due à l'oxydation des molécules organiques à l'anode et aussi à l'élimination des graisses et huiles. De plus, la montée des floes à la surface donne une écume contenant de 9 à 12% de solides [31].

II.3.2. Inconvénients

- L'effluent doit avoir une conductivité suffisante.
- L'effluent doit avoir une valeur de pH comprise entre 6 et 8.
- L'effluent doit être exempt de grosses particules (prétraitement préalable nécessaire).
- La température de l'effluent doit être inférieure à 50°C afin de ne pas éclater les microbulles [48].

III.1. Matériels et méthodes

III.1.1. Réactifs

- Chlorure d'hydrogène (acide chlorhydrique).
- Hydroxyde de sodium.
- Lugol.

III.1.2. Matériels

- Générateur du courant électrique de type ELEKTROLYSER /ARBEITSPLATZ I (10 A 15 V).
- Multimètre digital de marque DT830B (pour mesurer l'intensité du courant électrique).
- pH-mètre de type Inolab level 1.
- Conductimètre de type HANNA instruments.
- Agitateurs magnétiques de type VWR.
- Bac en plexiglas (21 cm × 5,5 cm × 8 cm).
- Electrodes en acier inoxydable (4,5 cm × 20 cm).
- Verrerie de laboratoire (pipettes, éprouvettes, etc.).
- Barreaux magnétiques.
- Microscope inversé (au niveau des laboratoires de l'ANRH).

III.2. Mode opératoire

III.2.1. Nettoyage des électrodes

L'un des facteurs influençant l'efficacité d'un procédé électrochimique est l'état des électrodes, ces dernières doivent être propres. Pour ce faire, nous devons les nettoyer avant chaque essai afin d'éviter toutes sortes d'impureté.

- *Étapes de nettoyage des électrodes en acier inoxydable :*
 - ✓ 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 chlorhydrique (HCl à 20% en masse) pendant 10 min.
 - ✓ Rinçage avec de l'eau distillée.

III.2.2. Étapes de travail

- **Traitement par EF**

Dans cette étude, nous avons joué sur plusieurs paramètres pour tirer les conditions optimales à l'élimination des micro-algues. Nous citons : le pH du milieu, le voltage appliqué, le temps d'EF et la distance inter électrodes. Dans un bac en plexiglas rempli à 600 mL de l'eau de barrage et après la mesure de sa conductivité et son pH, nous plongeons les électrodes nettoyées (surface active égale $46,75 \text{ cm}^2$). Le traitement par EF a été réalisé sur une installation montée au laboratoire, elle est composée de deux électrodes en acier inoxydables trouées et posées horizontalement, l'anode branchée sur le pôle positif et la cathode sur le pôle négatif du générateur du courant. La Figure III.1 montre le schéma du dispositif expérimental de l'EF.

- **Décantation**

Une fois le traitement prend fin, nous laissons décanter la solution pendant 20 min pour que les floes formés au cours du traitement restant en suspension puissent sédimenter.

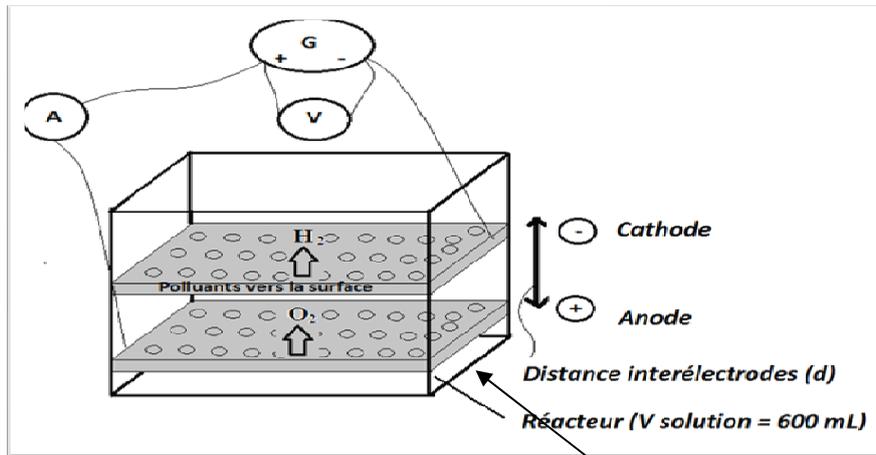


Figure III.1. Dispositif expérimental de l'EF [31].

- **Prélèvement**

Après décantation, et à l'aide d'une pipette, nous prélevons soigneusement 25 mL de la solution pour les analyses nécessaires. L'EF modifie le pH initial de la solution ainsi que sa conductivité, alors qu'il été nécessaire de les mesurer avant et après traitement pour voir réellement l'effet de l'EF sur ces deux paramètres.

- **Fixation des micro-algues**

Nous mettons les échantillons dans la chambre Uthermol ou bien dans des tubes de capacité de 10 mL (c'est le volume concentré), nous ajoutons une goutte de Lugol pour fixer les micro-algues et nous les laissons décanter pendant 24 h. Nous récupérons le sédiment sur la lamelle du microscope inversé (au niveau des laboratoires de l'ANRH).

- **Analyse algologiques**

Sur ces échantillons, les espèces ont été identifiées et dénombrées au microscope inversé (Figure III.2) selon la méthode d'Utermohl (1958) modifié par Legendre et Watt (1971-1972) [49,50].



Figure III.2. Microscope inversé.

- **Calcul de la concentration en microalgues**

Le nombre d'algues par millilitre est calculé par la relation suivante :

$$N \text{ (alg.mL}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Nombre d'organismes dénombrés} \times \text{Nbre de champs} \times 1000}{\text{Nombre de champs prospectés} \times \text{Volume concentré}} \quad \text{(III.1)}$$

- **Calcul du rendement d'élimination des microalgues**

Nous appliquons la relation suivante pour le calcul des pourcentages de réduction des microalgues :

$$R(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad \text{(III.2)}$$

Où :

C_i : Concentration initiale des microalgues (avant traitement).

C_f : Concentration finale des microalgues (après traitement).

L'objectif de cette étude est de mettre au point le traitement des eaux brutes du Barrage Ghrib (BG) par un procédé électrochimique, en l'occurrence l'électroflottation (EF), en discontinu et en utilisant des électrodes en acier inoxydable. L'évaluation de ce procédé a porté sur la diminution des micro-algues qui se trouvent dans l'eau par mesure de leur nombre avant et après traitement.

IV.1 Présentation du Barrage Ghrib (BG)

Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. En Algérie, l'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants liés à l'essor démographique et le développement accéléré des activités économiques, notamment l'agriculture et l'industrie. Mais pour une bonne gestion, la connaissance de ces ressources en eau et de leur qualité est une condition nécessaire [51]. Nous allons présenter quelques généralités sur le BG.

IV.1.1. Aperçu géographique

Le BG est situé dans la Wilaya de Ain-Defla à 155 km d'Alger à l'aval de l'un des plus longs oueds algériens, l'oued Chélif qui prend sa source dans l'Atlas Saharien (Figure IV.1). Sa capacité est de 145,2 hm³, avec une superficie de 2800 km². Bien que la fonction principale de ce plan d'eau soit la production d'eau potable destinée à l'alimentation des villes principalement de Médéa et de Berrouaghia, il est utilisé aussi pour l'usage agricole. Le BG représente une richesse naturelle aux potentielles économique et culturelle variées. C'est une importante réserve d'eau destinée à l'alimentation et à l'irrigation. De plus ce plan d'eau constitue un environnement touristique attrayant (Figure IV.2) [52].

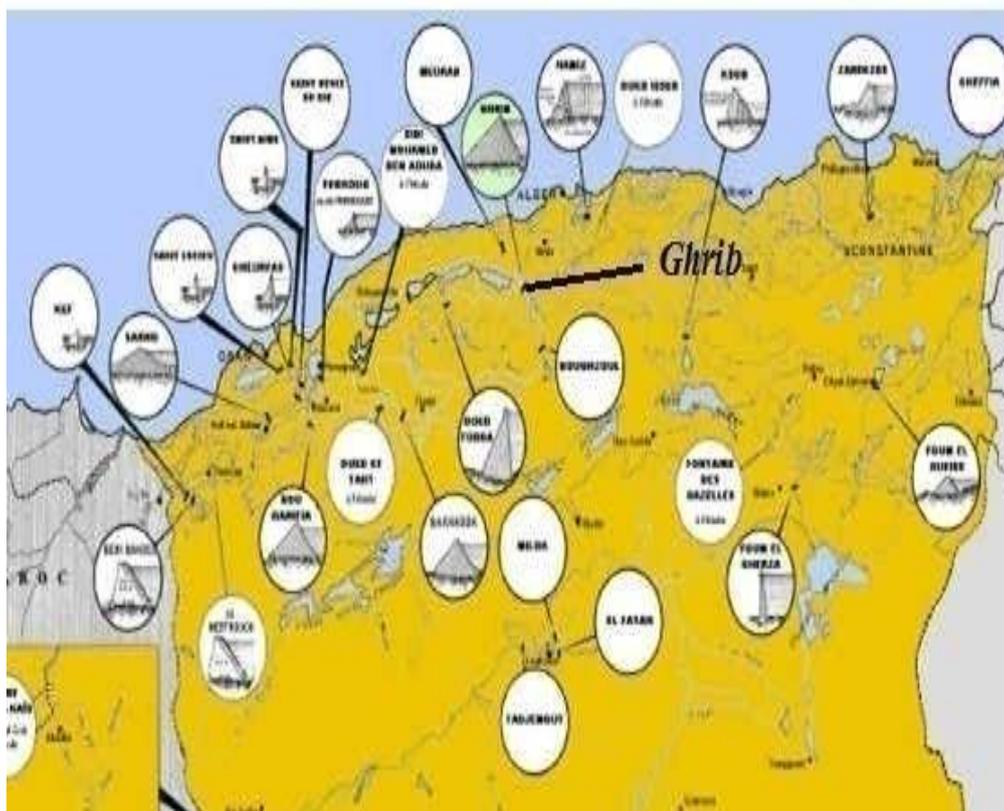


Figure IV.1. Plan de situation du BG.



Figure IV.2. Vue du BG.

Cependant, l'accroissement rapide des activités humaines a provoqué au cours de ces dernières années une eutrophisation croissante de cet écosystème. En effet, ce barrage par le biais des oueds reçoit d'une part les rejets de plusieurs agglomérations et d'autre part les engrais agricoles, cela entraîne son enrichissement en éléments nutritifs entraînant une perturbation de ce système lacustre. Cela se traduit par une prolifération des micro-algues qui constitue la manifestation la plus caractéristique de ce dysfonctionnement [53].

IV.1.2. Caractéristiques de l'eau brute du BG

IV.1.2.1. Paramètres physicochimiques

Avant d'étudier l'efficacité de l'EF sur l'élimination des micro-algues, nous avons fait une collection des caractéristiques de l'eau du BG pendant la durée de l'étude allant du mois de Février au mois d'Août. Les données physicochimiques enregistrées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (l'ANRH) sont regroupées dans le Tableau IV.1. Les échantillons ont été prélevés à la surface du BG.

Le régime thermique (T°C) des eaux superficielles du plan d'eau suit celui du climat méditerranéen ; il est doux en hiver et en printemps et élevé pendant l'été. Les valeurs du pH tendent vers l'alcalinité, ceci s'explique probablement par la ventilation du milieu. Les valeurs de la conductivité électrique sont très élevées, les maximas ont été enregistrés au mois de février. La présence de la matière organique (MO) (maximale au mois de Mars, oxydabilité au KMnO_4 , $7,9 \text{ mg.L}^{-1}$) pourrait être d'origine soit endogène générée au cours des processus biologiques au sein du milieu, principalement, l'excrétion algale, la lyse cellulaire et la sénescence algale soit d'origine exogène apportée par le lessivage des sols [54-56].

Les fortes teneurs des concentrations en ions chlorures sont enregistrées au mois de Juin. Selon Cherbi [56], cette teneur pourrait s'expliquer par la nature du terrain du bassin versant situé sur un sol salin et par des rejets d'eaux usées [56].

Par ailleurs, les concentrations élevées de la dureté calcique (91°F) au cours du mois de Juin sont dues à la nature géologique du bassin versant du BG qui contient des roches calcaires.

D'une manière générale, l'eau du BG est de très mauvaise qualité à cause de la concentration des sulfates, ce qui peut devenir un facteur limitant à la productivité de ce lac. Par ailleurs, l'absence de roches gypseuses et de pyrites laisserait supposer que l'origine de ces teneurs très élevées est due essentiellement aux rejets des eaux usées. Selon Cornaz [57], la décomposition des sulfates en milieu anoxique aboutit à la formation de l'hydrogène sulfaté toxique pour la faune et pourrait être à l'origine d'une eau d'odeur et de goût désagréable [57].

Les résultats obtenus dans cette étude confirment clairement que l'eau du BG est alcaline, dure, sulfatée, chlorurée et calcaire. Certaines valeurs comme les chlorures, les sulfates et le calcium dépassent les normes ce qui peut engendrer un risque sur la santé des consommateurs (formation de calculs rénaux, irritations gastro-intestinales, etc.).

Tableau IV.1. Paramètres physicochimiques de l'eau du BG prélevées à la surface pendant la période : Février – Juin 2011 [58].

Paramètres	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Ca ²⁺ (mg.L ⁻¹)	125	162	188	162	191	184	176
Mg ²⁺ (mg.L ⁻¹)	100	90	87	89	105	96	91
Na ⁺ (mg.L ⁻¹)	421	335	229	401	320	278	330
K ⁺ (mg.L ⁻¹)	11	10	4	4	5	8	6
Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	446	430	463	455	540	408	420
SO ₄ ²⁻ (mg.L ⁻¹)	740	695	680	783	750	715	808
NO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	2,2	2,9	2,4	4,8	2,9	2,3	7,6
pH	7,9	7,9	8,0	8,0	8,0	7,9	7,9
Conductivité (μS.cm ⁻¹)	3300	3000	2610	3000	3000	2760	3100
Minéralisation (mg.L ⁻¹)	2046	1860	/	/	/	/	/
Résidu sec (mg.L ⁻¹)	2397	2112	1644	2008	1769	1770	1905
TH (°F)	73	78	83	78	91	86	82
TAC (°F)	12	17	11	13	11	10	9
TA (°F)	0	0	0	0	0	0	0
NO ₂ ⁻ (mg.L ⁻¹)	0,034	0,072	0,000	0,000	0,075	0,000	0,069
NH ₄ ⁺ (mg.L ⁻¹)	0,194	0,264	0,100	0,135	0,069	0,033	0,047
MO (mg.L ⁻¹)	6,0	7,9	6,0	7,6	7,4	6,5	7,2
O ₂ (mg.L ⁻¹)	10,2	9,5	5,9	6,6	6,7	9,0	6,9
O ₂ (%)	90,0	99,4	62,8	75,6	72,9	116,2	93,0
T _{eau} (°C)	10,0	18,0	18,0	21,0	19	26	28
DCO (mg.L ⁻¹)	9,0	9	34	18	16	9	/
DBO ₅ (mg/L)	4,0	/	/	/	/	/	/
MES à 105°C	28	/	10	21	9	7	/
MES à 600°C	12	/	3	19	9	/	/
Turbidité (NTU)	4,2	2,7	/	/	/	2,7	/

IV.1.2.2. Paramètres algologiques

Le Tableau IV.2 regroupe les analyses algologiques (identification et dénombrement des micro-algues) de l'eau brute du BG prélevée à la surface au mois d'Avril.

Les espèces les plus fréquentes sont des micro-algues de la classe des bacillariophycées, du genre *Cyclotella*. D'autres apparaissent périodiquement : *Synedra* (de la même classe), *Scenedesmus* (*S. dimorphus* et *S. quadricauda*), *Volvox carteri*, *Tetraedron* (*T. caudatum* et *T. minimum*) et *Causmarium depressum* de la classe des chlorophycées (voir Annexe).

Tableau IV.2. Analyses algologiques de l'eau de surface du BG du mois d'Avril.

Classe	Genre	Espèce	Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bacillariophycée	<i>Synedra</i>			1	3		1					
Bacillariophycée	<i>Cyclotella</i>	<i>comta</i>	20	20	16	18	21	20	20	19	16	20
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>	1									1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>				5				1		
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	2								3	
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>					1					
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>			2					1		
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>		2								2
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>	1									

IV.2. Remarques et phénomènes observés au cours de l'EF

Pendant toutes nos expériences, les phénomènes observés sont les suivants :

- dégagement des bulles de gaz au niveau des électrodes ;
- formation et entrainement des floccs par les bulles des gaz formés ;
- après flottation des floccs, l'eau devient claire ;

En EF, avec des électrodes en acier inoxydable, l'anode dégage de l'oxygène et la cathode produit le gaz d'hydrogène, ayant pour conséquence la flottation des floes à la surface [40]. A partir des réactions citées dans l'étude bibliographique, nous pouvons constater que pour 4 électrons de courant qui passent entre les électrodes, une molécule d'oxygène et deux molécules d'hydrogène sont formées. Le processus physique d'évolution des gaz peut être divisé en trois étapes : la nucléation, la croissance et le détachement. Les bulles se forment à la surface des électrodes à partir des solutions hautement sursaturées en gaz. Elles croissent ensuite par diffusion des gaz dissous et elles se détachent ensuite de l'électrode [48]. La dimension des bulles formées à la surface des électrodes varie entre 22 et 50 μm de diamètre selon les conditions expérimentales [59]. L'efficacité de la technique d'EF dépend du flux et de la dimension des microbulles qui sont générées pendant l'électrolyse de l'eau.

IV.3. Paramètres influençant l'EF

L'influence des paramètres opératoires de l'EF (densité de courant i , temps d'EF t , distance inter-électrodes d , etc.) et des propriétés physico-chimiques de l'eau polluée avant traitement (pH du milieu, conductivité de l'eau) a été étudiée dans le but d'atteindre notre objectif.

IV.3.1. Temps d'EF

Le temps d'EF joue un rôle très important, ainsi le traitement se déroule jusqu'à un temps optimal. La Figure IV.3 montre l'évolution du taux d'élimination des micro-algues en fonction du temps d'EF, les autres paramètres sont maintenus constants : $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$. Nous avons remarqué que l'écume des floes entraînés à la surface par les bulles des gaz formés devient plus dense en fonction du temps.

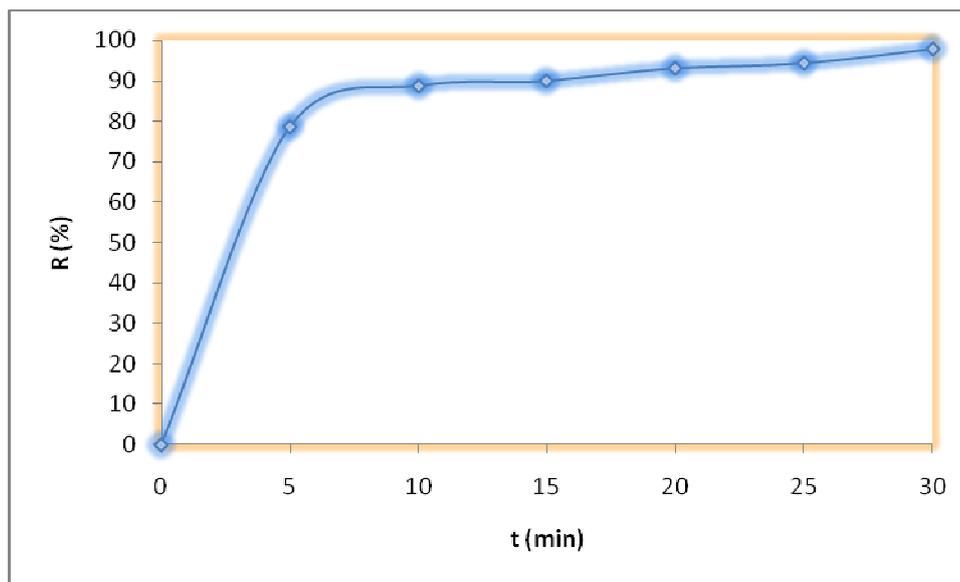


Figure IV.3. Taux d'élimination des micro-algues en fonction de t [$pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$].

A la lecture de la Figure IV.3, il apparaît qu'en fonction de t l'efficacité de l'EF devient meilleure. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Holt et al. [60], ainsi, plus de 90% des combinaisons entre les microbulles et les particules en suspension se produisent pendant les premières minutes dans la cellule d'EF [30,31].

IV.3.2. Densité de courant

Il s'agit, pour l'instant, de répondre à la question suivante : pour quel débit de charges l'élimination des micro-algues serait la meilleure? En effet, la densité de courant i est un paramètre critique dans les procédés électrochimiques, puisqu'il peut être commandé directement et il détermine directement le taux des bulles de gaz générées. Les sources bibliographiques rapportent que i est comprise entre 10 et 150 A/m^{-2} , les valeurs élevées sont désirables pour les processus de séparation liquide/solide [43,61].

L'effet de ce paramètre sur l'élimination des micro-algues est indiqué par les courbes montrées sur la Figure IV.4. Les densités appliquées sont : 29, 103 et 170 A.m⁻², ces valeurs correspondent respectivement aux potentiels suivants : 4, 8 et 12 V.

Nous avons remarqué que le dégagement des bulles d'hydrogène et d'oxygène et la densité de l'écume augmentent avec i .

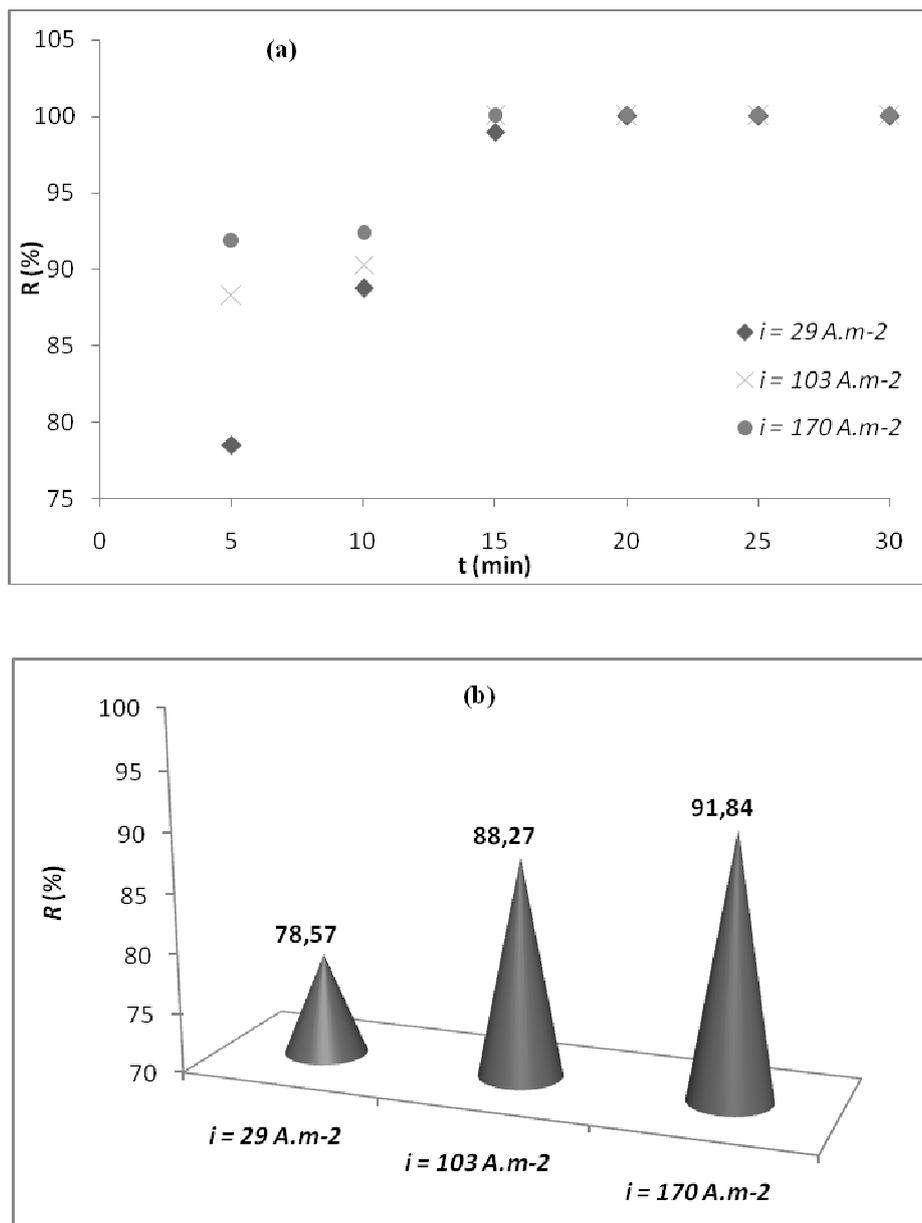


Figure IV.4. Effet de la densité de courant i sur l'efficacité de l'EF [$pH = 7,8$; $d = 2$ cm]

(a) : en fonction du temps ; (b) : $t = 5$ min.

D'après la Figure IV.4, l'élimination des micro-algues évolue avec i , suite à un fort dégagement des bulles des gaz formées au niveau des électrodes et il est clair que l'influence est importante (Figure IV.4.a) : au bout de 5 min, le pourcentage de réduction est atteint à plus de 90 % pour $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$.

Par ailleurs, il a été démontré que la taille des bulles des gaz dégagées au niveau des électrodes diminue avec l'augmentation de i , conduisant à un débit plus rapide à la hausse et la flottation des micro-algues [60,62].

IV.3.3. pH initial de l'eau brute

Il est bien connu que le pH est l'un des principaux facteurs qui contrôlent la performance de l'EF. Cependant, l'influence du pH sur l'élimination des micro-algues n'est pas encore claire [63-65].

Pour examiner son effet, le pH des solutions a été ajusté aux valeurs 4 et 6 (milieux acides), 7,8 (sans ajustement) et 10 (milieu basique), tout en maintenant les autres paramètres constants : $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$, ainsi qu'avec t allant de 5 jusqu'à 30 min. Les résultats sont représentés sur la Figure IV.5.

D'après la Figure IV.5, l'élimination des micro-algues par EF est efficace dans toute la gamme du pH choisie (4-10 ; $R = 65-100\%$), donc il est préférable de traiter les eaux de BG en milieu neutre (c'est-à-dire sans ajustement du pH). Des études précédentes ont montré que les procédés électrochimiques sont plus efficaces à des pH neutres [31,66].

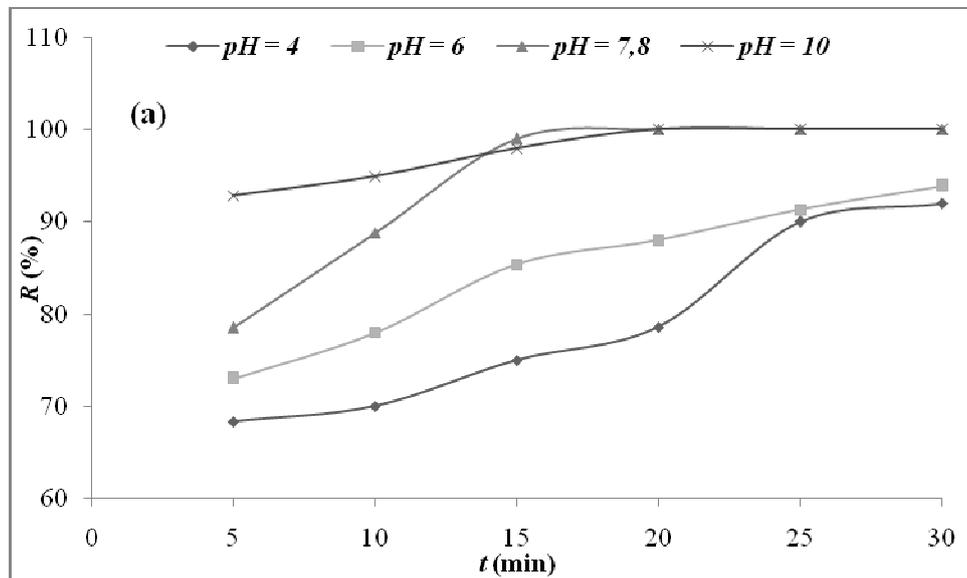


Figure IV.5. Influence du pH sur l'efficacité de l'EF [$i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$]

Nous avons également suivi l'évolution du pH en fonction de t (Figure IV.6), cette évolution dépend du pH initial de la solution.

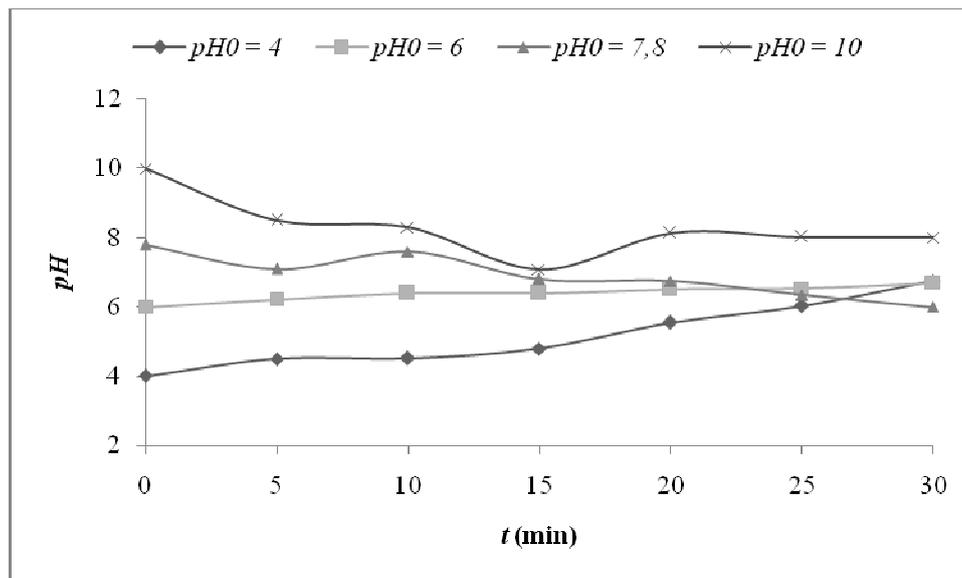


Figure IV.6. Evolution du pH au cours de l'EF.

D'après la Figure IV.6, le pH augmente par rapport à celui initial à des pH inférieurs à 7. Par contre il diminue pour les solutions à pH initial supérieur à 7. En d'autres termes, l'EF a tendance à neutraliser le pH ou le ramener vers la neutralité [31].

IV.3.4. Distance inter électrodes

L'un des paramètres influençant le traitement par EF est la distance entre l'anode et la cathode (dite distance inter électrodes). Aussi, c'est un paramètre tout comme la densité de courant i , que nous pouvons le fixer ou le varier d'une expérience à une autre. Ce paramètre a été évalué suite à plusieurs essais à différents temps tout en fixant les autres facteurs (nous avons choisi deux distances $d = 1$ et 2 cm selon la particularité dimensionnelle de notre dispositif expérimental). Les résultats sont montrés sur la Figure IV.7.

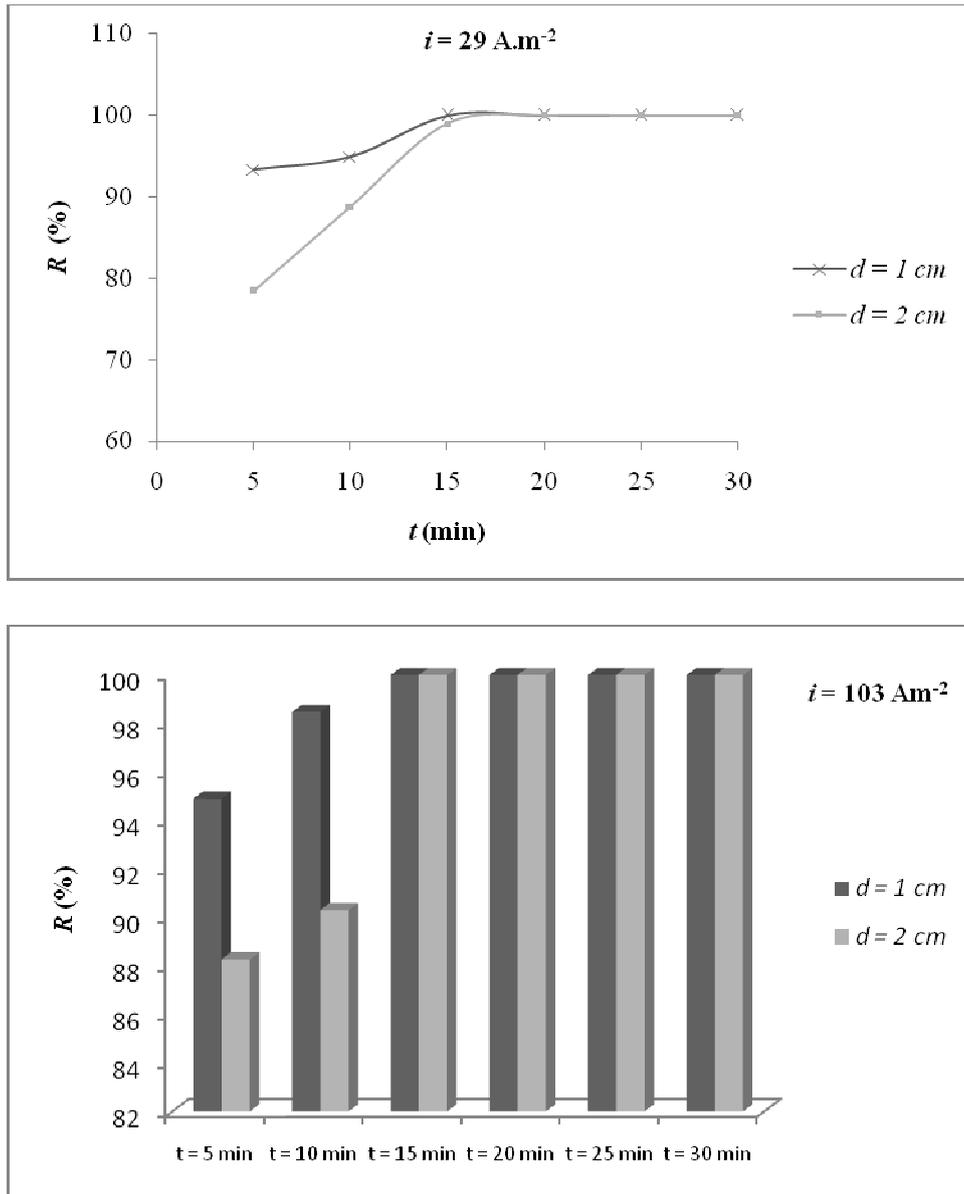


Figure IV.7. Influence de la distance inter électrodes d sur l'efficacité de l'EF.

En examinant les courbes de la Figure IV.7, l'efficacité du traitement augmente en diminuant d , plus de 90% de réduction des micro-algues ont été atteints au bout de 5 min seulement.

IV.3.5. EF des eaux du Barrage Lakhel et conductivité de l'eau

La conductivité de l'eau est l'un des facteurs influençant l'efficacité des procédés électrochimiques. En fait, pour une eau à traiter par EF, une conductivité élevée est avantageuse si elle n'est pas nécessaire [67].

Afin d'examiner son effet, nous avons essayé de traiter des eaux du Barrage Lakhel (BL) ayant une conductivité plus faible que celle des eaux du BG (et réputé d'avoir une eutrophisation plus prononcée que le BG) et de comparer les phénomènes observés et les résultats obtenus.

Le BL est situé à 5 km d'Ain-Bessam dans la Wilaya de Bouira et à 150 km d'Alger, il est implanté à la confluence des Oueds Lakhel et Fahem. Les principales caractéristiques de ce barrage sont résumées au Tableau IV.3.

Tableau IV.3. Caractéristiques morphométriques du BL.

Capacité de la retenue (m ³)	30 millions
Superficie du bassin versant (km ²)	189
Profondeur moyenne (m)	25
Profondeur maximale (m)	45

Le climat de la région est sujet à l'influence de la mer mais avec une tendance continentale, l'hiver est plus long avec des températures basses, l'été est plus chaud et moins humide que sur le littoral. Le mois le plus froid est Janvier où la température minimale enregistrée est de 5°C, le mois le plus chaud est Août avec une température maximale de 36,5°C [58,68].

Le Tableau IV.4 regroupe les paramètres physicochimiques des eaux brutes des deux BG et BL (avant traitement). Les eaux du BL ont un pH voisin de la neutralité avec un léger caractère alcalin et leurs conductivité indique qu'elles sont peu minéralisées donc

relativement douces. Contrairement au BG, l'eau de surface qui l'alimente vient d'une région saline (conductivité 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et passe par des sols calcaireux et gypseux [69].

Tableau IV.4. Paramètres physicochimiques des eaux du BG et BL prélevées le mois de Février à la surface [58].

Paramètres	BG	BL
Ca^{2+} (mg.L ⁻¹)	125	58
Mg^{2+} (mg.L ⁻¹)	100	30
Na^+ (mg.L ⁻¹)	421	78
K^+ (mg.L ⁻¹)	11	7
Cl^- (mg.L ⁻¹)	446	72
SO_4^{2-} (mg.L ⁻¹)	740	189
NO_3^- (mg.L ⁻¹)	2,2	2,0
pH	7,9	7,2
Conductivité ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	3300	900
Minéralisation(mg.L ⁻¹)	2046	558
Résidu sec (mg.L ⁻¹)	2397	536
TH (°F)	73	28
TAC (°F)	12	15
TA (°F)	0	0
NO_2^- (mg.L ⁻¹)	0,034	0,274
NH_4^+ (mg.L ⁻¹)	0,194	1,424
MO (mg.L ⁻¹)	6,0	7,0
O_2 (mg.L ⁻¹)	10,2	8,8
O_2 (%)	90,0	92,5
T_{eau} (°C)	10,0	18,5
DCO (mg.L ⁻¹)	9,0	14
DBO_5 (mg.L ⁻¹)	4,0	11,0
MES à 105°C	28	8
MES à 600°C	12	2
Turbidité (NTU)	4,2	6,3

La Figure IV.8 représente les résultats obtenus lors de l'EF des eaux brutes des deux barrages pour $t = 15$ min, $d = 2$ cm, sans ajustement du pH et en fonction de i . Au cours de

l'EF, le dégagement des bulles des gaz, l'épaisseur de l'écume et l'élévation de la température sont plus importantes dans le cas de l'eau du BG à cause de sa forte minéralisation.

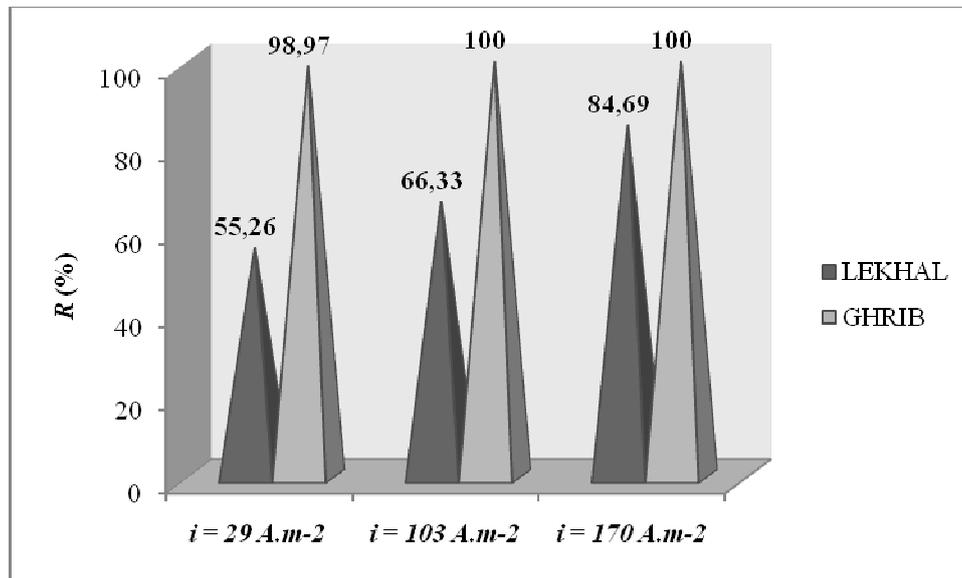


Figure IV.8. Influence de la conductivité de l'eau sur l'efficacité du traitement
[$t = 15 \text{ min}$; $d = 2 \text{ cm}$].

La Figure IV.8 montre que l'efficacité du procédé d'EF augmente avec la conductivité. Une élévation de la conductivité favorise un bon transfert entre électrodes ce qui réduit la résistance de la solution à faire passer le courant électrique [70-72].

CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de démontrer l'intérêt de l'application de la technique d'électroflottation (EF) dans le traitement des eaux du Barrage Ghrib (Wilaya d'Ain-Defla) riches en micro-algues. Pour ce faire, nous avons étudié les paramètres opératoires tels que : la densité de courant i , le temps d'électrolyse t , le pH initial et la salinité du milieu, ainsi que la distance d séparant les deux électrodes en acier inoxydable. Nous avons démontré que ces paramètres ont une forte influence sur l'efficacité du traitement.

En effet, une élimination totale des micro-algues ($R = 100\%$) a été obtenue dans les conditions opératoires optimales, à savoir : $i = 10 \text{ A m}^{-2}$, $t = 15 \text{ min}$, $d = 1 \text{ cm}$ et sans ajustement du pH.

En plus, pour voir l'effet de la conductivité de l'eau à traiter sur l'efficacité de l'EF, nous avons appliqué ce procédé à l'eau du Barrage Lakhal (Wilaya de Bouira) ayant une conductivité plus faible par rapport à celle de l'eau du Barrage Ghrib. Nos essais nous ont révélé que nous avons atteint aussi une élimination totale des micro-algues mais avec un temps d'électrolyse plus prolongé.

Enfin, nous pouvons conclure que le procédé de l'EF est efficace pour le traitement des eaux de barrages et l'élimination des micro-algues. D'ailleurs cette efficacité prouvée de l'EF rejoint celle de l'électrocoagulation (EC) déjà démontrée au sein de notre Laboratoire [2-4].

Comme perspective, ces résultats encourageants, nous orientent à poursuivre cette étude en régime continu, afin de prévoir par la suite l'extrapolation à l'échelle industrielle.

INTRODUCTION GENERALE

Une présence importante de micro-algues et de cyanobactéries dans les systèmes aquatiques reste un problème majeur dans le traitement de l'eau potable et dans l'amélioration de la qualité des eaux douces.

Dans certaines conditions, particulièrement pour les eaux riches en nutriments et exposées à la lumière du soleil, les algues peuvent se multiplier pour atteindre de fortes concentrations, phénomène désigné sous le nom de *bloom algal*.

La prolifération d'algues microscopiques et les métabolites qu'elles sécrètent peuvent être à l'origine de perturbations sur les filières de traitement d'eau et ainsi dégrader la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. Notamment, des composés responsables de goût et d'odeur et des toxines d'algues sont susceptibles d'être retrouvés dans l'eau traitée car les installations conventionnelles (à savoir la coagulation/floculation, décantation, filtration sur sable et post-chloration) de traitement d'eau potable ne sont pas nécessairement dimensionnées pour retenir ces composés dissous [1].

Les traitements mis en œuvre doivent donc être adaptés à l'élimination de ces microorganismes. Toutefois, des recherches sur des procédés non conventionnels doivent être faites pour mieux éliminer les micro-algues des eaux de barrage. Les procédés électrochimiques connaissent un intérêt de plus en plus croissant durant ces deux dernières décennies puisqu'ils ont été trouvés efficaces lors de l'élimination de plusieurs polluants de type minéral, organique, microbien et algal [2-4].

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif du présent travail était d'évaluer au Laboratoire l'efficacité d'un procédé électrochimique, en l'occurrence, l'électroflottation (EF) pour l'élimination des micro-algues présentes dans les eaux du Barrage Ghrib (Wilaya d'Ain-Defla). Pour se faire, nous allons présenter brièvement quelques généralités sur les micro-algues et l'EF, présenter le dispositif et le protocole expérimentaux et enfin optimiser les paramètres influençant l'efficacité du procédé avant de terminer avec une conclusion générale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Roche et C. Semler « Elaboration d'une stratégie de traitement d'algues sur une filière d'eau potable », Rapport final, Anjou Recherche, 2005.
- [2] D. Ghernaout, A. Badis, B. Ghernaout et A. Kellil, « Application of electrocoagulation in escherichia coli culture and two surface waters », *Desalination* 219 (2008) p. 118–125.
- [3] D. Ghernaout, B. Ghernaout, A. Saiba, A. Boucherit et A. Kellil, « Removal of humic acids by continuous electromagnetic treatment followed by electrocoagulation in batch using aluminium electrodes », *Desalination* 239 (2009) p. 295–308.
- [4] B. Ghernaout, D. Ghernaout, A. Saiba, « Algae and cyanotoxins removal by coagulation/flocculation » A review, *Desalination Water Treat.* 20 (2010) p. 133–143.
- [5] E. Becker « Microalgae Biotechnology and microbiology » Edition : Cambridge studies in biotechnology, 2010.
- [6] A. Widjaja, C. Chien et H. Ju, « Study of increasing lipid producing from fresh water microalgae *Chlorella* », *Journal of taiwan institute of chemicals engineers*, Vol. 40 (2009) p. 13-20.
- [7] R.J. Stevenson, M.L. Bothwell et R.L. Lowe (1996), « Algal ecology, [En ligne].http://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=gl7hw2WLA1cC&oi=fnd&pg=PA299&dq=heterotrophic+metabolism+microalgae&ots=6Ou7EFLepF&sig=Wjt0nXaRgfSXfhfOoH_0TLmfQ#v=onepage&q=heterotrophic%20metabolism%20microalgae&f=false»(Page consultée le 27 Août 2011).
- [8] J. Capblancq, 1982 « Ecologie du plancton des eaux continentales ». *Collect. Ecologie* 16, Masson, Paris (1982) p. 1-48.
- [9] A. Cunningham et P. Maas, « The growth dynamics of unicellular algae » CRC Press Inc., Boca Raton, Florida (1982) p. 167-188.
- [10] K. Porter, « Phagotrophic phytoflagellates in microbial food webs ». *Hydrobiologie*, Vol 159 (1988) p. 89-97.

BIBLIOGRAPHIE

- [11] I. Cantin « La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe » Centre Universitaire De Formation En Environnement Université De Sherbrooke, Québec, Canada, juillet 2010.
- [12] C. Amblard, « Activité hétérotrophe des microalgues et des cyanobactéries vis-à-vis du carbone: implications écophysologiques ». Ann. biol. Vol 30 (1991) p. 74-107.
- [13] A. Hubert « Lechevalier : Fungi, Algae, Protozoa, and Viruses », CRC handbook of microbiology, Vol 2. 2ème édition (1977) 874.
- [14] D. Werner, « The biology of diatoms », Oxford, Blackwell Scientific, 498 (1977) p. 13. (Collection Botanical monographs).
- [15] F.Chen, « High cell density culture of microalgae in heterotrophic growth ». Trends in biotechnology, Vol. 14, N°11 (1996) p. 421-426.
- [16] J. Rosenberg, G. Oyler, L.Wilkinson, M. Betenbaugh, « A green light for engineered algae : redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution » Biotechnology, Vol. 19 (2008) p. 430-436.
- [17] Dabbadie, « Culture intensive de microalgues sur lisier de porc : performances, contraintes, utilisation de biomasse » Diplôme d'Agronomie Approfondie, France (1992).
- [18] H.Qiang, M. Sommerfield, E. Jarvis, M. Ghirardi, « Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production : perspectives and advances », The Plant Journal, Vol. 54 (2008) p. 621-639.
- [19] Q. Li, W. Du, D. Liu, « Perspectives of microbial oils for biodiesel production », Applied Microbiology Biotechnology, Vol. 80 (2008) p. 749-756.
- [20] X. Li, H. Xu et Q. Wu, « Large-scale biodiesel production from microalga *Chlorella protothecoides* through heterotrophic cultivation in bioreactors », Biotechnology and Bioengineering, Vol. 98, N° 4 (2007) p. 764-771.

BIBLIOGRAPHIE

- [21] S. Khan, M. Hussain, S. Prasad et U. Banerjee, « Prospects of biodiesel production from microalgae in India ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, N° 9 (2009) p. 2361-2372.
- [22] X. Meng, J. Yang, X. Xu, L. Zhang and M. Xian, « Biodiesel production from oleaginous microorganisms » *Renewable Energy*, Vol.34 (2009) p. 1-5.
- [23] W. Barclay, K. Meager, J. Abril, « Heterotrophic production of long chain oméga-3 fatty acids utilizing algae and algae-like microorganisms », *Journal of applied phycology*, Vol. 6 (1993) p. 123-129.
- [24] A. Bouloude, A. Foutlane et L. Bouchich « Eutrophisation des retenus de barrages et production d'eau potable » *Revue H.T.H N° 119*, Juin 2001.
- [25] N. Daneshvar, A. Oladegaragoze et N. Djafarzadeh, « Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation-electroflotation: an investigation of the effect of operational parameters » *J. Hazard. Mater*, Vol. 129 (2006) p. 116–122.
- [26] F. Persin, M. Rumeau, « Le traitement électrochimique des eaux et des effluents » *Tribune de l'eau*, Novembre N° 3, Vol. 42, N° 539 (1989) p. 45-56.
- [27] C. Ho, C. Chan, *Journal Water Research*, 20 (1986) p. 1523.
- [28] L. Ben Mensour, Y. Ben Abdou et S. Gabsi, *Journal Water, Waste and Environment Research 2* (2001) p. 51.
- [29] A. Alinsafi, M. Khemis, M.N. Pons, J.P. Leclerc, A. Yaacoubi, A. Benhammou et A. Nejmeddine, « Electrocoagulation- Electroflotation of reactive textile dyes and textile wastewater », *Chem. Eng. Process*, Vol. 44 (2005) p. 461–470.
- [30] M. Krofla et L. Wan 1985 « Development of innovative flotation-filtration systems for water treatment ». San Diego, California, USA, AWWA Research Foundation (1985) p. 1251 - 1264.

BIBLIOGRAPHIE

- [31] M. Farias « Clarification du jus de pomme de terre par électroflottation », Mémoire pour l'obtention du grade des maitres de sciences, Université Laval, 1999.
- [32] N. Ahmed and G. Jameson, « The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles ». *Int. J. Miner. Process.* 14 (1985) p. 195-215.
- [33] D. Ketkar, R. Mallikwunan and S. Venkatachalam, « Electroflotation of quartz fines », *Int. J. Miner. Process.* 31 (1991) p. 127- 138.
- [34] D. Gardais, « Les procédés électriques de traitement des rejets industriels », *Environnement et Électricité*, France (1990) p. 300-320.
- [35] T. Pasternak et J. Piotrowski, « Possibilities of partial purification of daft effluents », *Abstract of PrzegZad-Meczarski*, Vol. 3 1 (1) (1982) p. 26-28.
- [36] B.G. Hernlem et S. Tsai « Chlorine Generation and Disinfection by Electroflotation », *Journal of Food Science*, Vol. 95, Issue 05 (2000) p. 834-837.
- [37] M. Fouletier, J.B. Mathieu, et P. Noual, « Les applications de l'électrochimie à l'hydrométallurgie », Edition Pluralis – Paris, 1980.
- [38] M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga et D.L. Cocke, « Electrocoagulation (EC) - science and applications », *J. Hazard. Mater.*, Vol. 84 (2001) p. 29–41.
- [39] P.K. Holt, G.W. Barton et C.A. Mitchell, « The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology », *Chemosphere*, Vol. 59 (2005) p. 355–367.
- [40] B. Merzouk, « Eputation des effluents industriels par électroflottation », Département d'Hydraulique, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2009.
- [41] A. Haba, et D. Szoplik, « Research on a possibility of using an electroflotation process for waste treatment from fish processing. *Environmental Protection Engineering* 1 8(3) (1992) p. 19-27

BIBLIOGRAPHIE

- [42] A. Hosny, « Separation oil from oil-water emulsions using an electroflotation cell with insoluble electrodes ». *Filtr* (1992) p. 419-423.
- [43] A.Y. Hosny, « Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique », *Sep. Technol.* 6 (1996) p. 9-17.
- [44] S. Beszedits et A. Netzer, « Electrocoagulation. In: Protein Recovery From Food Processing Wastewater », Canada (1982) p.7- 1 23.
- [45] Z.D. Bakhchivanzh et Safkonov, 1978. « Purification of effluents from wine industry plants using an electroflotation method » *Abstraa of Sadovdfvo Vinogradorstvo-i- Vinode lie-Mofuhi* (1978) p. 31-33.
- [46] E. Okun et B. Matov, « Investigation of the influence of wire cathode parameters on the purification efficiency of liquids by electroflotation », In: *Food. Hzhstrzes And The Environment- Wollo*, J. Ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands (1984) p. 69-74.
- [47] T.D. Kubritskaya, I.F. Marta et V. Buzulyak, « Electroflotation equipment EFA-2 for the clarification of apple juice » *Abstract of Pishchevaya-Promyshlennost 3* (1988) p. 20-21.
- [48] N. Khosla, S. Venkatachalam et P. Somasundaran, « Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation », *J. Appl. Electrochem*, Vol 21 (1991) p. 986-990.
- [49] H. Utermohl, 1958 « Zur vervollkommung der quantitative phytoplankton-Methoik ». *Mitt. Intern. Ver. Limnol* (1958) p. 1-38.
- [50] L. Legendre, W.D. Watt, « On rapid technique for enumeration », *Ann. Inst. Oceanogr*, Paris (1971-1972) p.173-177.
- [51] N. Harrat et S. Achour, « Pollution physico-chimique des eaux de barrage de la région d'el Tarf. Iimpact sur la chloration », *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N° 08, Juin 2010, p. 47-54.

BIBLIOGRAPHIE

- [52] W. Carmichael, « The water environment: algal toxins and health », Plenum Press NY, (1981) p. 491.
- [53] J.Feuillade, « Les toxines des cyanobactéries: revue de synthèse », Rev. Sc. de l'Eau, 5 (1992) p. 489-508.
- [54] N. Maurin, D.C. Amblard et G. Bourdier, « Phytoplanktonic excretion and bacterial reassimilation in an oligomesotrophic lake » Journal of plankton research (1997) p.1045-1068.
- [55] E. Madigou « Influence du statut trophique de cours d'eau sur les fonctionnalités microbiens des biofilms ». Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon (2005) p. 27-47.
- [56] M. Cherbi, « Contribution à l'étude des peuplements zooplanctoniques de trois lacs: Hamiz, Ghrib et Boughzoul », Thèse de doctorat, Université d'Alger (1984) p.154.
- [57] Cornaz, « Evaluation du statut trophique d'un canal de drainage sous l'impact des pollutions d'origines diffuses et ponctuelles, le cas du grand canal de plaine de Rhône » 2004, p. 10-19.
- [58] ANRH : Agence Nationale des ressources hydriques, Soumâa, Blida.
- [59] D. Ketkar, R. Mallikwunan et S. Venkatachalam « Electroflotation of quartz fines ». Int. J. Miner. Process, Vol. 31 (1991) p.127- 138.
- [60] P.K. Holt, G.W. Barton, M. Wark et C.A. Mitchell, « A quantitative comparison between chemical dosing and EC », Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects 211 (2002) p. 233-248.
- [61] B. Merzouk, B. Gourich, A. Sekki, K. Madani et M. Chibane, « Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation–electroflotation technique », A case study, J. Hazard. Mater. 164 (2009) p. 215–222.

BIBLIOGRAPHIE

- [62] S. Gao, J. Yang, J. Tian, F. Ma, G. Tu et M. Du, « Electro-coagulation–flotation process for algae removal », *Journal of Hazardous Materials*, 177 (2010) p. 336–343.
- [63] M. Bayramoglu, M. Eyvaz et M. Kobyas, « Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation : economical evaluation », *Chemistry Engineering Journals*, 128 (2007) p. 155-161.
- [64] S. Vasudevan, G. Sozhan, S. Ravichandran, J. Jayaraj, J. Lakshmi et S.M. Sheela « Studies on the removal of phosphate from drinking water by electrocoagulation process » *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008) p. 2018–2023.
- [65] P. Gao, X.M. Chen, F. Shen et G.H. Chen, « Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter » *Sep. Purif. Technol.* 43, 2004, p. 117–123.
- [66] H. Abdallah et H. Benzamime, « Electrocoagulation-Flottation des acides humiques en batch utilisant des électrodes en aluminium », Mémoire de fin d'études. Université Saad Dahlab de BLIDA, 2005.
- [67] G. Feuillade, S. Gueraud, « L'EC et la production d'eau potable: faisabilité, intérêts et performances », 4^{ième} Congrès International GRUTTEE 22-23 novembre 2001, Limoges (France).
- [68] F. Hamaidi et M.S. Hamaidi, « Recherche des indicateurs bactériens de contamination fécale dans les eaux du barrage de Lakhel (Bouira Algérie) », *Faculté Agro-Vétérinaires et Biologiques, Département de Biologie, Université de Blida. Rev. Microbiol. Ind. San et Environn*, Vol 3, N°1 (2009) p. 76-95.
- [69] Rodier, J. « L'analyse de l'eau », 8^{ième} Édition, Dunod, Paris, France (2005).

BIBLIOGRAPHIE

[70] M. Kobya, H. Hiz, E. Senturk, C. Aydiner et E. Demirbas, « Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation ». *Desalination* (2006) p. 201-211.

[71] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. T. Can et M. Sozbir, « Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater», *Separation and Purification Technology*, 37 (2004) p. 117-125.

[72] N. Daneshvar, A. Oladegaragoze et N. Djafarzadeh, « Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation : an investigation of the effect of operational parameters ». *Journal of Hazardous Materials*, 129 (2006) p. 116–122.

ANNEXE

Tableau A.1. Taux d'élimination des microalgues en fonction du temps de traitement pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

t (min)	5	10	15	20	25	30
R (%)	78,57	88,78	90	93	94,39	97,96

Tableau A.2. Effet de la densité de courant sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $pH = 7,8$ et $d = 2 \text{ cm}$.

t (min)	5	10	15	20	25	30	i (A.m^{-2})
R (%)	78,57	88,78	90	93	94,39	97,96	29
	88,26	90,3	100	100	100	100	103
	91,83	92,34	100	100	100	100	170

Tableau A.3. Effet de la densité de courant sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $pH = 7,8$; $d = 2 \text{ cm}$ et $t = 5 \text{ min}$.

i (A.m^{-2})	29	103	170
R (%)	78,57	88,27	91,84

Tableau A.4. Influence du pH sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$.

t (min)	5	10	15	20	25	30	pH
R (%)	68,34	70	75	78,57	90	92	4
	73	78	85,37	88	91,33	93,88	6
	78,51	88,77	98,98	100	100	100	7,8
	92,86	94,9	97,95	100	100	100	10

Tableau A.5. Influence du pH sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$ et $t = 10 \text{ min}$.

pH	4	6	7,8	10
R (%)	70	78	88,77	94,9

Tableau A.6. Influence du pH sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$ et $t = 30 \text{ min}$.

pH	4	6	7,8	10
R (%)	92	93,88	100	100

ANNEXE

Tableau A.7. Evolution du pH au cours de l'EF ($i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $d = 2 \text{ cm}$).

t (min)	0	5	10	15	20	25	30
pH	4	4,5	4,52	4,8	5,54	6,02	6,75
	6,5	6,22	6,39	6,4	6,5	6,52	6,7
	7,8	7,1	7,6	6,8	6,75	6,34	6
	10	8,5	8,29	7,08	8,13	8,02	8

Tableau A.8. Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$ et $pH = 7,8$.

t (min)	5	10	15	20	25	30	d (cm)
R (%)	93,37	94,9	100	100	100	100	1
	78,57	88,77	98,98	100	100	100	2

Tableau A.9. Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de l'EF en fonction du temps pour $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$ et $pH = 7,8$.

t (min)	5	10	15	20	25	30	d (cm)
R (%)	94,9	98,47	100	100	100	100	1
	88,27	90,3	100	100	100	100	2

Tableau A.10. Influence de la conductivité de l'eau sur l'efficacité du traitement en fonction de la densité de courant pour $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

i (A.m^{-2})	29	103	170	Barrage
R (%)	55,26	66,33	84,69	Lekhal
	98,97	100	100	Ghrib

ANNEXE

Eau du barrage Lakhali

Tableau A.11. Optimisation du temps et de la densité de courant pour $pH = 7,88$; $CE = 789 \mu S.cm^{-1}$ à $13,3^\circ C$; $d = 2 cm$.

t (min)	15	30	i ($A.m^{-2}$)
pH_f	7,04	6,97	29
CE_f ($\mu S.cm^{-1}$)	685	683	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ C$)	13,0	12,5	
pH_f	7,70	7,30	103
CE_f ($\mu S.cm^{-1}$)	690	686	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ C$)	12,1	12,2	
pH_f	7,57	7,47	170
CE_f ($\mu S.cm^{-1}$)	715	670	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ C$)	11,9	13,4	

Tableau A.12. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 A.m^{-2}$; $t = 15 min$ et $d = 2 cm$.

Classe	Genre	Espèce	(5) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1	1		1	3	1		2	2	1
Bicillariophycée	<i>Cyclotella</i>	<i>comta</i>	5	4	3	5	6	6	2	4	4	6
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>	1	1	3	2	1	2	3	2	1	1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>	3	1	1	1	1	2	2	1	2	2
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	1	2	2	1	1	1	2	1	2	1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>		2					1			
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>						1		2	1	3
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>		1				1		1		
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>	1		1			1	2	2	2	1

Tableau A.13. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 A.m^{-2}$; $t = 15 min$ et $d = 2 cm$.

Classe	Genre	Espèce	(6) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1	1	1	1	1	1	2		3	2
Bicillariophycée	<i>Cyclotella</i>	<i>comta</i>	3	3	2	1	1	2	2	3	1	3
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>										1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>		2	1	1		1	3		1	
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	1	2							1	1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>	1									
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>		1		1	1					
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>										1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>	1									

ANNEXE

Tableau A.14. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(4) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1			1					1	
Bicillariophycée	<i>Cyclotella</i>	<i>comta</i>	4	5	3	3	3	4	4	3	2	5
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>		1	1							1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>		1		1					1	
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	2	2	1	2	1	2	1			1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>	1									
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>		1								1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>	1									1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>	2			1			1			

Tableau A.15. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(2) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1	2	3	1	1	4	3	1		
Bicillariophycée	<i>Cyclotella</i>	<i>comta</i>	1	1	6	2	3		2	2	3	2
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>	1	1	1	1			1			
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>	1			1	2			1	1	1
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	1	1	2	1	2	1	1		2	1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>										
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>	1	1		1			1			
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>				1						

Tableau A.16. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(3) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>			1								
Bicillariophycée	<i>Cyclotella</i>	<i>comta</i>	2		1	1	1		3	2		1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>			2		1					1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>	2							1		
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	1	1	1			1			1	
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>										
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>	3									
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>				1						
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>		2		1				1		

ANNEXE

Eau du barrage Ghrib

Tableau A.17. Optimisation du temps et de la densité de courant pour $pH = 7,80$; $CE_i = 2800 \mu\text{S.cm}^{-1}$ à $11,6^\circ\text{C}$; $d = 2 \text{ cm}$.

t (min)	05	10	15	20	25	30	i (A.m^{-2})
pH_f	7,76	7,93	7,30	6,61	6,71	6,88	29
CE_f ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2520	2480	2600	2600	2590	2450	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	12,4	12,1	14,7	14,5	14,5	14,2	
pH_f	7,61	7,86	7,39	6,70	6,60	6,35	103
CE_f ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2500	2480	2600	2600	2590	2500	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	12,7	12,6	14,7	15,9	16,0	14,2	
pH_f	7,10	7,60	6,80	6,75	6,00	6,00	170
CE_f ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2580	2450	2600	2600	2450	2330	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	15,2	12,8	16,2	14,0	14,3	14,2	

Tableau A.18. Optimisation du temps et de la densité de courant en milieu acide pour $pH = 4,00$ et $d = 2 \text{ cm}$.

t (min)	05	10	15	20	25	30	i (A.m^{-2})
pH_i	3,98	3,97	3,94	4,01	4,04	4,04	29
CE_i ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2990	3010	3100	2910	3000	3030	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	16,3	17,2	16,6	17,0	19,4	19,5	
pH_f	5,44	5,17	4,70	7,44		5,73	
CE_f ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2770	2740	2510	2800	2820	2620	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	17,0	18,1	16,9	19,7	19,7	19,8	
pH_i	4,09	4,08	3,97	4,01	3,96	3,99	103
CE_i ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	3020	3200	2900	2910	2960	2980	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	16,6	18,3	16,7	17,0	19,4	19,3	
pH_f	5,28	6,00	6,04	5,10	6,00	6,23	
CE_f ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2740	2720	2700	2620	2710	2750	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	17,9	17,8	17,6	20,2	20,1	21,1	
pH_i	3,97	4,02	4,01	3,93	4,07	3,99	170
CE_i ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	3050	3000	2910	3000	3030	2900	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	17,4	16,4	17,0	19,5	19,3	16,9	
pH_f	5,92	4,52	4,20	5,54	4,02	6,75	
CE_f ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2750	2800	2650	2620	2650	2540	
$T_{de\ mesure}$ ($^\circ\text{C}$)	18,3	18,4	21,6	19,7	19,9	19,7	

ANNEXE

Tableau A.19. Optimisation du temps et de la densité du courant en milieu basique pour $pH = 10,00$ et $d = 2$ cm.

t (min)	05	10	15	20	25	30	i ($A.m^{-2}$)
pH_i	9,88	10,03	9,97	10,09	9,95	10,08	29
CE_i ($\mu S.cm^{-1}$)	2800	2760	2810	2900	2900	2750	
$T_{de\ mesure}$ ($^{\circ}C$)	19,4	19,5	19,5	20,7	22,0	23,5	
pH_f	8,75	8,65	8,65	9,30	8,30	8,60	
pH_i	9,98	9,97	10,05	9,98	10,08	10,08	103
CE_i ($\mu S.cm^{-1}$)	2700	2810	2800	2780	2750	2750	
$T_{de\ mesure}$ ($^{\circ}C$)	19,2	19,5	20,3	20,7	23,5	23,5	
pH_f	8,78	8,45	7,36	7,75	7,15	8,70	
pH_i	10,03	9,97	9,99	9,95	10,08	10,17	170
CE_i ($\mu S.cm^{-1}$)	2760	2810	2700	2900	2750	2790	
$T_{de\ mesure}$ ($^{\circ}C$)	19,2	19,5	20,3	22,0	23,5	24,1	
pH_f	8,78	8,29	7,08	8,13	8,02	8,73	

Tableau A.20. Optimisation du temps en milieu acide pour $pH = 6,00$; $i = 29 A.m^{-2}$ et $d = 2$ cm.

t (min)	10	20	30
pH_i	6,06	5,95	5,99
CE_i ($\mu S.cm^{-1}$)	2660	2950	3000
$T_{de\ mesure}$ ($^{\circ}C$)	23,3	23,6	24,0
pH_f	6,39	6,36	6,02
CE_f ($\mu S.cm^{-1}$)	2650	2760	2790
$T_{de\ mesure}$ ($^{\circ}C$)	24,7	24,7	25,3

Tableau A.21. Optimisation du temps et de la densité du courant pour $pH = 7,88$; $i = 29 A.m^{-2}$ et $d = 1$ cm.

t (min)	05	10	15	20	25
pH_i	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98
CE_i ($\mu S.cm^{-1}$)	2900	2900	2900	2900	2900
$T_{de\ mesure}$ ($^{\circ}C$)	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
pH_f	7,28	7,20	6,87	6,79	6,77

ANNEXE

Tableau A.22. Analyses algologiques de l'eau brute

Classe	Genre	Espèce	() Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>			1	3		1					
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	20	20	16	18	21	20	20	19	16	20
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>	1									
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>								1		
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	2									
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>caudatum</i>					1					
Chlorophycée	<i>Causmarium</i>	<i>depressum</i>								1		
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>										2
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>	1									

Tableau A .23. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	19 Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>			1								
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	2	7	3	4	2	5	4	1	2	4
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>	1									
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>	1									

Tableau A.24. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(20) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>			1		2					
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>						2				

Tableau A.25. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(21) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>						1				

ANNEXE

Tableau A.26. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(16) Champs												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1												
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	2	3	2	1	1	1	1			
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>	1	1						1					
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>				1									

Tableau A.27. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(17) Champs												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1	1	1										
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>	1		1										
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>		1				1						1	
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>		1											

Tableau A.28. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(18) Champs												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>		1				1						1	
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>		1				1							

Tableau A.29. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(13) Champs												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>		1											
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	1												

Tableau A.30. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(22) Champs												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1		1		1		1	1					
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>quadricauda</i>					1					1			
Chlorophycée	<i>Volvox</i>	<i>carteri</i>	1	1		1									1
Chlorophycée	<i>Tetraedron</i>	<i>mimum</i>							1						

ANNEXE

Tableau A.31. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(23) Champs																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1																	1	

Tableau A.32. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(8) Champs																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1																		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>		1																	
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>				2															

Tableau A.33. Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(34) Champs																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Bicillariophycée	<i>Synedra</i>		1																		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>		1																	
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>dimorphus</i>				1															

Tableau A.34. Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 20 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(35) Champs																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	2	4	2	3	6	5	1	1	4	1									

Tableau A.35. Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(37) Champs																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	3	3	4	5	7	6	5	6	4	5									

Tableau A.36. Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 25 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(37) Champs																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	4	2	3	1	2	1	1	1	1	3									

ANNEXE

Tableau A.37. Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(40) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	4	7	5	6	6	5	8	9	5	3
Chlorophycée	<i>Scenedesmus</i>	<i>ecornis</i>		1						1		

Tableau A.38. Analyses algologiques pour $pH = 4,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(41) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1

Tableau A.39. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(43) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1

Tableau A.40. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(44) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau A.41. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 170 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(45) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1

Tableau A.42. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(46) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1

Tableau A.43. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(47) Champs									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1						

ANNEXE

Tableau A.44. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(49) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1								

Tableau A.45. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 15 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(50) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1									

Tableau A.46. Analyses algologiques pour $pH = 10,0$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 20 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(53) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1											

Tableau A.47. Analyses algologiques pour $pH = 6,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(61) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	3	1	2	2	1	1		

Tableau A.48. Analyses algologiques pour $pH = 6,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 20 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(62) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	

Tableau A.49. Analyses algologiques pour $pH = 6,0$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 30 \text{ min}$ et $d = 2 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(63) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	2	1	3		1	1		1	1		

Tableau A.50. Analyses algologiques pour $pH = 7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(64) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

ANNEXE

Tableau A.51. Analyses algologiques pour $pH=7,8$; $i = 29 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(65) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau A.52. Analyses algologiques pour $pH=7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 5 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(69) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau A.53. Analyses algologiques pour $pH=7,8$; $i = 103 \text{ A.m}^{-2}$; $t = 10 \text{ min}$ et $d = 1 \text{ cm}$.

Classe	Genre	Espèce	(70) Champs											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Bicillariophycée	<i>Cyclotelle</i>	<i>comta</i>	1	1	1									