

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DES SCIENCES BIOLOGIQUES
ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DÉPARTEMENT BIOCHIMIE-MICROBIOLOGIE

THÈSE de MASTER

Spécialité : Biologie
Option : Microbiologie appliquée

Présentée par
MECHEREF Samir et MAHFOUF Aghiles

SUJET

Biodépollution des rejets d'eaux usées de l'industrie
« ENIEM » de Tizi-Ouzou par
Spirulina platensis

Soutenu le : 27/09/2016

Devant le Jury composé de :

Mr METAHRI Mohammed Saïd	Maître de conférences (A)	U.M.M.T.O	Président
Mr MOUALEK Idir	Maître de conférences (A)	U.M.M.T.O	Examineur
Mme HELLAL Zohra	Maître assistante (A)	U.M.M.T.O	Examinatrice
Mme BENAHMED DJILALI Adiba	Maître de conférences (A)	U.M.M.T.O	Promotrice

Année Universitaire : 2015/2016

Remerciements

Ce projet n'aurait pas abouti sans la bénédiction du Bon Dieu, Qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail et Qui a entendu nos prières.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de manière directe ou indirecte à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions également et profondément notre promotrice M^{elle} BENAHMED DJILALI qui n'a jamais cessé de nous conseiller, orienter et nous encourager. Merci pour sa disponibilité et sa coopération remarquable.

Nous tenons à remercier le personnel du complexe ENIEM de nous avoir facilité l'accès à leur entreprise Ainsi que tous les ingénieurs des labos communs BMC pour leurs explications et leurs orientations.

Nous tenons à remercier aussi Mr MAHFOUF Salem de nous avoir transportés plusieurs fois à Boumerdés.

Nos vifs remerciements au membre de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Ainsi à tous les enseignants pour leurs efforts tout au long de nos années d'études.

Dédicaces

À mes chers parents.

Ma mère pour m'avoir mis au monde et pour m'avoir accompagné tout le long de ma vie. Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours rester fidèle aux valeurs morales que vous m'avez apprises.

À mes grandes sœurs : Fatima, Tassadit, et Samira. Qui sont me reconforter, me redonner du courage et m'épauler lors des moments difficiles.

À mon grand frère Ramdane et sa femme Lamia. Qui sont me reconforter, me redonner du courage et m'épauler lors des moments difficiles.

À toute ma famille.

À toutes les personnes que je porte dans le cœur, mes très chers amis : Mouh, Lyes, Smail, Sid Ali et surtout Ghiles.

Je vous dédie ce travail car je ne peux que vous offrir ce que j'ai appris de mieux dans ma vie.

Samir

Dédicaces

À mes chers parents.

Ma mère pour m'avoir mis au monde et pour m'avoir accompagné tout le long de ma vie. Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours rester fidèle aux valeurs morales que vous m'avez apprises.

À mes petites sœurs : Radia et Hayat. Qui sont me réconforter, me redonner du courage et m'épauler lors des moments difficiles.

À ma fiancée : Malika, que j'aime énormément. Qui m'a toujours soutenu, encourager, aider et qui a été toujours à mes côtés dans n'importe quels moments.

À toute ma famille.

À toutes les personnes que je porte dans le cœur, mon très cher ami : Youcef.

Je vous dédie ce travail car je ne peux que vous offrir ce que j'ai appris de mieux dans ma vie.

Aghiles

Résumé

L'objectif principal de ce travail consiste à développer *Spirulina platensis* dans les rejets d'eaux usées de l'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (ENIEM) à l'échelle pilote en vue de leur dépollution.

Dans un premier temps, nous avons cultivé la spiruline dans les rejets d'eaux usées de l'ENIEM. Les résultats ont montré que, ces rejets ne constituent pas un bon substrat pour la croissance de cette micro-algue.

Par la suite, la culture a été optimisée, afin d'augmenter le rendement en biomasse.

Le rendement obtenu dans le milieu optimisé M₂ensemencé avec 30 ml d'inoculum (culture C₃) est exceptionnel de 4,3±0,56 g MF /100 ml après 21 jours de culture.

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) des poudres de spirulines obtenues des différents essais de culture dans l'eau de l'ENIEM présentent la même structure que celle de référence d'origine de Burkina-Faso.

Par ailleurs, les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les effluents de la station d'épuration de l'ENIEM montrent que les eaux usées présentent un caractère neutre (pH = 7,04±0,0079). La détermination des paramètres indicateurs de pollution mesurés donne : DCO = 78,4 mg d'O₂ /l, DBO₅ = 21,9 mg d'O₂ /l. Les concentrations en métaux lourds présents dans ces eaux sont : Fe = 0,311 mg/l, Cr = 0,06 mg/l, Mn = 0,032 mg/l, Pb = 0,078 mg/l, Zn = 0,323 mg/l, Cd = 0,007 mg/l et Cu = 0,076 mg/l. Ces valeurs sont inférieures aux normes adoptées par la réglementation Algérienne.

En fin, le traitement biologique par la spiruline permet une diminution de la totalité des métaux lourds étudiés, et un abattement de la DCO et DBO₅, qui atteint respectivement des taux de 44,11% et 40,64%.

Mots clés : *Spirulina platensis*, ENIEM, dépollution, spiruline, eaux usées, culture, traitement biologique.

Abstract

The main objective of this work is to develop *Spirulina platensis* in waste water discharges to the National Company of the Electronics Industries (ENIEM) pilot scale for their cleaning up.

First, we have grown spirulina in waste water discharges from ENIEM. The results showed that these releases are not a good substrate for the growth of the microalgae.

Thereafter, the culture was optimized to increase the biomass yield.

The yield obtained in the optimized medium M₂ inoculated with 30 ml inoculum (C₃ crop) is exceptional of $4,3 \pm 0,56$ g MF /100 ml after 21 days of culture.

Analyses by scanning electron microscope (SEM) some spirulina powders obtained in different culture assays in water of ENIEM have the same structure as the original reference Burkina Faso.

Furthermore, the results of physicochemical analyzes of the effluents of the waste water treatment plant of ENIEM show that the has a neutral character ($\text{pH} = 7,04 \pm 0,0079$). The determination of the parameters measured pollution indicators gives: COD = 78,4 mg O₂ /l BOD₅ = 21,9 mg O₂ /l. The concentrations of these heavy metals in water is: Fe = 0,311 mg /l Cr = 0,06 mg /l, Mn = 0,032 mg /l, Pb = 0,078 mg /l Zn = 0,323 mg /l Cd = 0,007 mg /l and Cu = 0,076 mg /l. These values are lower than the standards adopted by the Algerian regulations.

In the end, the biological treatment with spirulina allows a reduction of the total studied heavy metals, and a reduction of COD and BOD₅, which reached rates of 44,11% and 40,64% respectively.

Key words : *Spirulina platensis*, ENIEM, cleaning up, spirulina, waste water, culture, biological treatment.

Liste des abréviations

AAS : Spectrométrie à absorption atomique

DA : Dinar Algérien

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DNF : Déplacement Nutritif Biologique

DO : Densité optique

ENIEM : Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

ISO : *International Standard Organization*

KDA : Kilo Dinar Algérien

MEB : Microscope Électronique à Balayage

MES : Matières en suspensions

MF : Matière Fraiche

MMS : Matières minérales

MS : Matière Sèche

MVS : Matières volatiles en suspension

Pc : Phycocyanine

pH : potentiel Hydrogène

SONELEC : Société Nationale de fabrication et de montage du Matériel Électrique et Électronique

SPA : Société Par Actions

UPT : Unité Prestations Techniques

UV : Ultraviolet

Liste des tableaux

Tableau I : Teneur de la spiruline “ Flamant Vert ” en acides aminés.....	05
Tableau II : Les principaux acides gras de la spiruline.....	06
Tableau III : Teneur en vitamines en µg/g de matière sèche de spiruline.....	07
Tableau IV : Coordonnés de l’ENIEM.....	21
Tableau V : Différents produits de l’ENIEM.....	22
Tableau VI : Évolution de la production de l’ENIEM (valeur en KDA).....	22
Tableau VII : Caractéristiques physico-chimiques de l’eau de l’ENIEM.....	25
Tableau VIII : Les marques des différents appareils utilisés dans notre étude.....	26
Tableau IX : Conditions opératoires de la culture de spiruline dans l’eau usée de l’ENIEM (M ₀).....	28
Tableau X : Conditions opératoires de la 3 ^{ème} expérience.....	30
Tableau XI : Conditions opératoires de la 4 ^{ème} expérience.....	30
Tableau XII : Conditions opératoires de la 5 ^{ème} expérience.....	31
Tableau XIII : Paramètres de la culture de spiruline au début et après deux jours de culture dans les milieux M ₁ , M ₂ et M ₃	37
Tableau XIV : Rendement en spiruline cultivée dans le milieu M ₀ et le milieu optimisé M ₂ à différentes conditions de culture.....	43
Tableau XV : Composition chimique (mg/l) de l’eau de l’ENIEM non traitée et traitée par la spiruline.....	46
Tableau XVI : Valeurs de la DCO, DBO ₅ et pH de l’eau de l’ENIEM avant et après traitement biologique.....	47

Liste des figures

Figure 01 : Filament de <i>Spirulina platensis</i>	03
Figure 02 : Schéma général de la phycocyanine.....	09
Figure 03 : Photo d'une production artisanale au Mali.....	11
Figure 04 : Photo des bassins de production de micro-algues de la société Alpha Biotech situés sur les côtes normandes.....	12
Figure 05 : Diagramme récapitulatif du processus de production de la spiruline.....	13
Figure 06 : Les eaux industrielles de l'ENIEM.....	23
Figure 07 : Aspect de la poudre de spiruline utilisée.....	24
Figure 08 : Aspect des rejets d'eaux usées utilisés dans notre étude.....	25
Figure 09 : Aspect de la lessive de cendres de bois de figuier de la région de Tizi-Ouzou...26	
Figure 10 : Aspect de l'inoculum de spiruline.....	28
Figure 11 : Montage utilisé pour l'optimisation de l'aération et de l'agitation de la culture de spiruline.....	30
Figure 12 : Montage utilisé pour l'optimisation de la lumière de culture de spiruline.....	31
Figure 13 : Photo de spectrophotomètre de type UV-9200.....	32
Figure 14 : Photo du pH mètre (inoLab).....	32
Figure 15 : Aspect du milieu M_0 au début et à la fin de la culture de la spiruline.....	35
Figure 16 : Évolution des paramètres de la culture de spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM (milieu M_0).....	36
Figure 17 : Évolution des paramètres de la culture de spiruline dans le milieu optimisé M_2 ..38	
Figure 18 : Évolution des paramètres de la croissance de spiruline dans les cultures C_1 , C_2 et C_3	39
Figure 19 : Aspect des cultures C_1 , C_2 et C_3 (de gauche à droite) à la fin de la culture.....	40
Figure 20 : Évolution des paramètres de la croissance de spiruline dans le milieu M_2 avec et sans aération.....	41
Figure 21 : Évolution des paramètres de la croissance de spiruline dans le milieu M_2 avec et sans lumière.....	42
Figure 22 : Structure des différentes poudres de spiruline obtenues observées sous le microscope électronique à balayage.....	45

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Partie bibliographique

Chapitre I : Généralités sur la spiruline

I.1. Définition de la spiruline.....	03
I.2. Systématique.....	03
I.3. Historique.....	04
I.4. Valeur nutritionnelle.....	05
I.4.1. Protéines.....	05
I.4.2. Glucides.....	06
I.4.3. Lipides et acides gras.....	06
I.4.4. Vitamines.....	07
I.4.5. Minéraux et oligo-éléments.....	07
I.4.6. Pigments.....	07
I.4.6.1. Chlorophylle (pigment vert).....	07
I.4.6.2. Phycocyanine (pigment bleu).....	08
I.5. Valeur thérapeutique.....	08
I.6. Caractéristiques générales de la phycocyanine.....	09

Chapitre II : Culture et production de la spiruline

II.1. Culture de spiruline.....	10
II.1.2. Paramètres de culture.....	10
II.1.2.1. Température.....	10
II.1.2.2. potentiel Hydrogène (pH).....	10
II.1.2.3. Salinité.....	10
II.1.2.4. Lumière.....	10

II.1.2.5. Oxygène et agitation.....	10
II.2. Production de la spiruline.....	11
II.2.1. Production artisanale.....	11
II.2.2. Productions semi-industrielle et industrielle.....	12
II.2.2.1. Production semi-industrielle.....	12
II.2.2.2. Production industrielle.....	12
II.2.3. Étapes de production.....	12
II.3. Essais de culture de la spiruline en Algérie.....	13

Chapitre III : Généralités sur les eaux usées

III.1. Définition des eaux usées.....	15
III.2. Origine.....	15
III.2.1. Eaux usées domestiques.....	15
III.2.2. Eaux usées industrielles.....	15
III.2.3. Eaux agricoles.....	15
III.2.4. Eaux pluviales.....	15
III.3. Caractéristiques des eaux usées.....	16
III.3.1. Paramètres physiques.....	16
III.3.1.1. Température.....	16
III.3.1.2. Matières en suspensions (MES).....	16
III.3.2. Paramètres organoleptiques.....	16
III.3.2.1. La Turbidité.....	16
III.3.2.2. La couleur.....	16
III.3.3. Paramètres chimiques.....	16
III.3.3.1. Le pH.....	16
III.3.3.2. La conductivité.....	17
III.3.3.3. L'Oxygène dissous.....	17
III.3.3.4. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO).....	17
III.3.3.5. La Demande Chimique en Oxygène (DCO).....	17

III.3.4. Paramètres bactériologiques.....	18
III.4. Traitements des eaux usées.....	18
III.4.1. Prétraitement.....	18
III.4.1.1. Le dégrillage.....	18
III.4.1.2. Le dessablage.....	18
III.4.1.3. Le déshuilage et le dégraissage.....	18
III.4.2. Traitements physico-chimiques (traitements primaires).....	19
III.4.3. Traitements biologiques (traitements secondaires).....	19
III.4.3.1. Les procédés biologiques extensifs.....	19
Épuration par le sol.....	19
Lagunage naturel.....	19
III.4.3.2. Les procédés biologiques intensifs.....	19
Les procédés biologiques à "culture libre".....	20
Les procédés biologiques à "culture fixe".....	20
III.4.4. Traitements tertiaires.....	20

Partie expérimentale

Chapitre IV : Matériel et méthodes

IV.1. Présentation de l'entreprise ENIEM.....	21
IV.1.1. Généralités.....	21
IV.1.2. Situation géographique.....	21
IV.1.3. Gamme de produits.....	22
IV.1.4. Production.....	22
IV.1.5. Sources de pollution.....	23
IV.1.5.1. Déchets solides et leur mode de gestion.....	23
IV.1.5.2. Effluents liquides et leur mode de gestion.....	23
IV.1.5.2.1. Eaux de vannes et ménagères.....	23
IV.1.5.2.2. Eaux Industrielles.....	23

IV.1.5.3. Caractéristiques des rejets des eaux et des boues.....	24
IV.2. Matériel et méthodes.....	24
IV.2.1. Matériel.....	24
IV.2.1.1. Matériel biologique.....	24
La spiruline.....	24
Eau usée.....	25
IV.2.1.2. Appareillages et verrerie.....	26
IV.2.1.2.1. Appareillages.....	26
IV.2.1.2.2. Verrerie.....	27
IV.2.2. Méthodes.....	27
IV.2.2.1. Réactivation de la spiruline.....	27
Mode opératoire.....	27
IV.2.2.2. Essais de culture de <i>Spirulina platensis</i>	28
IV.2.2.2.1. 1 ^{eme} expérience : Essai de culture de la spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM (M ₀).....	28
IV.2.2.2.2. Optimisation de la culture.....	28
2 ^{eme} expérience : Optimisation de la composition de milieu de culture M ₀	29
3 ^{eme} expérience : Optimisation de la quantité d'inoculum dans le milieu pré-optimisé M ₂	29
4 ^{eme} expérience : Optimisation de l'aération et de l'agitation....	30
5 ^{eme} expérience : Optimisation de l'éclairage.....	31
IV.2.2.3. Paramètres de la culture.....	31
IV.2.2.3.1. Suivi de croissance.....	31
Mesure de la densité optique (DO).....	32
Mesure de pH.....	32
Mesure de la matière fraîche.....	32
Traçage de la droite d'étalonnage.....	33
IV.2.2.3.2. Rendement en spiruline.....	33
IV.2.2.4. Étude morphologique des poudres de spiruline au Microscope Électronique à Balayage (MEB).....	33

IV.2.2.5. Méthodes d'analyse des eaux de l'ENIEM.....	33
IV.2.2.5.1. Dosage des métaux lourds par la Spectrométrie à absorption atomique de flamme.....	33
IV.2.2.5.2. Mesure de la DCO, DBO ₅ et Ph.....	34

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1. Résultats de la culture de <i>Sp.platensis</i>	35
V.1.1. Résultats de la culture de la spiruline dans le milieu M ₀	35
V.1.2. Résultats de l'optimisation de la culture.....	36
V.1.2.1. 2 ^{ème} expérience : Résultats d'optimisation de la composition de milieu de culture M ₀	36
V.1.2.2. 3 ^{ème} expérience : Résultats d'optimisation de la quantité d'inoculum dans le milieu pré-optimisé M ₂	38
V.1.2.3. 4 ^{ème} expérience : Résultats de l'optimisation de l'aération et de l'agitation.....	40
V.1.2.4. 5 ^{ème} expérience : Résultats de l'optimisation de l'éclairage.....	41
V.2. Rendement en biomasse.....	42
V.3. Résultats de l'étude morphologique des poudres de spiruline.....	44
V.4. Résultats d'analyse des eaux de l'ENIEM.....	46
V.4.1. Résultats d'analyse de la composition chimique.....	46
V.4.2. Résultats de la mesure de la DCO, DBO ₅ et Ph.....	47
Conclusion générale.....	49

Références Bibliographiques

Annexes

Introduction générale

Introduction générale

Les activités humaines, domestiques, agricoles et industrielles produisent toutes sortes de déchets et de souillures qui sont susceptibles d'engendrer différentes sortes de pollution et de nuisances dans le milieu récepteur. Cet ensemble d'eau rejetée et de déchets constitue ce qu'on appelle les eaux usées (Aba aaki, 2012).

Le traitement de ces eaux est indispensable pour la préservation de notre environnement. Il permet de limiter l'impact des diverses pollutions sur la santé humaine.

Il existe de nombreuses techniques dans le domaine de traitement des eaux ayant pour but d'éliminer les matières solides, les huiles, les graisses, les composés organiques biodégradables ou non-biodégradables, et les molécules toxiques, etc. Ces techniques, appliquées seules ou en cascade, permettent d'améliorer le niveau de traitement (Abouzlam, 2006).

Parmi ces techniques, le traitement biologique occupe une place très importante. En effet, ce traitement permet d'éliminer les polluants dissous. Plusieurs populations de micro-organismes sont capables de dégrader ces polluants, on trouve les cyanobactéries.

Ces dernières, anciennement appelées algues bleues, compte parmi l'une des plus anciennes formes de vie sur Terre et constitue l'essentiel des bactéries capables de photosynthèse avec production d'oxygène. Parmi elles, existent le genre *Spirulina* ou *Arthrospira*, des cyanobactéries filamenteuses dont fait partie *Spirulina platensis* (ou *Arthrospira platensis*) plus connue sous le nom d'algue Spiruline (Sguera, 2008).

La spiruline est une micro-algue bleu-verte a été proposée dans l'alimentation humaine (FAO) par plusieurs scientifiques et nutritionnistes grâce à ses qualités nutritionnelles exceptionnelles, sa facilité de culture, sa haute productivité et son faible coût de production (Benahmed Djilali, 2012).

Cette micro-algue est considérée comme une ressource alimentaire non conventionnelle pouvant contenir jusqu'à 70% de protéines; elle est riche en sels minéraux, en oligo-éléments et en nombreuses vitamines (B1, B2, B12, E,...) (Sall *et al.*, 1999).

Outre des propriétés nutritionnelles avérées, la spiruline connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique internationale du fait de sa possible utilisation comme source de produits à vertus thérapeutiques. En effet, le potentiel de cette micro-algue semble être important et ceci principalement grâce à son principal pigment, la phycocyanine, donnant à cet organisme sa couleur bleu-vert caractéristique (Sguera, 2008).

Le genre *Spirulina* se développe naturellement dans les eaux alcalines de certains lacs en zones chaudes. Ces eaux sont généralement riches en carbonate de sodium (Na_2CO_3) ou en bicarbonate de sodium (NaHCO_3), ce qui leur confère des valeurs de pH comprises entre 9 et 11 (Fox, 1999).

Introduction générale

La spiruline fait l'objet d'un développement de cultures dans les régions où elle vit naturellement; en Afrique, en Asie et en Amérique, mais également dans des fermes spécialement conçues pour sa production à l'échelle industrielle. En Europe, elle est produite sous serres ou en photobioréacteurs (Jourdan, 2006).

L'objectif principal de ce travail consiste à développer *Spirulina platensis* dans les rejets d'eaux usées de l'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (ENIEM) à l'échelle pilote en vue de leur dépollution.

Ce travail comporte deux parties, la première partie est relative à l'étude bibliographique et la seconde est réservée à l'étude expérimentale.

L'étude bibliographique comprend trois chapitres, le premier présente des généralités sur la spiruline, le second est réservé à la culture de spiruline et sa production, le dernier traite les caractéristiques et techniques d'épuration des eaux usées.

En ce qui concerne l'étude expérimentale, elle porte sur les différentes expérimentations faites concernant les essais de culture de spiruline dans les eaux usées de cette entreprise ainsi que les différents résultats obtenus.

Enfin, nous terminons notre étude par une conclusion générale où sont récapitulés les principaux résultats obtenus.

Partie bibliographique

Chapitre I

Généralités sur la spiruline

I.1. Définition de la spiruline

Les Cyanobactéries, anciennement appelées algues bleues puis Cyanophycées, sont des bactéries capables de faire la photosynthèse avec production d'oxygène (Falquet, 2000). Ce groupe comprend à ce jour plus de 200 genres et environ 1 500 espèces connues.

Parmi ces espèces on trouve la spiruline, a la forme d'un filament pluricellulaire bleu-vert, mobile, non ramifié et enroulé en spirale (Figure 01). Ce filament est appelé trichome; sa forme hélicoïdale, observable uniquement en milieu liquide, est une caractéristique du genre. C'est d'ailleurs de là que la spiruline tient son nom (Cruchot, 2008).

La longueur moyenne du filament et son diamètre ne sont pas toujours les mêmes selon les chercheurs étudiant la spiruline. D'après Zarrouk (1966), la spiruline a une longueur moyenne de 250 µm quand elle possède 7 spires et un diamètre de 10 µm.



Figure 01 : Filament de *Spirulina platensis* (Fox, 1999).

I.2. Systématique

La terminologie de la spiruline est assez confuse. En effet, dans la littérature, on trouve des confusions de termes tels que Spiruline, Spirulina et Arthrospira. Ces confusions proviennent des disparités entre la détermination scientifique et la dénomination commerciale de ces Cyanobactéries (Falquet, 2000).

D'après Girardin-Andréani (2005), la Spiruline est le nom commercial d'une cyanobactérie alimentaire du genre Arthrospira. Alors que Spirulina est d'une part le nom commercial anglais d'une Cyanobactérie alimentaire du genre Arthrospira, d'autre part le nom scientifique d'un genre de Cyanobactérie assez éloigné d'Arthrospira comme *Spirulina subalsa*.

Enfin, Arthrospira est le nom scientifique d'un genre de Cyanobactérie éloigné du genre Spirulina qui comprend l'ensemble des Cyanobactéries alimentaires vendues sous le nom de Spiruline (Spirulina en anglais).

La classification systématique de la spiruline a été étudiée par plusieurs auteurs. Gardner (1917) a suggéré de retenir le nom 'Arthrospira' pour les formes à paroi visiblement cloisonnée et celui de 'Spiruline' pour les formes à cloisons invisibles.

Par la suite, Berguey (1994) les a classées comme suit :

Ordre : Nostocales

Famille : Oscillatoriaceae

Genre : *Spirulina*

Espèce : *S.platensis* et *S.maxima*

I.3. Historique

Les premiers écrits concernant la spiruline datent du 16^{ème} siècle lorsque les Espagnols partirent à la conquête de l'Amérique du Sud, et notamment du Mexique. Elle était consommée par les Aztèques (le peuple originel du Mexique avant l'arrivée des colons espagnols), qui la collectaient sur l'eau des lacs de Mexico et qui l'appelaient Tecuitlatl et la mélangeaient avec du maïs (Paniagua-Michel *et al.*, 1993 ; Margain, 2016).

Bien que déjà décrite par Wittrock et Nordstedt en 1844 sous le nom de *Spirulina jeneri platensis* (Fox, 1999), l'algue ne fut vraiment redécouverte que quelques années après par le botaniste belge Léonard lors d'une expédition belgo-française basée au Tchad (1964 - 1965).

Ce botaniste a en effet constaté que, les Kanembous, population autochtone du Kanem, une région située au nord du lac Tchad, écumaient la surface des mares aux environs du lac Tchad, à la recherche de la fameuse algue abondante sur ce lac et récoltée sous forme d'une purée bleu-verte. Cette purée était ensuite utilisée dans la préparation de gâteaux vendus dans la région et appelé « dihé » (Ciferri, 1983 ; Girardin-Andréani, 2005).

Un phycologiste français Dangeard avait examiné ces gâteaux dès 1940 et avait constaté qu'ils étaient faits d'une algue bleue comestible en forme de spirale. Le botaniste Leonard et son collègue Compere (1967) ont confirmé 25 ans plus tard le rapport de Dangeard. Les chercheurs belges démontreront que les gâteaux « dihé » contenaient essentiellement l'algue bleue *Spirulina platensis*.

Ces résultats ont dirigé les pas des chercheurs vers Mexico. Tout en effet, dans le dihé, dans sa récolte, dans son utilisation, rappelle le tecuitlatl. Et de fait, le tecuitlatl est en réalité un gâteau de spiruline, extrêmement riches en protéines, appartenant à l'espèce *Spirulina maxima* (Paniagua-Michel *et al.*, 1993).

Dans les 10 dernières années, les cultures intentionnelles et intensives de spirulines se sont implantées en plusieurs endroits du monde. La culture industrielle a repris sur le lac au Mexique en 1976 par la société Sosa Texcoco. Depuis, plusieurs entreprises se sont implantées un peu partout (Fox, 1999).

A l'heure actuelle, un minimum de 50 souches de *Spirulina* a été découvertes de par le monde et étudiées pour en décrire sa diversité génétique. Il n'existerait alors qu'une ou deux espèces génétiques parmi ces souches, ce qui laisse à supposer que le nombre d'espèces de ce genre est fortement réduit (Charpy *et al.*, 2008). Les souches les plus connues et les plus utilisées actuellement restent *S. platensis* provenant du Tchad et *S. maxima* provenant du Mexique.

I.4. Valeur nutritionnelle

I.4.1. Protéines

La spiruline est particulièrement riche en protéines puisqu'elles représentent 50 à 70% de son poids sec. Ces valeurs sont tout à fait exceptionnelles. D'autre part, par comparaison avec les autres sources de protéines végétales qui sont toutes moins riches, la spiruline est consommable dans sa totalité (Falquet et Hurni, 2006).

D'un point de vue qualitatif, les protéines de cette micro-algue ont une valeur biologique très haute car, elles renferment tous les acides aminés essentiels pour l'adulte (tableau I); ceux-ci représentent 47% du poids total des protéines (Falquet et Hurni, 2006).

Le tableau I indique, à titre d'exemple, la teneur en acides aminés dans 1 kg de spiruline de la marque " Flamant Vert " (selon la notice).

Tableau I : Teneur de la spiruline " Flamant Vert " en acides aminés (Compagnie Tourne-Sol, 2016).

Acides aminés	Teneur en g/kg de spiruline (poids sec)
Alanine	47
Arginine	43
Acide aspartique	61
Cystine	06
Acide glutamique	91
Glycine	32
Histidine	10
Isoleucine	35
Leucine	54
Lysine	29
Méthionine	14
Phénylalanine	28
Proline	27

Autre avantage : la spiruline est beaucoup plus facile à digérer que d'autres compléments alimentaires comme les levures ou les chlorelles. Ses cellules ne sont pas protégées par d'épaisses parois cellulodiques, ce qui lui vaut un " taux de digestibilité" de l'ordre de 75 à 83% (Benahmed Djilali, 2012). De ce fait, elle ne nécessite pas de cuisson ni même l'administration d'un traitement spécial pour une bonne digestibilité protéique (Charpy *et al.*, 2008).

I.4.2. Glucides

Les glucides représentent 15 à 20% du poids sec de la spiruline (Ciferri, 1983). L'essentiel des glucides assimilables tels que des glucosanes aminés (1,9% du poids sec) et des rhamnosanes aminés (9,7%) ou encore de glycogène (0,5%). Les glucides simples ne sont présents qu'en très faibles quantités : ce sont le glucose, le fructose et le saccharose. On trouve aussi des polyols comme le glycérol, le mannitol et le sorbitol (Falquet et Hurni, 2006).

Du point de vue nutritionnel, la seule substance glucidique intéressante par sa quantité chez la spiruline est le méso-inositol phosphate qui constitue une excellente source de phosphore organique ainsi que l'inositol (350-850 mg/kg MS). Cette teneur en inositol est environ huit fois à celle de la viande de bœuf et plusieurs centaines de fois celle des végétaux qui en sont les plus riches (Falquet et Hurni, 2006).

Un polysaccharide spécifique de la spiruline, est le Calcium spirulane, a été isolé et partiellement caractérisé. Cette substance semble prometteuse comme anti-viral dans certaines applications thérapeutiques (Falquet et Hurni, 2006).

I.4.3. Lipides et acides gras

Le taux des lipides dans la spiruline est d'environ 5 à 6% (Sall *et al.*, 1999). La plupart d'entre eux sont représentés par les acides gras essentiels. L'importance des acides gras tient à leurs devenir biochimiques ; ce sont les précurseurs des prostaglandines, des leukotriènes et des thromboxanes qui sont des médiateurs chimiques des réactions inflammatoires et immunitaires (Falquet et Hurni, 2006).

Les principaux acides gras de la spiruline sont représentés dans le tableau II.

Tableau II : Les principaux acides gras de la spiruline (Falquet et Hurni, 2006).

Acides gras	% des acides gras totaux
Palmitique (16:0)	25-60
Palmitoléique (16:1) oméga-6	0,5-10
Stéarique (18:0)	0,5-02
Oléique (18:1) oméga-6	05-16
Linoléique (18:2) oméga-6	10-30
Gamma-linolénique (18:3) oméga-6	08-40
Alpha-linolénique (18:3) oméga-3	Absent

I.4.4. Vitamines

La teneur de la spiruline en vitamines est présentée dans le tableau ci-après :

Tableau III : Teneur en vitamines en $\mu\text{g/g}$ de matière sèche de spiruline (Gneclie Mahi, 2006).

Vitamines	Teneur ($\mu\text{g/g}$)
B1 (thiamine)	34-50
B2 (riboflavine)	30-46
B3 (niacine)	130
B5 (pantothénate)	4,6-25
B6 (pyridoxine)	5-8
B8 (biotine)	0,05
B9 (folate)	0,5
B12 (cobalamine)	0,1-0,34
C (acide ascorbique)	Traces
Provitamine A (β-carotène)	700-1700
Cryptoxanthine	100
Vitamine E (alpha-tocophérol)	120

La spiruline possède une teneur exceptionnelle en vitamine B12 (0,1-0,34 $\mu\text{g/g}$), laquelle est de loin la vitamine la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient (Falquet et Hurni, 2006).

La vitamine E fait partie de la famille des tocophérols et est reconnue comme antioxydant grâce à sa capacité à inhiber les peroxydations lipidiques (Cuvelier *et al.*, 2003).

I.4.5. Minéraux et oligo-éléments

Les minéraux spécialement intéressants chez la spiruline sont le magnésium, le calcium, le phosphore, le potassium, le fer et le zinc. Les trois premiers sont présents dans la spiruline à des teneurs comparables à celles trouvées dans le lait (Falquet et Hurni, 2006).

Pendant la culture, la spiruline absorbe plusieurs minéraux du milieu. Ainsi, sa teneur en minéraux varie en fonction du milieu de croissance et des minéraux présents dans l'eau (Henrikson, 1997).

I.4.6. Pigments

La spiruline est riche en pigments responsables de sa couleur. Les principaux pigments sont la phycocyanine et la chlorophylle.

1.4.6.1. Chlorophylle (pigment vert)

La Spiruline a un taux plus élevé en chlorophylle que l'on puisse trouver dans la nature (environ 1%). Elle ne dépasse pas cependant les niveaux de la *Chlorella* (2 à 3%) qui est aussi une micro-algue très intéressante sur le plan nutritionnel (Gneclie Mahi, 2006).

La chlorophylle est connue pour son pouvoir nettoyant et purifiant. Ses propriétés aident à détoxifier l'organisme des agressions liées à la pollution (Gneclie Mahi, 2006).

1.4.6.2. Phycocyanine (pigment bleu)

La phycocyanine (Pc) est une phycobiliprotéine. Seul colorant bleu alimentaire naturel, elle est le pigment le plus abondant de la spiruline et représente plus de 15% du poids frais et plus de 20% du poids sec de l'algue (Sall *et al.*, 1999).

La Pc est spécifique de l'algue bleu-vert puisqu'on ne la trouve nulle part ailleurs dans la nature. Elle est considérée comme un précurseur de l'hémoglobine et de la chlorophylle dans la mesure où son noyau renferme à la fois un ion fer et un ion magnésium (Document Natésis, 2003).

1.5. Valeur thérapeutique

Jusqu'à tout récemment, l'intérêt pour la spiruline portait surtout sur sa valeur nutritive. À l'heure actuelle, elle attire de plus en plus l'attention des scientifiques médicaux comme source de produits pharmaceutiques. C'est ainsi qu'un bon nombre de chercheurs ont étudié les effets thérapeutiques possibles de ce microorganisme.

Plusieurs études montrent que, la spiruline ou ses extraits permettent d'empêcher ou d'inhiber des cancers chez l'humain et l'animal. En 1995, une étude menée à Kerala (État indien) a montré que, la régression d'un cancer oral chez 45% de patients malades ayant avalé 1g de spiruline par jour pendant un an, était constatée (Babu, 1995).

La spiruline de par sa teneur en fer et en vitamine B12, lutte efficacement contre les formes d'anémies respectivement ferriprive et pernicieuse. Des études réalisées par Kabore en 2001 sur 59 enfants malnutris et anémiés révélèrent l'effet positif de la spiruline sur le taux d'hémoglobine et le nombre des hématies et cela en 8 semaines de récupération.

Cette micro-algue traite aussi l'hyperglycémie chez les diabétiques. Une étude menée par Parikh *et al.* (2001), démontre qu'une prise de deux grammes de spiruline par jour pendant deux mois, réduit non seulement l'hyperglycémie à jeun mais aussi l'hyperglycémie postprandiale chez les sujets atteints de diabète de type 2.

En 1996, des chercheurs japonais découvrent et baptisent « Calcium-spirulane » un extrait aqueux de spiruline particulièrement riche en calcium et en soufre. Le calcium-spirulane empêche la pénétration de la membrane cellulaire par certains virus comme le VIH-1, le Herpès Simplex, le virus de la grippe de type A et le virus de la rougeole (Hayashi T et Hayashi K, 1996).

Grâce à ses propriétés antioxydantes (acide gamma-linoléniques, tocophérol, carotène et particulièrement la phycocyanine), la spiruline d'une part, contribue à ralentir le vieillissement de la peau, d'autre part, influe sur l'hématopoïèse en stimulant la prolifération et la différenciation des cellules souches situées dans la moelle osseuse (Kozlenko et Henson, 1996).

I.6. Caractéristiques générales de la phycocyanine

La phycocyanine appartient à un groupe de protéines photorécepteurs appelées phycobiliprotéines. La Pc est composée de deux sous unités protéiques dissemblables α et β de poids moléculaire de 17000 et 19500 Da, respectivement, avec un chromophore (phycobiline) lié à la sous unité α et deux chromophores liés à la sous unités β (figure 02) (Romay *et al.*, 2003).

Le chromophore est un tétrapyrrole ouvert attaché à la protéine porteuse par une liaison covalente sur fonction thiol (Pelmont, 1995). Il représente 4,7% de la phycocyanine (figure 02) (Mccarty, 2007).

La Pc intervient dans la photosynthèse. Elle absorbe la lumière dans le spectre du visible avec un maximum à 620 nm et émet de la fluorescence à environ 650 nm (Contreras-Martel *et al.*, 2007).

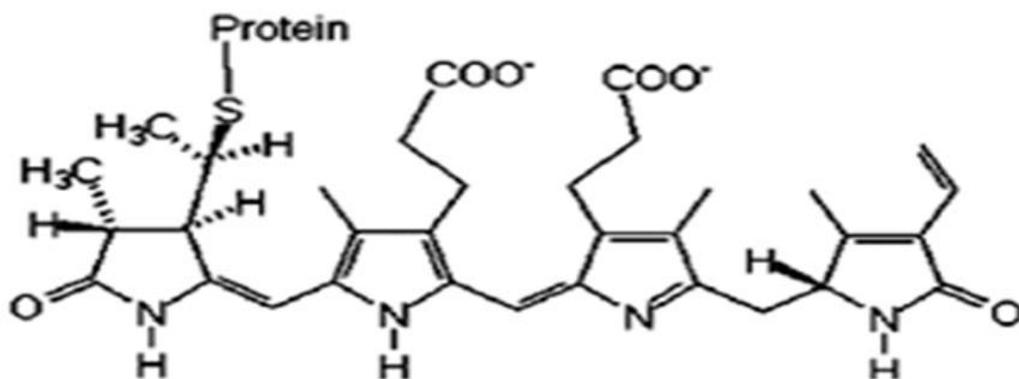


Figure 02 : Schéma général de la phycocyanine (Romay *et al.*, 2003).

Chapitre II

Culture et production de la spiruline

II.1. Culture de spiruline

Spirulina platensis est une cyanobactérie largement cultivée dans le monde. La production mondiale de cette première peut dépasser les 3000 tonnes de biomasse par an (Becker et Venkataraman, 1984).

II.1.2. Paramètres de culture

L'un des plus grands avantages de la culture de la spiruline comparée aux autres types de cultures est sa croissance dans des conditions extrêmes (salinité et alcalinité), permettant ainsi d'exclure la prolifération de la plupart des autres microorganismes (Benahmed Djilali, 2012).

II.1.2.1. Température

La spiruline est une cyanobactérie mésophile qui croit à des températures variant entre 25 et 40°C (Fox, 1999), avec un optimum de 30°C (Ogbonda *et al.*, 2007).

À des températures inférieures à 20°C, la vitesse de croissance est ralentie ou pratiquement stoppée (Jourdan, 2006 ; Ogbonda *et al.*, 2007). Au-delà de 40°C, la culture déperira par un excès de chaleur et la spiruline finisse par une éventuelle mort (Becker et Venkataraman, 1984).

II.1.2.2. potentiel Hydrogène (pH)

La spiruline prolifère dans des eaux alcalines dont le pH varie entre 8,5 et 11 avec un optimum de 9,5 (Ciferri, 1983 ; Fox, 1999).

L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium (NaHCO₃), mais ce dernier peut être remplacé, en partie; par de la soude caustique ou du carbonate de sodium (Na₂CO₃) pour relever le pH initial du milieu de culture (Fox, 1999).

II.1.2.3. Salinité

La croissance de la spiruline semble être liée directement à la concentration du milieu en sels. Elle croit dans des eaux salines à des concentrations variant entre 20 et 70 g/l (Ciferri, 1983).

II.1.2.4. Lumière

La spiruline est un organisme photosynthétique, pour croître elle a besoin de lumière avec une intensité comprise entre 30 et 40 klux. Cependant, à de fortes intensités lumineuses, une photolyse peut se produire (Becker et Venkataraman, 1984).

II.1.2.5. Oxygène et agitation

Comme tout autre microorganisme aérobie, la spiruline a besoin d'oxygène (O₂) pour respirer. Cependant, cet O₂ peut être toxique quand il est en sursaturation lors de la photosynthèse active (Jourdan, 2006).

Pendant le jour, l'agitation est nécessaire pour homogénéiser, favoriser l'élimination de l'oxygène et assurer une bonne répartition de l'éclairage (Jourdan, 2006).

II.2. Production de la spiruline

La spiruline est produite dans plusieurs Pays des quatre continents que sont l'Afrique, l'Asie, l'Amérique et l'Europe. Les modes et moyens de production varient d'un Pays à l'autre selon les paramètres climatiques mais aussi les moyens, ce qui explique la diversité dans les dimensions des moyens mis en œuvres pour la réalisation des fermes et bassins de production (Sguera, 2008).

La production de la spiruline se réalise presque exclusivement dans des bassins de culture, bien que certaines compagnies utilisent des photobioréacteurs qui permettent un meilleur contrôle de la croissance de l'algue (Jimenez *et al.*, 2003).

Cette micro-algue peut être obtenue en milieu naturel (Benahmed Djilali *et al.*, 2013) ou semi-naturel et en culture synthétique (Zarouk, 1966), contrôlée pour une production à diverses échelles: artisanale, semi-industrielle et industrielle (Gneclie Mahi, 2006).

II.2.1. Production artisanale

La spiruline est consommée depuis des siècles par différents peuples à travers le monde. Aujourd'hui de nombreux pays la cultivent artisanalement pour une consommation locale. Ainsi, des fermes artisanales se sont créées un peu partout dans le monde, principalement dans les pays où sévissent la famine et la malnutrition (Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Kenya...) (Charpy, 2002).

Les fermes artisanales de spiruline (Figure 03) sont des systèmes d'exploitation nécessitant un faible apport en énergie. La surface des bassins est très variable, n'excédant pas la centaine de m² pour une surface totale d'exploitation inférieure à 3000 m² (Gneclie Mahi, 2006).



Figure 03 : Photo d'une production artisanale au Mali (Sguera, 2008).

II.2.2. Productions semi-industrielle et industrielle

Les systèmes de production semi-industrielle et industrielle se différencient par l'ordre de grandeur de l'investissement, la surface des bassins de culture, le tonnage de production, et la sophistication des techniques de production.

II.2.2.1. Production semi-industrielle

Ces fermes sont constituées de bassins généralement de 200 à 1000 m² avec une surface totale exploitée entre 3000 m² et 1 hectare. Leur capacité de production annuelle est de 10 à 50 tonnes (Gneclie Mahi, 2006).

Dans les pays en voie de développement, les fermes semi-industrielles utilisent les mêmes technologies que les fermes artisanales (Gneclie Mahi, 2006).

II.2.2.2. Production industrielle

Industriellement, la spiruline n'a connu qu'un réel essor dans les années 70 lorsque sa culture a été reprise sur le lac Texcoco au Mexique en 1976 par la société Sosa Texcoco (Fox, 1999). Une exploitation industrielle, d'une surface totale de plusieurs hectares, peut produire entre 50 et 500 tonnes de spiruline sèche par an et même aller au-delà. Les bassins ont une surface de 1000 à 5000 m² (Gneclie Mahi, 2006).



Figure 04 : Photo des bassins de production de micro-algues de la société Alpha Biotech situés sur les côtes normandes (Sguera, 2008).

II.2.3. Étapes de production

Les différentes étapes de la production de la spiruline sont résumées dans la figure 05.

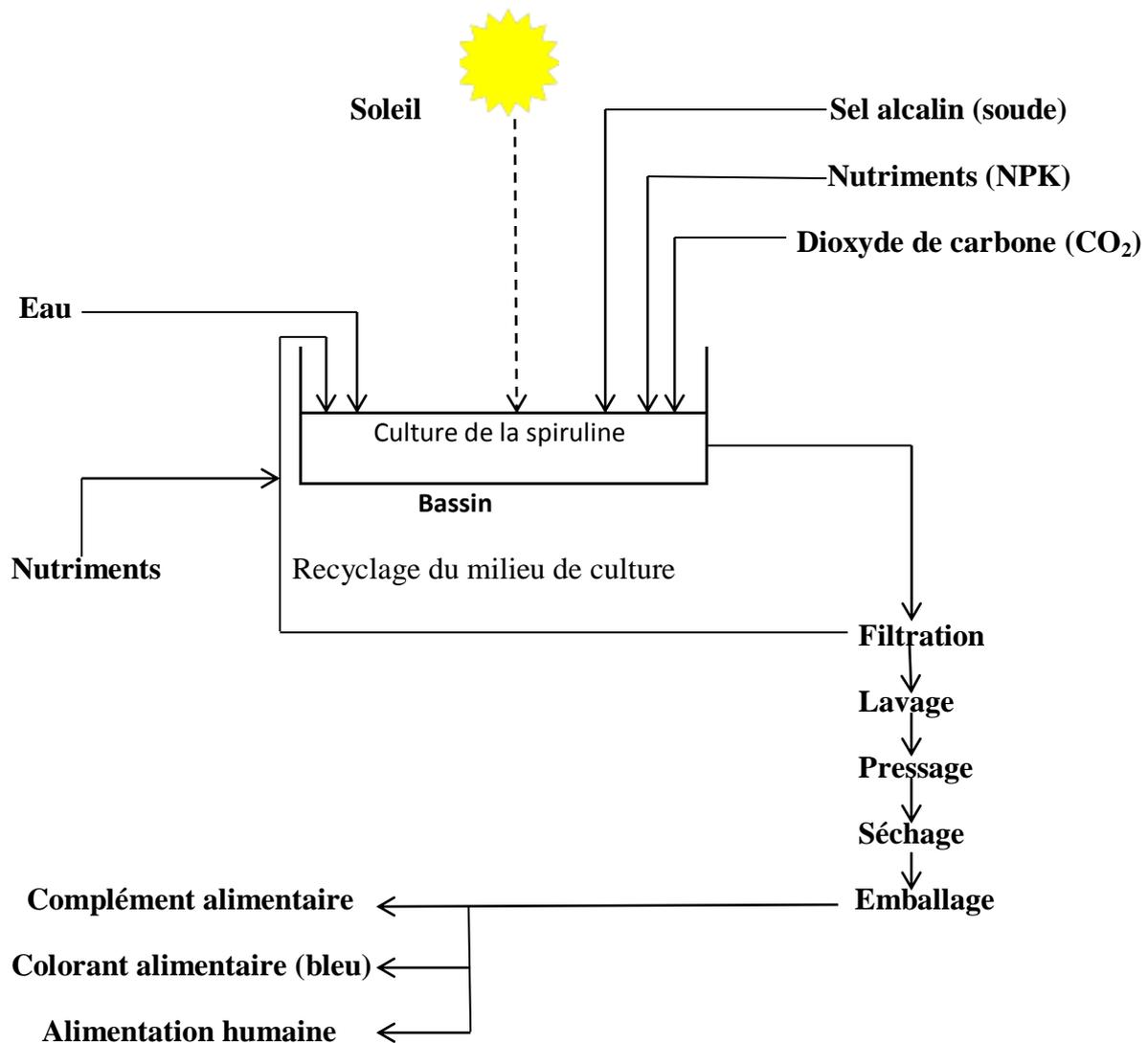


Figure 05 : Diagramme récapitulatif du processus de production de la spiruline (Shimamatsu, 2004).

II.3. Essais de culture de la spiruline en Algérie

Des essais de culture de spiruline ont été réalisés dans le lac d'El Goléa (au niveau d'une station qui reçoit les rejets domestiques de la ville d'El Goléa). Pour cela, deux bacs en polystyrène remplis avec de l'eau de cette station, ont été inoculés avec de la spiruline. L'un des 2 bacs ayant été enrichi avec de la fiente de volaille asséchée et filtrée. Les résultats obtenus un mois plus tard ont montré que, la souche s'est bien adaptée et que la biomasse obtenue est 2,5 fois plus importante dans le bac enrichi (environ 1,6 g/l) (Hacène *et al.*, 2001).

La culture de la spiruline dans un milieu naturel à base de l'eau de mer, cendres de bois (figuier et olivier) et la saumure de fromage a été réalisée et réussie par Benahmed Djilali *et al.* (2013). Il s'avère que ce milieu donne un rendement en biomasse très intéressant ($3,05 \pm 0,305$ g MF/100 ml).

L'Algérie a aussi développé la culture artificielle de spiruline au sud algérien précisément à la région de Tamanrasset. Cependant la spiruline produite localement ne couvre pas les besoins des consommateurs (Benahmed Djilali, 2012).

Chapitre III

Généralités sur les eaux usées

III.1. Définition des eaux usées

Selon Rejsek (2002), les eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement des activités domestiques, agricoles et industrielles. Ces eaux englobent également les eaux de pluies et leur charge polluante, elles engendrent au milieu récepteur toutes sortes de pollution et de nuisance (Metahri, 2012).

III.2. Origine

Suivant l'origine et la qualité des substances polluantes, on distingue quatre catégories d'eaux usées :

III.2.1. Eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique (Metahri, 2012). Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants et de débris organiques, et en eaux de vanes ; il s'agit des rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux (El Hachemi, 2012).

III.2.2. Eaux usées industrielles

Ce sont les eaux usées qui proviennent de locaux utilisés à des fins industriels, commerciales, et artisanales (Aba Aaki, 2012).

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures (Metahri, 2012).

III.2.3. Eaux agricoles

Ces eaux proviennent des terres cultivées après lessivages et ruissellement. Elles sont riches en éléments fertilisants (azote et phosphore) et en polluants organiques (pesticides) (Aba Aaki, 2012).

III.2.4. Eaux pluviales

C'est une eau qui provient des précipitations atmosphériques (Aba Aaki, 2012). Elle se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...) (El Hachemi, 2012).

III.3. Caractéristiques des eaux usées

III.3.1. Paramètres physiques

III.3.1.1. Température

La température est un facteur écologique important des milieux aqueux, son élévation peut perturber fortement la vie aquatique (pollution thermique). Elle joue un rôle important dans la dénitrification et la dénitrification biologique (Merair et Salmi, 2014).

Elle a des effets sur la solubilité des sels et surtout des gaz, et aussi sur le pH et la détermination de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels (Rodier *et al.*, 2005).

III.3.1.2. Matières en suspensions (MES)

Ce sont les matières non dissoutes contenues dans l'eau Exprimées en (mg/L). Elles comportent à la fois des éléments minéraux (MMS) et organiques (MVS). Elles constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel. Les MES s'expriment par la relation ci-dessous décrite par Metahri (2012).

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS}$$

III.3.2. Paramètres organoleptiques

III.3.2.1. La Turbidité

D'après Rejsek (2002), la turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. Elle désigne aussi, la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Généralement, la turbidité des eaux est causée par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Elle varie suivant les MES présentes dans l'eau (Metahri, 2012).

III.3.2.2. La couleur

La couleur d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration (Rodier *et al.*, 2005).

III.3.3. Paramètres chimiques

III.3.3.1. Le pH

Les micro-organismes sont très sensibles aux variations du pH, et un développement correct de la faune et de la flore aquatique n'est possible que si sa valeur est comprise entre 6 et 9 (Metahri, 2012). L'influence du pH se fait également ressentir par le rôle qu'il exerce sur les autres éléments comme les ions des métaux dont il peut diminuer ou augmenter leur mobilité en solution bio disponible et donc leur toxicité. Le pH joue un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien (Merair et Salmi, 2014).

III.3.3.2. La conductivité

La conductivité est la propriété que possède une eau pour favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations.

En effet, la mesure de la conductivité fournit une indication précise sur la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). Elle s'exprime en Siemens par mètre (S/m) et permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau (Rejsek, 2002).

III.3.3.3. L'Oxygène dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est exprimée en $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ (Rejsek, 2002).

III.3.3.4. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO)

Exprimée en $\text{mg d'oxygène par litre}$. Elle exprime la quantité de matière organique biodégradable présente dans l'eau. Plus précisément, ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation de la matière organique par voie aérobie (El Hachemi, 2012). On prend souvent, comme référence, la DBO_5 : quantité d'oxygène consommée par les bactéries à 20°C à l'obscurité et pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablementensemencé (Metahri, 2012).

III.3.3.5. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

Elle mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation chimique de toute la matière organique biodégradable ou non contenue dans les eaux à l'aide du bichromate de potassium à 150°C . Elle est exprimée en $\text{mg O}_2/\text{l}$. La valeur du rapport DCO/DBO indique le coefficient de biodégradabilité d'un effluent (Rodier *et al.*, 2005).

Généralement la valeur de la DCO est variable :

$\text{DCO} = 1,5 \text{ à } 2 \text{ fois DBO}$ Pour les eaux usées urbaines ;

$\text{DCO} = 1 \text{ à } 10 \text{ fois DBO}$ Pour l'ensemble des eaux résiduaires ;

$\text{DCO} > 2,5 \text{ fois DBO}$ Pour les eaux usées industrielles (Metahri, 2012).

La biodégradabilité traduit l'aptitude d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes qui interviennent dans le processus d'épuration biologique des eaux (Metahri, 2012).

On peut noter aussi la présence parfois de certains composés chimiques à des doses variables, comme l'azote, les nitrates, l'azote ammoniacal, le phosphore, le plomb, le cuivre, le fer, le chrome, le zinc, le sulfate... (Rodier *et al.*, 2005).

III.3.4. Paramètres bactériologiques

Selon l'origine de l'eau on peut trouver différentes espèces de bactéries ainsi que d'autres micro-organismes. Généralement, les eaux usées domestiques sont les plus susceptibles d'être porteuses de germes qui peuvent être pathogènes, on trouve surtout les germes fécaux tel que les coliformes, les streptocoques fécaux, et les bactéries sulfito-réductrices (Rodier *et al.*, 2005).

III.4. Traitements des eaux usées

Le traitement des eaux usées est nécessaire à la préservation de notre environnement altéré par de nombreuses pollutions. Il est ainsi indispensable de traiter les eaux usées urbaines et industrielles avant leur rejet dans le milieu naturel.

Les méthodes utilisées et les filières de traitement définies dépendent de l'origine des eaux à traiter et de l'objectif du traitement lié à la qualité du milieu récepteur. Les principales techniques mises en œuvre en traitement des eaux sont de nature physique, chimique, physico-chimique ou biologique (Abouzlami, 2006).

III.4.1. Prétraitement

Les prétraitements sont une phase d'épuration grossière. Au cours des quels, on élimine tous les éléments solides volumineux et grossiers (sables, corps gras) qui pourraient d'ailleurs endommager les installations par la suite. Notons qu'on retire alors environ 35% des éléments polluants (Moulin *et al.*, 2013). Parmi les étapes de prétraitements on peut citer : le dégrillage, le dessablage, déshuilage et le dégraissage.

III.4.1.1. Le dégrillage

Il s'agit de séparer les eaux brutes des matières les plus volumineuses (gros débris solides), en faisant passer l'effluent d'entrée à travers des barreaux dont l'espacement est déterminé en fonction de la nature de l'effluent (Merair et Salmi, 2014).

III.4.1.2. Le dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire des effluents bruts les graviers, le sable et les particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, ainsi pour protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion et à éviter de surcharger les stades de traitements ultérieurs (Merair et Salmi, 2014).

III.4.1.3. Le déshuilage et le dégraissage

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre le piégeage des graisses). Ces deux procédés visent à éliminer la présence des corps gras dans les eaux usées, qui peuvent gêner l'efficacité de traitement biologique qui intervient par la suite (Metahri, 2012).

III.4.2. Traitements physico-chimiques (traitements primaires)

Le traitement primaire au sens strict est un traitement physico-chimique. Il est possible d'ajouter dans l'eau des agents coagulants et floculants. On peut alors récupérer un grand nombre de particules en suspension par décantation ou floculation (Boues physico-chimiques) (Moulin *et al.*, 2013).

Les performances de la décantation peuvent être améliorées par l'ajout des produits chimiques (sulfate d'alumine, chlorure ferrique...) qui neutralisent les particules chargées, en augmentant ainsi la probabilité de collision entre les particules (coagulation et floculation), ainsi que la formation des floes par la suite facilement décantables (Aba Aaki, 2012). Cette étape permet d'éliminer 90% des particules et objets en suspension (Moulin *et al.*, 2013).

III.4.3. Traitements biologiques (traitements secondaires)

Ces traitements sont biologiques et permettent d'éliminer les polluants dissous. Pour cela on utilise des populations de micro-organismes capables de les consommer (Moulin *et al.*, 2013). Ces procédés, basés sur l'activité bactérienne dégradant les composés organiques, sont classés en deux groupes selon le genre de bactéries présentes dans l'eau (Abouzlam, 2006) :

- Les procédés aérobies nécessitant la présence d'oxygène,
- Les procédés anaérobies se développant en absence d'oxygène.

Il existe plusieurs procédés biologiques d'épuration. On distingue souvent les procédés biologiques extensifs et les procédés biologiques intensifs.

III.4.3.1. Les procédés biologiques extensifs

Dans ces procédés, tout se passe naturellement sans intervention artificielle et mécanique. Parmi ces procédés, on peut citer :

➤ *Épuration par le sol*

Ce procédé compte sur les propriétés de filtration et la capacité du sol à assimiler une masse bactérienne active (Abouzlam, 2006).

➤ *Lagunage naturel*

Les eaux usées sont stockées dans des plans d'eaux peu profondes : les lagunes. L'activité microbienne se fait naturellement : échange avec l'atmosphère, photosynthèse... . Des aérateurs peuvent être utilisés pour brasser l'air et optimiser l'activité des bactéries. Ces processus induisent à la formation de boues de lagunage au fond des bassins qui sont récupérées (Moulin *et al.*, 2013).

III.4.3.2. Les procédés biologiques intensifs

La prolifération des bactéries est activée artificiellement dans ces procédés. Ils peuvent appartenir à deux grandes catégories :

➤ *Les procédés biologiques à "culture libre"*

Pour ce procédé les bactéries sont en suspension (boues activées) et en contact permanent avec les matières organiques. L'oxygène est diffusé par agitation ou injection d'air (Abouzlam, 2006).

➤ *Les procédés biologiques à "culture fixe"*

Les bactéries ici ne sont pas en suspension dans l'eau à traiter. Ces micro-organismes se développent sur un support comme des cailloux, du plastique, En effet, le film bactérien développé sur les surfaces du support constitue ce qu'on appelle le biofilm et permet la dégradation des matières organiques (Abouzlam, 2006).

III.4.4. Traitements tertiaires

Ces traitements sont à la fois physico-chimiques et biologiques. On les réalise après les traitements primaires et secondaires afin d'éliminer des éléments nutritifs résiduels, des polluants organiques résistants, des métaux, des pigments... . Par exemple, on peut utiliser des traitements biologiques avancés pour éliminer le phosphore par le Déplacement Nutritif Biologique (DNF). On fait passer l'eau par différents réservoirs avec des bactéries et dans des conditions environnementales différentes (différence de concentration en dioxygène par exemple). On récupère ensuite les boues lors d'un nouveau passage dans un clarificateur (Moulin *et al.*, 2013).

Un autre type de traitement que l'on pourrait classer comme tertiaire est le traitement aux UV. On dénature alors des molécules, comme les œstrogènes, sensibles à ces rayons (Moulin *et al.*, 2013).

Partie expérimentale

Chapitre IV

Matériel et méthodes

IV.1. Présentation de l'entreprise « ENIEM »

IV.1.1. Généralités

L'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (ENIEM) est le leader en Algérie dans la fabrication des appareils électroménagers. Elle est l'une des plus anciennes entreprises nationales (Harouz, 2012).

Sa mission consiste en la fabrication, l'assemblage, la vente et la promotion des services après-vente des produits électroménagers (Dahmoune, 2009).

Grâce à un business plan doté de plusieurs milliards de dinars, l'ENIEM s'est même vu attribuée la certification ISO 9001/2008 qualité et ISO 14001/2004 environnement (ENIEM Électroménager, 2013).

Elle est issue de la restructuration organique de la Société Nationale de fabrication et de montage du Matériel Électrique et Électronique (SONELEC), créée en 1974 dont la production dans le domaine de l'électroménager a démarré en 1977 (Dahmoune, 2009).

L'ENIEM est transformée en une Entreprise Publique Économique en 1989 sous la forme juridique d'une Société Par Actions (SPA) et dotée d'un capital social de 4.000.000 de Dinars Algérien (DA) (Harouz, 2012). Elle relève actuellement de l'ELEC ELDJAZAIR qui détient la totalité de son capital qui est passé à 10.279.800.000 DA (ENIEM Électroménager, 2013).

IV.1.2. Situation géographique

L'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager est implantée à Tizi-Ouzou, où elle bénéficie de plusieurs avantages en infrastructures externes consistants en les routes dont la Route Nationale 12 et la voie ferrée Alger-Tizi-Ouzou (Harouz, 2012).

Le siège social de l'entreprise mère se situe au chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou. Les unités de production froid, cuisson, et climatisation sont implantées à la zone industrielle Aissat Idir de Oued-Aissi, distante de 7 km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

La zone industrielle d'Oued Aissi est située dans la plaine alluviale du Sébaou entre les Oueds Sébaou au Nord et Aissi à l'Ouest, où se trouve l'ENIEM (Lembrouk, 2012). Les coordonnées de l'installation sont regroupées dans le Tableau IV.

Tableau IV: Coordonnées de l'ENIEM.

Station	Latitude	Longitude	Altitude
ENIEM	36°42'10,40''	4°08'35,35''	100 m

L'entreprise dispose de deux filiales : la filiale sanitaire est installée à Miliana (wilaya d'Ain Defla), et la filiale lampe à Mohammadia (wilaya de Mascara) (ENIEM Électroménager, 2013).

IV.1.3. Gamme de produits

L'ENIEM offre une gamme de produits de l'électroménager variée et composée de plusieurs modèles de réfrigérateurs, de cuisinières, de climatiseurs et d'autres produits. Cette gamme est variée mais reste insuffisamment diversifiée pour permettre à l'entreprise de faire face à la concurrence des leaders de l'électroménager internationaux (Harouz, 2012).

Les différents produits de l'ENIEM sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau V : Différents produits de l'ENIEM (Harouz, 2012).

Unités	Produits
Froid	Réfrigérateurs " Petit Modèle " Réfrigérateurs " Grand Modèle " Congélateurs Conservateurs
Cuisson	Cuisinières
Climatisation	Climatiseurs Machines à laver Chauffe-eau/bain

IV.1.4. Production

La production est une activité principale de l'ENIEM. Elle nécessite l'acquisition de matières premières, de composants et de pièces de rechange (compresseurs, plaques évaporateurs, tubes aluminium, tôles et fils d'acier, robinetteries à gaz, etc...) utiles au fonctionnement des unités de fabrication dans des conditions meilleures en terme de couts, de délais et de qualité conformément aux exigences de la gestion de la production (Harouz, 2012).

Le tableau suivant montre l'évolution de la production de l'ENIEM de 2005 à 2009.

Tableau VI : Évolution de la production de l'ENIEM (Valeur en KDA) (Dahmoune, 2009).

Années	Froid	Cuisson	Climatisation	Production totale
2005	3 508 164	1 033 863	460 126	5 002 153
2006	2 835 382	1 091 574	25 739	3 952 695
2007	2 699 343	950 261	239 911	3 889 515
2008	2 868 567	1 016 991	675 904	4 561 461
2009	2 811 245	1 092 328	1 099 498	5 003 071

IV.1.5. Sources de pollution

IV.1.5.1. Déchets solides et leur mode de gestion

L'ENIEM est une usine qui produit beaucoup de déchets solides. Ces derniers peuvent être du plastique, bois, rebuts métalliques, bidons, cartons, boues d'émaillages, produits d'emballages...etc.

Ces déchets sont vendus à des entreprises de récupération. Cependant, certains produits et emballages dangereux (anciens fûts de cyanures) ne sont pas vendus et sont stockés sur des aires ou sous abris.

IV.1.5.2. Effluents liquides et leur mode de gestion

L'usine est pourvue d'un réseau de collecte des effluents séparatifs : un pour l'eau domestique et l'eau de lavage industrielle de refroidissement et de traitements divers (partie production) et un autre pour les eaux industrielles des ateliers de traitement de surface et les effluents chromés (concentrés et dilués) vers la station de neutralisation. Les deux systèmes se rejoignent dans un canal semi-enterré d'évacuation vers l'extérieur de l'usine (Lembrouk, 2012).

IV.1.5.2.1. Eaux de vannes et ménagères

Elles proviennent des sanitaires et de la cantine. Elles ne sont pas quantifiées ni analysées. Elles sont mélangées aux autres eaux et s'écoulent vers l'Oued.

IV.1.5.2.2. Eaux Industrielles

Elles proviennent des différents ateliers de traitement de surface. Ces eaux peuvent contenir divers produits chimiques (Figure 06).

La quantification des entrées et sorties n'est pas fait. En sortie, les réseaux d'acide concentré, d'acide dilué, de base concentrée et de base diluée sont séparés et arrivent dans la station de neutralisation (Lembrouk, 2012).



Figure 06 : Les eaux industrielles de l'ENIEM.

Grâce à la station de neutralisation et celle d'épuration, ces eaux sont traitées en respectant les procédés suivants (Lembrouk, 2012) :

- Réduction du chrome Cr^{6+} au bisulfite de sodium en Cr^{3+} .
- Neutralisation des eaux basiques et acides par auto-neutralisation par mélanges et / ou par addition de soude et d'acide sulfurique.
- Contrôles par analyse du pH et du Cr^{6+} .
- Flocculation (polyélectrolyte) sur séparateur à lamelles dans les bassins de décantation.
- Rejet des effluents liquides dans le canal d'assainissement.
- Envoie des boues vers les lits de séchage.
- Stocks des boues dans des fûts dans l'enceinte de l'entreprise.

IV.1.5.3. Caractéristiques des rejets des eaux et des boues

Les agents de la station de neutralisation suivent les performances du système de traitement par la mesure du pH, recherchant la neutralité et une teneur en chromes inférieure aux normes (Lembrouk, 2012).

Les services de l'UPT procèdent, pratiquement, chaque mois à des prélèvements pour analyses dans un laboratoire externe.

IV.2. Matériel et méthodes

IV.2.1. Matériel

IV.2.1.1. Matériel biologique

- La spiruline

La spiruline (*Spirulina platensis*) utilisée dans notre étude est une micro-algue en forme de petits granulés secs de couleur verte (poudre verte) (Figure 07). Ce microorganisme provient de Burkina-Faso.



Figure 07 : Aspect de la poudre de spiruline utilisée.

La poudre de spiruline préalablement préparée, a subi un chauffage à 65°C pendant 2 à 3 minutes dans l'étuve dont le but d'assurer sa bonne qualité hygiénique. Cette poudre est conservée dans une boîte fermée hermétiquement à l'abri de l'air, de la lumière et d'humidité.

Par la suite, la spiruline est revivifiée dans l'eau bicarbonatée (Voir la partie méthodes) afin d'obtenir l'inoculum, nécessaire en vue des cultures ultérieures.

- Eau usée

L'eau usée utilisée dans notre étude de dépollution provient de la station d'épuration des rejets de l'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (ENIEM) de la zone industrielle Aissat Idir de Oued-Aissi de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Cette eau est échantillonnée dans des bouteilles de plastiques de 2 litres (Figure 08), puis conservée dans le réfrigérateur à 4°C. Par la suite, elle est stérilisée dans un autoclave en vue d'une utilisation ultérieure.

L'eau de l'ENIEM peut contenir différentes substances chimiques, organiques et métalliques, telles que : des hydrocarbures, des métaux, des acides et bases ainsi que des produits chimiques divers.

Cette eau a subi un traitement physico-chimique avant d'être rejeter dans le milieu naturel (Voir présentation de l'entreprise ENIEM).

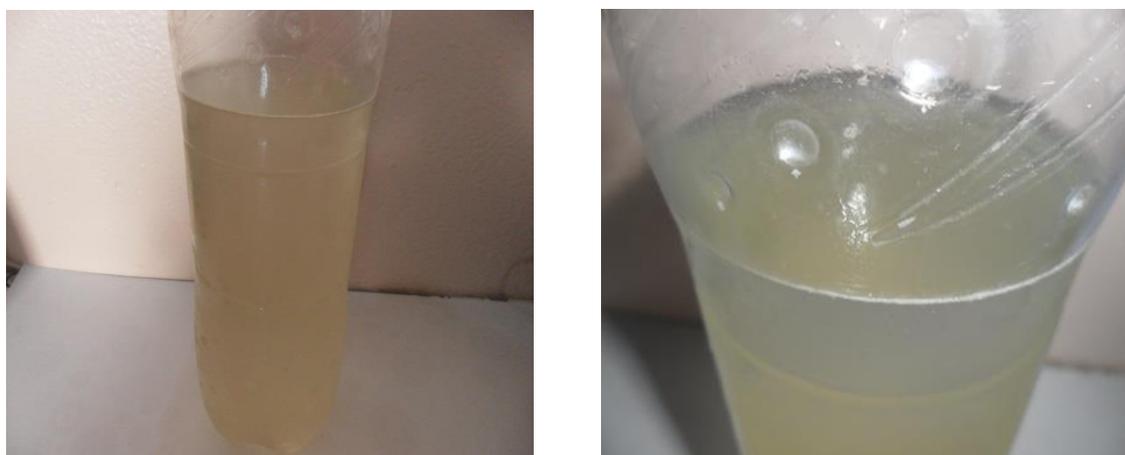


Figure 08 : Aspect des rejets d'eaux usées utilisés dans notre étude.

Les caractéristiques physico-chimiques de cette eau sont présentées dans le tableau VII.

Tableau VII : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de l'ENIEM.

Couleur	pH	DBO ₅ (mg d'O ₂ /l)	DCO (mg d'O ₂ /l)
Jaune -marron	7,04±0,0079	21,9	78,4

Généralement, la spiruline exige une salinité entre 20 et 70 g/l (Ciferri, 1983) et un pH ayant de 8,5 à 11 (Fox, 1999). Raison pour laquelle, nous, nous sommes intéressés à utiliser cette eau comme source minérale (salinité).

Par la suite, un enrichissement par la lessive de cendres de figuier (source d'alcalinité) (Figure 09) (Benahmed Djilali *et al.*, 2013) a été réalisé (Voir partie méthodes) afin d'atteindre un pH de l'ordre 11 exigé par la spiruline.

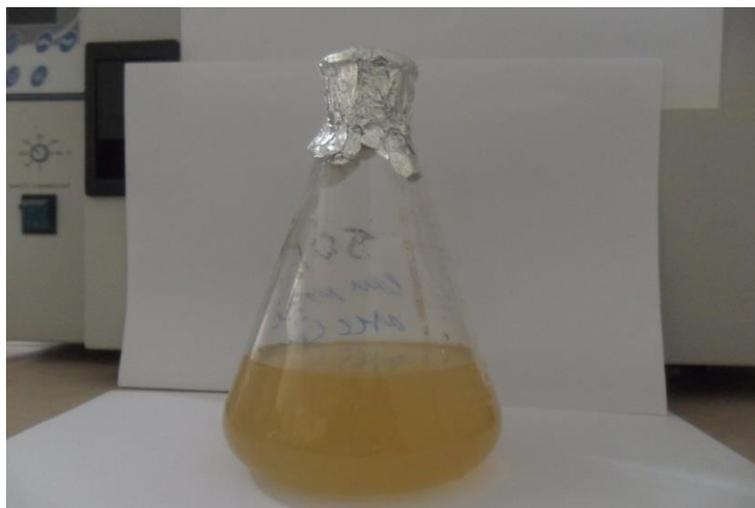


Figure 09 : Aspect de la lessive de cendres de bois de figuier de la région de Tizi-Ouzou.

IV.2.1.2. Appareillages et verrerie

IV.2.1.2.1. Appareillages

Le tableau VIII donne les marques des différents appareils utilisés dans notre étude.

Tableau VIII : Les marques des différents appareils utilisés dans notre étude.

Appareils	Marques
pH mètre	InoLab
Spectrophotomètre	UV-9200
Centrifugeuse	SIGMA 2-16 P
Balance analytique	Sartorius PT 610
Agitateur magnétique avec plaque chauffante	CABINCO (HOTPLATE STIRRER Model L-81)
Étuve	Binder
Autoclave	Webeco
Réfrigérateur	ENIEM
Bec bunsen	/

IV.2.1.2.2. Verrerie

- Pipettes graduées (5 ml, 10 ml)
- Tubes à essais
- Bêchers : 10 ml, 50 ml, 100 ml
- Erlenmeyers de 250 ml et 500 ml
- Ballons de 250 ml
- Flacons de 200 ml
- Éprouvette graduée (250 ml)

IV.2.2. Méthodes

IV.2.2.1. Réactivation de la spiruline

La réactivation (revivification) de la poudre de spiruline est une étape préliminaire qui a pour objectif d'obtenir des filaments monoalgaux utilisés comme inoculum pour la culture ultérieure (Benahmed Djilali, 2012).

La souche a été revivifiée dans l'eau bicarbonatée, les filaments se détachent les uns des autres, les grains de sables et autres débris solides se déposent au fond de la fiole. Le milieu se colore en vert bleu dû au pigment extracellulaire de la spiruline, en particulier la phycocyanine (Benahmed Djilali, 2012).

➤ *Mode opératoire*

On prépare deux solutions de bicarbonate de sodium (4 et 10%), puis on les stérilise.

On place une quantité de la poudre de spiruline (12,2 g) dans un erlenmeyer de 500 ml et on ajoute la solution de bicarbonate à 4% pré-stérilisée, ensuite on mélange jusqu'à l'obtention d'un liquide homogène ;

On incube la culture à 37°C pendant 48 h, après on centrifuge à 4000 tours/min pendant 10 minutes, le surnageant est éliminé, et le culot est récupéré, ensuite est lavé deux fois avec l'eau physiologique stérile ;

Le culot ainsi obtenu est placé dans un erlenmeyer de 250 ml avec la solution de bicarbonate à 10% pré-stérilisée et tout cela devant un bec, puis on incube dans l'étuve à 37°C pendant 72 h.

Après incubation, on centrifuge, et on récupère le culot qui va subir un lavage avec l'eau physiologique deux fois.

À la fin, le culot est introduit dans 100 ml d'eau physiologique (inoculum) (Figure 10), et conservé à 37°C juste avant l'inoculation.



Figure 10 : Aspect de l'inoculum de spiruline.

IV.2.2.2. Essais de culture de *Spirulina platensis*

La culture de spiruline a été réalisée en mode Batch (fermentation discontinue) dans des ballons et erlenmeyers de 250 ml et 500 ml.

Pour chaque culture, on a réalisé trois essais. Ces derniers ont été effectués dans des conditions de stérilité absolue.

IV.2.2.2.1. 1^{ère} expérience : Essai de culture de la spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM (M_0)

La culture de spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM a été réalisée dans des ballons de capacité 250 ml.

Le volume inoculum / volume de milieu de culture M_0 respecté est de 10 : 100 (v/v)%. La densité initiale d'inoculum est de 0,821.

Les conditions opératoires de cette culture sont présentées dans le tableau IX.

Tableau IX : Conditions opératoires de la culture de spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM (M_0).

Volume de l'inoculum	Volume de milieu de culture	Agitation	Aération	Luminosité	Température
10 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Absence	37°C

IV.2.2.2.2. Optimisation de la culture

L'objectif principal de l'optimisation est d'augmenter le rendement en biomasse toute en optimisant la composition des nutriments nécessaires à la croissance de cette micro-algue (Benahmed Djilali, 2012).

➤ *2^{ème} expérience : Optimisation de la composition du milieu de culture M₀*

En se basant sur les résultats de la première expérience, une inhibition de la culture a été constatée sous l'effet de l'abaissement du pH. Pour contrer cet effet, un enrichissement de la culture par la lessive de cendres de bois de figuier a été réalisé tel préconisé par Benahmed Djilali (2012).

Les cendres de bois utilisées doivent être stériles et riches en sels solubles (les branches sont plus riches que les troncs) (Jourdan, 2006).

La lessive de cendres de bois de figuier a été préparée comme suit :

- On pèse 10 grammes de cendres de bois de figuier ;
- L'échantillon est placé dans un erlenmeyer avec 100 ml d'eau distillée, puis on mélange à l'aide d'un agitateur magnétique au moyen d'une plaque chauffante (la chaleur permet une meilleure diffusion de minéraux) jusqu'à l'obtention d'un liquide homogène ;
- On centrifuge le mélange, le surnageant est stérilisé dans l'autoclave, et par la suite récupéré dans un erlenmeyer de 500 ml (lessive de cendres de bois de figuier).

L'optimisation de la composition du milieu de culture de spiruline, nous a permis de préparer trois mélanges :

M₁ : 50 ml d'eau résiduaire M₀ + 50 ml de la lessive de cendres pré-élaborée.

M₂ : 75 ml d'eau résiduaire M₀ + 25 ml de la lessive de cendres pré-élaborée.

M₃ : 25 ml d'eau résiduaire M₀ + 75 ml de la lessive de cendres pré-élaborée.

La culture de la spiruline dans les trois milieux M₁, M₂ et M₃ a été réalisée dans les mêmes conditions opératoires prédéfinies lors de la première expérience (Tableau IX).

Remarque

On a refait la culture de la spiruline dans le milieu M₂ afin de confirmer le résultat obtenu dans ce milieu lors de premier essai.

➤ *3^{ème} expérience : Optimisation de la quantité d'inoculum dans le milieu pré-optimisé M₂*

La quantité d'inoculum joue un rôle important dans le développement de la spiruline. Cette quantité peut avoir un effet bénéfique sur la culture de la spiruline, comme elle peut être un facteur limitant de la croissance de ce microorganisme (Jourdan, 2006).

Afin de choisir la quantité d'inoculum adéquate, trois cultures ont été réalisées dans le milieu pré-optimisé M₂ avec des concentrations en inoculum différentes :

C₁ : 100 ml du milieu optimisé M₂ensemencé avec 10 ml d'inoculum.

C₂ : 100 ml du milieu optimisé M₂ensemencé avec 20 ml d'inoculum.

C₃ : 100 ml du milieu optimisé M₂ensemencé avec 30 ml d'inoculum.

Le tableau X donne les conditions opératoires de cette expérience.

Tableau X : Conditions opératoires de la 3^{ème} expérience.

Cultures	Volume en Inoculum	Volume de milieu pré-optimisé M ₂	Agitation	Aération	Luminosité	Température
C ₁	10 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Absence	37°C
C ₂	20 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Absence	37°C
C ₃	30 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Absence	37°C

➤ **4^{ème} expérience** : Optimisation de l'aération et de l'agitation

L'aération plus l'agitation ont été assurées par une pompe a aquarium immergée (aquarium de type Boyu) (Figure 11) avec un débit d'air de 2 L/mn pour une périodicité de 6 heures par jour.

Remarque : L'aération et l'agitation ont été assurées tous les jours de la semaine sauf les jours du weekend (vendredi et samedi).



Figure 11 : Montage utilisé pour l'optimisation de l'aération et de l'agitation de la culture de spiruline.

Les conditions opératoires de cette expérience sont présentées dans le tableau XI.

Tableau XI : Conditions opératoires de la 4^{ème} expérience.

Essais	Volume de l'inoculum optimisé	Milieu de culture pré-optimisé M ₂	Agitation	Luminosité	Température
Culture aérée	30 ml	100 ml	Automatique et continue	Absence	Ambiante
Culture non aérée	30 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Ambiante

➤ *5^{ème} expérience : Optimisation de l'éclairage*

L'éclairage fût accompli à l'aide d'une lampe de fréquence de 45 W (correspondent à une intensité de 4000 lux (Becker et Venkataraman, 1984)) (Figure 12), pour une périodicité de 6 heures de lumière et 18 heures d'obscurité.

Remarque : L'éclairage a été assuré tous les jours de la semaine sauf les jours du weekend (vendredi et samedi).



Figure 12 : Montage utilisé pour l'optimisation de la lumière de culture de spiruline.

Le tableau XII présente les conditions opératoires de cette expérience.

Tableau XII : Conditions opératoires de la 5^{ème} expérience.

Essais	Volume de l'inoculum optimisé	Milieu de culture pré-optimisé M ₂	Agitation	Aération	Température
Culture exposée à la lumière	30 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Ambiante
Culture non exposée à la lumière	30 ml	100 ml	Manuelle et périodique	Absence	Ambiante

IV.2.2.3. Paramètres de la culture

IV.2.2.3.1. Suivi de croissance

L'estimation de la croissance de spiruline dans les différents essais de culture a été déterminée tous les deux jours (ou trois jours) en mesurant la densité optique, le pH et la matière fraîche.

➤ *Mesure de la densité optique (DO)*

On prélève à l'aide d'une pipette, 5 ml de chaque culture de spiruline, ensuite on mesure la densité optique à une longueur d'onde de 660 nm en utilisant un spectrophotomètre de type UV-9200 (Figure 13).



Figure 13 : Photo de spectrophotomètre de type UV-9200.

➤ *Mesure du pH*

À partir du même prélèvement réalisé préalablement, on mesure le pH à 22°C en utilisant un pH mètre de type inoLab (Figure 14).



Figure 14 : Photo du pH mètre (inoLab).

➤ *Mesure de la matière fraîche*

La concentration en matière fraîche exprimée en g/l a été déterminée à partir de la droite d'étalonnage $DO = f(C)$ préalablement établie.

Soit :

DO : densité optique mesurée initialement.

C : concentration en matière fraîche (g/l).

➤ *Traçage de la droite d'étalonnage*

- À partir d'une préculture (inoculum), on centrifuge 50 ml.
- On pèse le culot obtenu (6,6 g / 50 ml).
- Remettre le culot en suspension dans 50 ml d'eau physiologique.
- Procédez à la dilution du culot (faire 3 dilutions : 2 ml / 2 ml d'eau physiologique ; 1 ml / 3 ml ; 0,5 ml / 3,5 ml).
- On mesure la DO à 660 nm des différentes dilutions.
- En utilisant la règle de trois, on mesure la matière fraîche dans les différentes dilutions.
- On trace la droite d'étalonnage (Voir annexe 1).

IV.2.2.3.2. Rendement en spiruline

Enfin de culture, la biomasse est séparée du milieu de culture par centrifugation (4000 tours / mn), puis lavée deux fois avec l'eau physiologique stérile afin d'éliminer un grand nombre de bactéries issues de la fermentation tel qu'il est recommandé par Cifferi (1983).

La pâte de spiruline ainsi obtenue est pesée à l'aide d'une balance de type Sartorius PT 610, puis séchée à l'air ambiant, ensuite conservée dans des boîtes de Pétri.

IV.2.2.4. Étude morphologique des poudres de spiruline au Microscope Électronique à Balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil d'analyse ; pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Son grandissement pouvant varier de quelques unités à 50000 ou 100000 (Gammouda, 2010).

Les structures morphologiques des différentes poudres de spiruline obtenues dans le milieu M_0 ainsi que dans le milieu optimisé M_2 à différentes conditions de culture ont été observées sous le microscope électronique à balayage (MEB) de type (XL 20). Cette étude a été réalisée au niveau de laboratoire physico-chimique de l'Université Mouloud Mammeri de Hasnaoua.

IV.2.2.5. Méthodes d'analyse des eaux de l'ENIEM

IV.2.2.5.1. Dosage des métaux lourds par la Spectrométrie à absorption atomique de flamme

La spectrométrie à absorption atomique (AAS) étudie l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental, chaque atome à doser ayant un faisceau d'intensité connue et une longueur d'onde caractéristique. Elle permet de doser une soixantaine d'éléments chimiques (métaux et non-métaux) (Austruy, 2012).

L'absorption atomique de flamme est une méthode qui permet de doser essentiellement les métaux en solution.

Cette technique a été choisie pour le dosage des métaux lourds (Fe, Cr, Cu, Cd, Zn, Mn et Pb) du milieu M_0 ainsi que du milieu optimisé M_2 à différentes conditions de culture avant et après traitement biologique par la spiruline.

IV.2.2.5.2. Mesure de la DCO, DBO₅ et Ph

La détermination de la demande chimique en oxygène (DCO) est effectuée par la méthode de dichromate de potassium. Le principe de cette méthode est basé sur une oxydation des matières réductrices par un excès de dichromate de potassium en milieu acide (H_2SO_4), en présence du sulfate d'argent comme catalyseur, du sulfate de mercure comme complexant de chlorures. La détermination de l'excès de dichromate avec une solution titrée de sulfate de fer et d'ammonium, le calcul de la DCO est déterminé à partir de la quantité de dichromate de potassium réduite (AFNOR, 1988).

La détermination de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) vise à reconstituer en laboratoire les phénomènes de dégradation qui ont lieu dans le milieu naturel. Le principe de cette méthode repose sur la préparation d'une solution obtenue par dilution apportant un ensemencement puis incubation pendant cinq jours à l'obscurité dans une enceinte réglée à $(20^\circ C \pm 1)$, ensuite on procède à la mesure de la quantité d'oxygène consommée (AFNOR, 1975).

La mesure du pH s'effectue directement sur l'eau de l'ENIEM avec un pH mètre modèle (inoLab) en plongeant l'électrode de 6 à 8 cm dans l'eau.

Remarque : On a mesuré la DCO, DBO₅ et pH du milieu M_0 (eau usée de l'ENIEM) avant traitement et de la culture C_3 (milieu M_2 + 30 ml d'inoculum) après traitement par la spiruline.

Chapitre V

Résultats et discussion

V.1. Résultats de la culture de *Sp.platensis*

V.1.1. Résultats de la culture de la spiruline dans le milieu M₀

Les résultats de la culture de la spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM (M₀) sont résumés dans les figures 15 et 16.

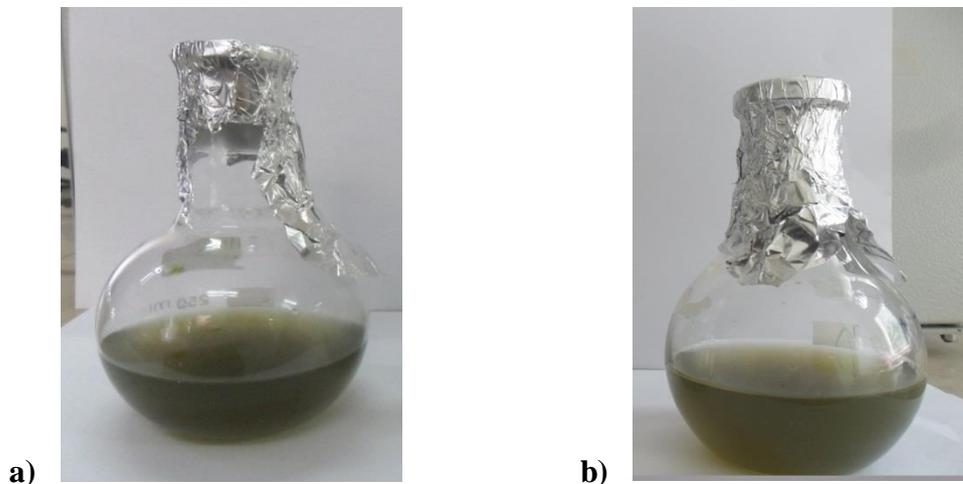


Figure 15 : Aspect du milieu M₀ au début et à la fin de la culture de la spiruline, **a)** : aspect du milieu M₀ au début de la culture ; **b)** : aspect du milieu M₀ à la fin de la culture.

Les résultats de culture de spiruline dans les eaux usées de l'ENIEM (M₀) révèlent une très faible croissance suivie par un jaunissement de la biomasse durant la période de culture. Cette inhibition peut s'expliquer par le fait que, cette eau ne constitue pas un bon substrat pour la croissance de cette micro-algue.

Comme ce milieu ne présente pas une forte charge en matières organiques (DCO = 78,4 mg d'O₂/l). Cela est dû sûrement à une déficience en certains éléments minéraux.

En effet, d'après Ould Bellahcen *et al.* (2013), ces deux paramètres (forte charge en matières organiques et la déficience en éléments minéraux) peuvent gêner et affecter sérieusement la croissance de la spiruline. Ces auteurs ont démontré la faisabilité de la culture de spiruline dans l'eau usée domestique traitée en aérobiose à une DCO de 168,4 mg d'O₂/l et supplémentée en six éléments minéraux (NaHCO₃, K₂HPO₄, NaNO₃, K₂SO₄, NaCl et FeSO₄).

Selon Jourdan (2006), une faible croissance de la spiruline peut être due à une absence ou un manque de phosphate, d'azote ou encore du fer dans le milieu de culture. D'après ce même auteur, les spirulines sous-alimentées en azote ou en fer, ont tendances à précipiter au fond du bassin (milieu de culture) ou encore un manque de potassium provoque des cassures des spirulines en petits fragments.

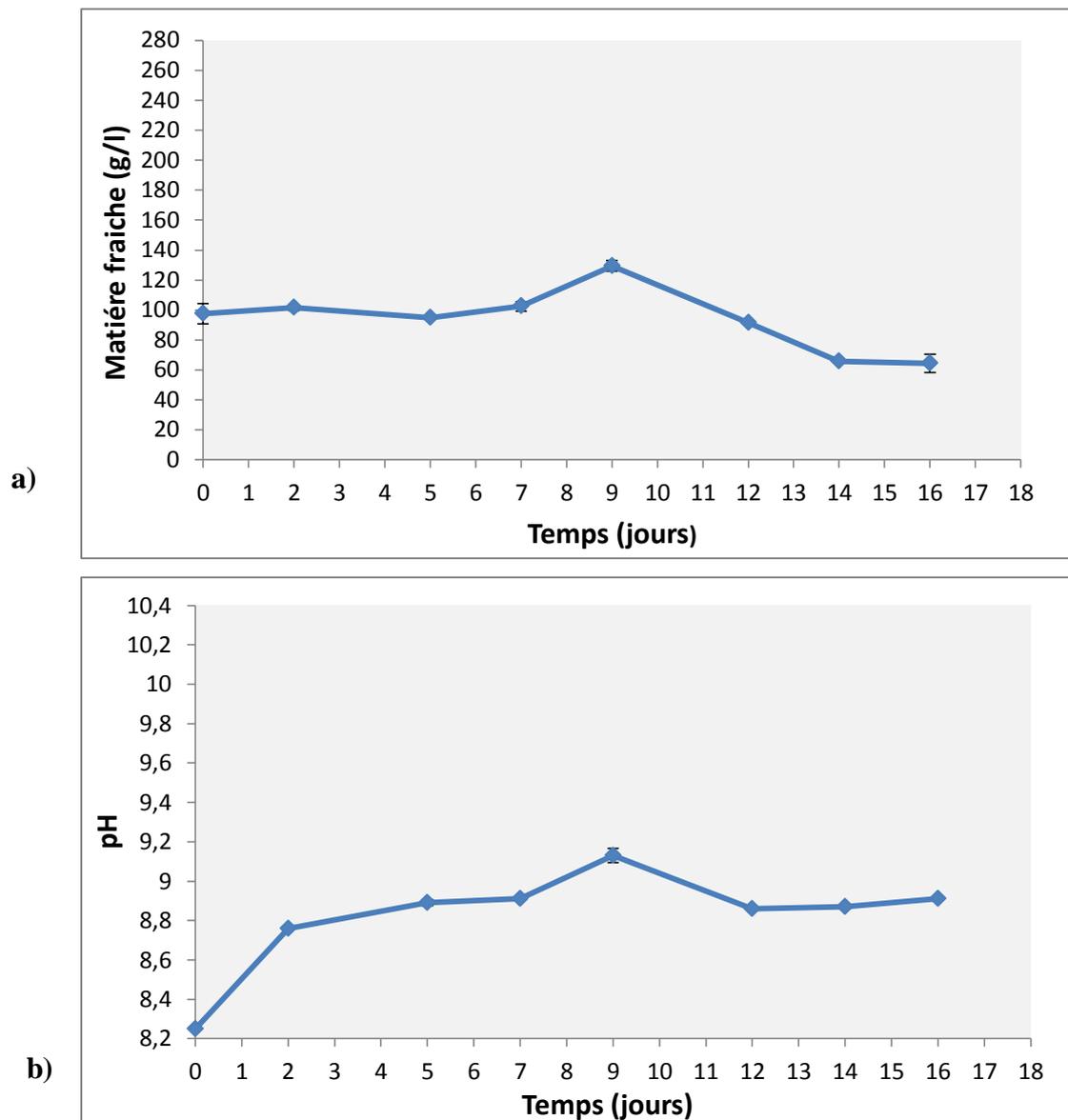


Figure 16 : Évolution des paramètres de la culture de spiruline dans l'eau usée de l'ENIEM (milieu M_0), **a)** : la teneur en matière fraîche (g/l), et **b)** : le pH.

En outre, le pH trouvé au début de la culture ($8,25 \pm 0,0115$) (Figure 16), peut expliquer le mal démarrage de la culture. D'après Jourdan (2006), le pH optimum d'un milieu doit être d'au moins 9, s'il est trop bas, la culture risque de mal démarrer, avec formation de grumeaux ou précipitation de la spiruline au fond du bassin.

V.1.2. Résultats de l'optimisation de la culture

V.1.2.1. 2^{ème} expérience : Résultats d'optimisation de la composition du milieu de culture M_0

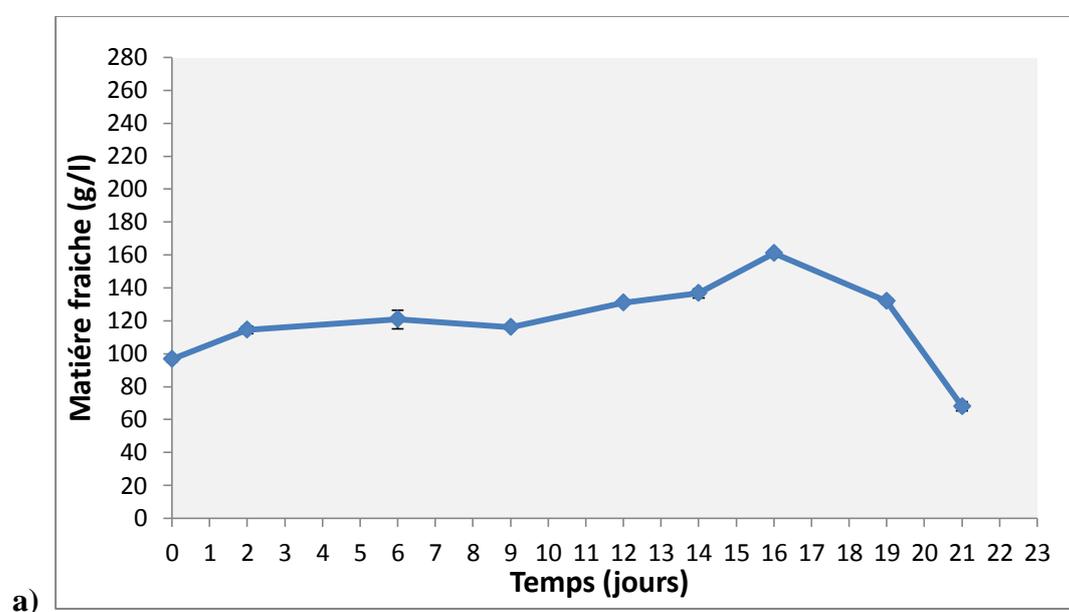
Le tableau XIII donne les paramètres de la culture de spiruline dans l'eau de l'ENIEM enrichie par la lessive de cendres de bois au début et après deux jours de culture.

Tableau XIII : Paramètres de la culture de spiruline au début et après deux jours de culture dans les milieux M₁, M₂ et M₃.

Milieux	Temps de culture	MF (g/l)	pH
M ₁	T ₀	190,53±5,42	10,59±0,0115
	Après 2 jours	100,89±2,21	10,01±0,0723
M ₂	T ₀	104,72±4,91	10±0,0472
	Après 2 jours	134,29±4,42	9,71±0
M ₃	T ₀	187,06±1,89	11±0,036
	Après 2 jours	98,13±2,42	10,64±0,0208

D'après les résultats du tableau XIII, nous remarquons que l'enrichissement de l'eau de l'ENIEM par la lessive de cendres de bois a un impact sur l'alcalinité, les trois milieux étudiés possèdent un pH alcalin. La spiruline a bien démarré initialement dans les trois milieux testés, mais après deux jours de culture, une dépigmentation (jaunissement) de la biomasse a été constatée dans les milieux M₁ et M₃ induisant l'arrêt de croissance de spiruline. Les deux milieux ont une alcalinité très élevée (pH de 10,59 pour le milieu M₁ et 11 pour le milieu M₃). C'est pour cela que, le milieu M₂ a été choisi comme meilleur milieu de croissance.

Les résultats de la culture de spiruline dans le milieu M₂ sont représentés dans la figure 17.



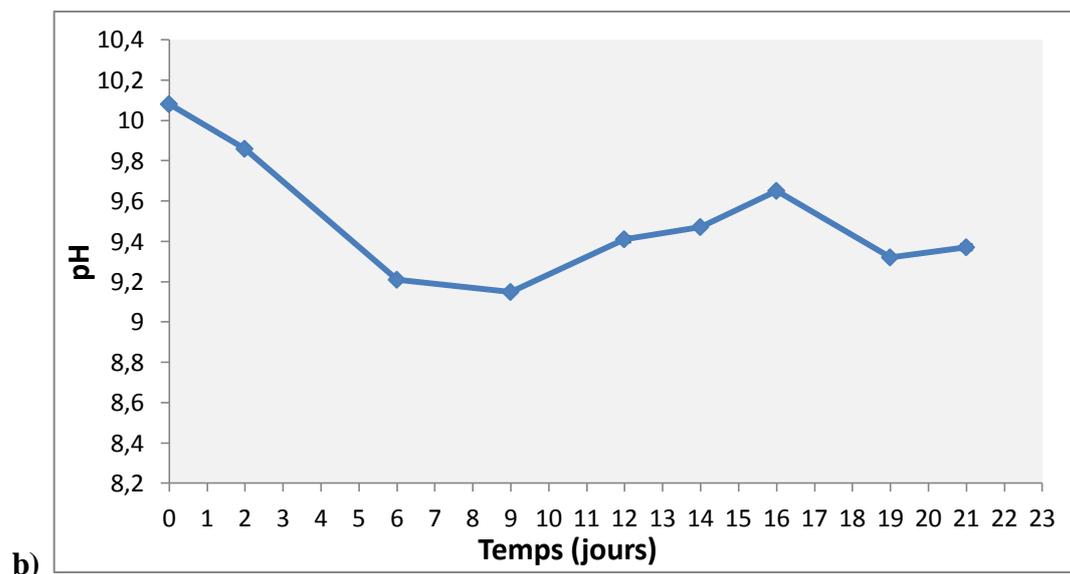


Figure 17 : Évolution des paramètres de la culture de spiruline dans le milieu optimisé M_2 , **a**) : la teneur en matière fraîche (g/l), et **b**) : le pH.

L'analyse de la figure 17 montre une croissance de la spiruline plus importante dans le milieu M_2 par rapport à celle obtenue lors de la première expérience (milieu M_0). Toutefois, cette croissance reste toujours faible ($160,96 \pm 1,35$ g/l de matière fraîche au bout de 16 jours de culture).

Par ailleurs, l'évolution du pH montre une diminution rapide lors de la phase de latence (qui dure 9 jours), puis une augmentation progressive au cours de la période de croissance (s'étalant de 9^{ème} au 16^{ème} jours).

Nos résultats sont comparables à d'autres études qui ont été effectuées par : Vonshak *et al.* (1982) ; Fox (1999) ; Carvalho *et al.* (2002) et Jourdan (2006). Ces études ont permis de montrer que la croissance optimale de la spiruline est obtenue à un pH proche de 9,5.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que, l'alcalinité est un facteur limitant de la croissance de spiruline.

V.1.2.2. 3^{ème} expérience : Résultats d'optimisation de la quantité d'inoculum dans le milieu pré-optimisé M_2

La figure 18 présente l'évolution de la teneur en matière fraîche (g/l) et du pH au cours du temps dans les cultures C_1 , C_2 et C_3 .

Les résultats de cette figure indiquent que, la croissance de la spiruline est sans doute fonction de la concentration en inoculum. Ainsi, la comparaison des courbes de croissance de l'algue *Spirulina platensis* cultivée dans le milieu M_2 et ayant différentes concentrations en inoculum (10 ml, 20 ml et 30 ml), montre clairement que l'augmentation de la quantité en inoculum favorise la croissance de cette micro-algue. Une forte biomasse est issue de la culture C_3 ($242,52 \pm 6,59$ g/l) et ce au bout de 16 jours de culture.

À la fin de la culture, la dépigmentation totale (jaunissement de la biomasse) a été constatée dans la culture C₁ et un début de jaunissement dans la culture C₂. Tandis que, pour la culture C₃ la dépigmentation n'a pas été observée (Figure 19).

En outre, les variations du pH au cours du temps dans les différentes cultures sont similaires. On constate une diminution rapide du pH lors de la phase de latence (qui dure 9 jours), puis une augmentation progressive au cours de la période de croissance qui débute du 9^{ème} aux 16^{ème} jours.

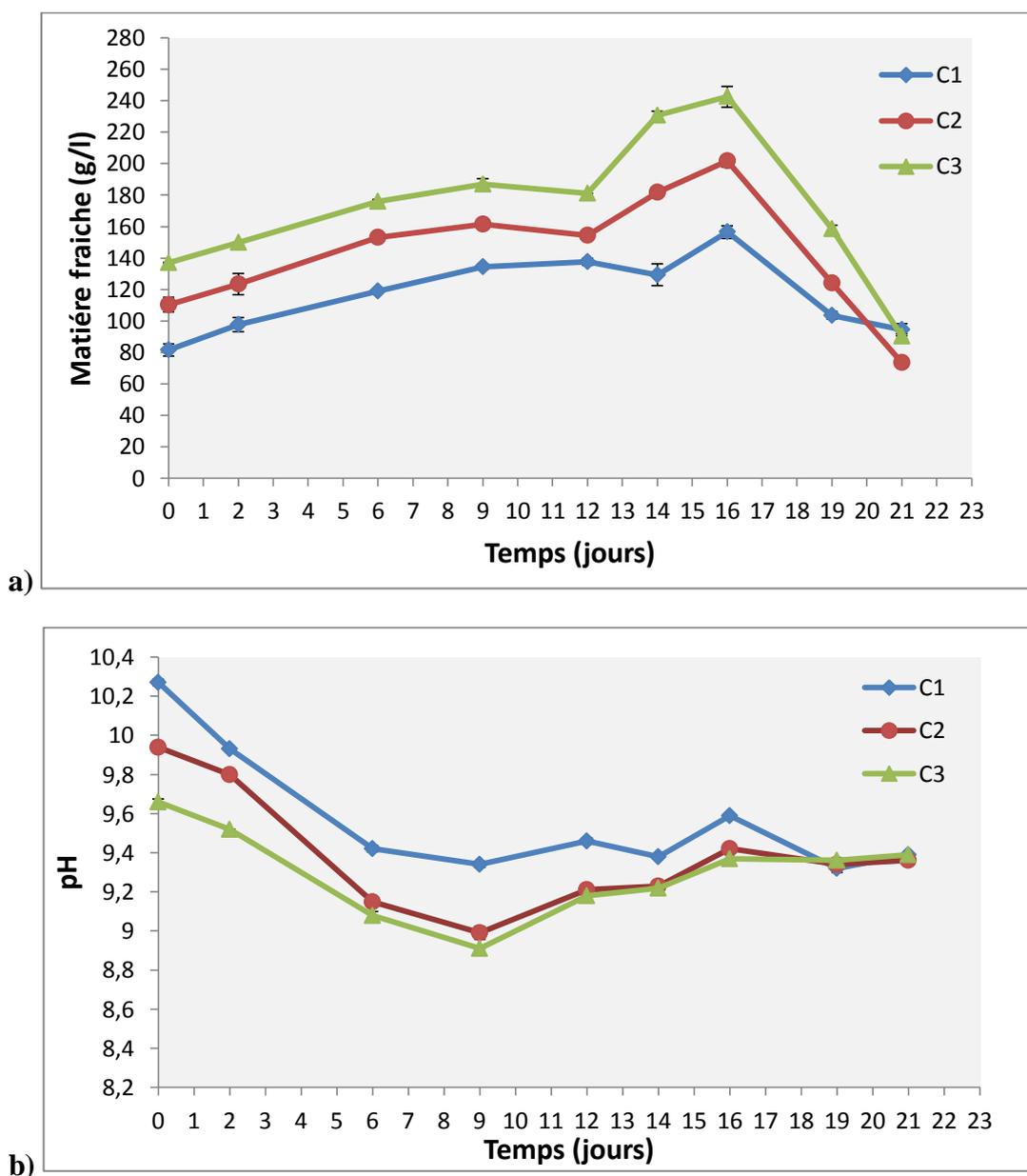


Figure 18 : Évolution des paramètres de la croissance de spiruline dans les cultures C₁, C₂ et C₃, **a)** : la teneur en matière fraîche (g/l), et **b)** : le pH.

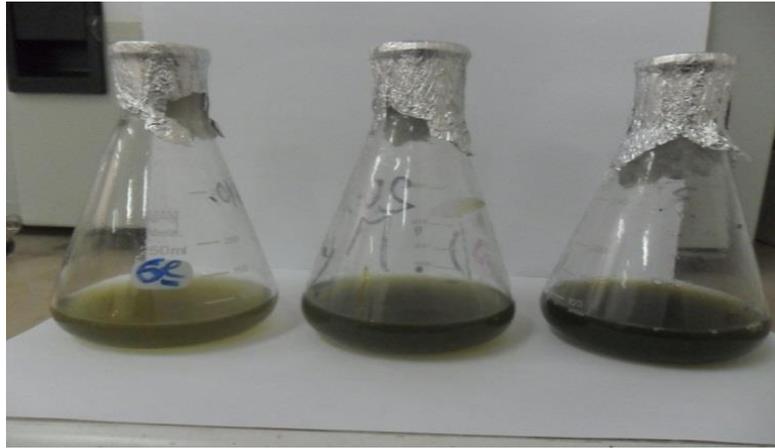


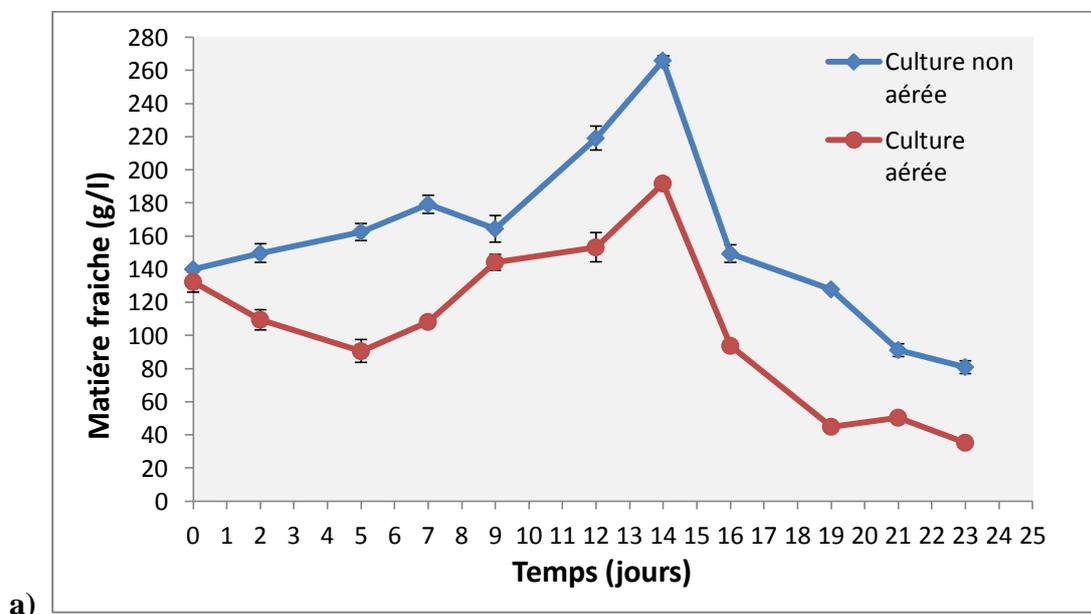
Figure 19 : Aspect des cultures C₁, C₂ et C₃ (de gauche à droite) à la fin de la culture.

Les résultats obtenus dans cette expérience sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature. D'après Cifferi (1983), la taille de l'inoculum joue un rôle important dans la réussite de la croissance de spiruline. Cet auteur a montré qu'une lyse cellulaire complète a été constatée durant une courte période de culture quand la taille de l'inoculum était petite. Par contre, la survie cellulaire était observée quand il a utilisé une pré-culture de taille plus importante.

Ces résultats ont été confirmés par Jourdan (2006). D'après lui, l'utilisation d'une culture assez dense dès le début, évite le développement des chlorelles, diatomées et autres variétés d'algues, évite la photolyse de la spiruline et permet un meilleur démarrage de la culture.

V.1.2.3. 4^{ème} expérience : Résultats de l'optimisation de l'aération et de l'agitation

Les résultats de l'effet de l'aération et de l'agitation sur la matière fraîche et le pH sont présentés dans la figure 20.



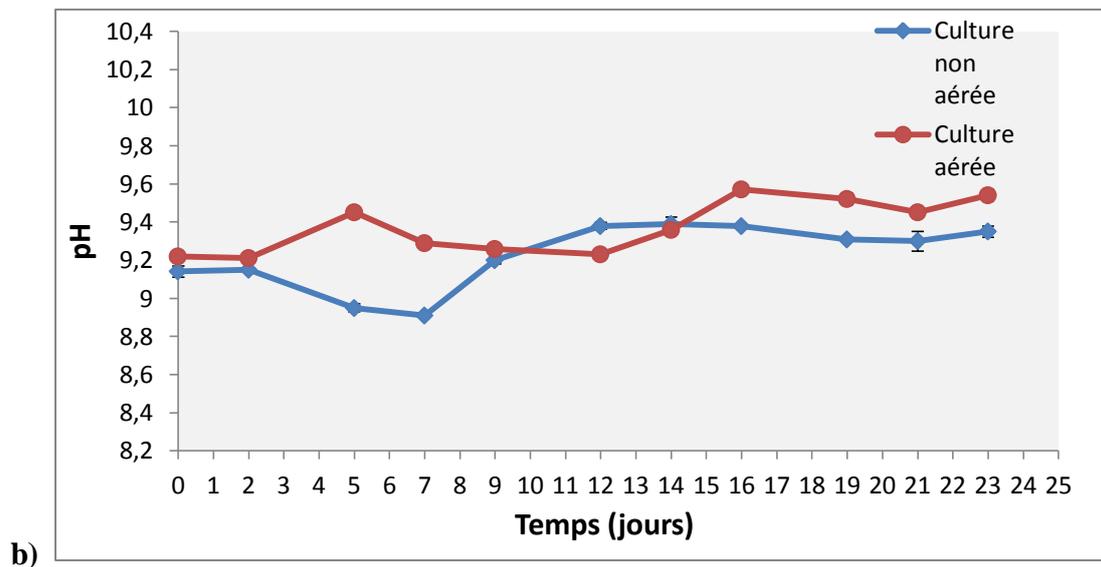


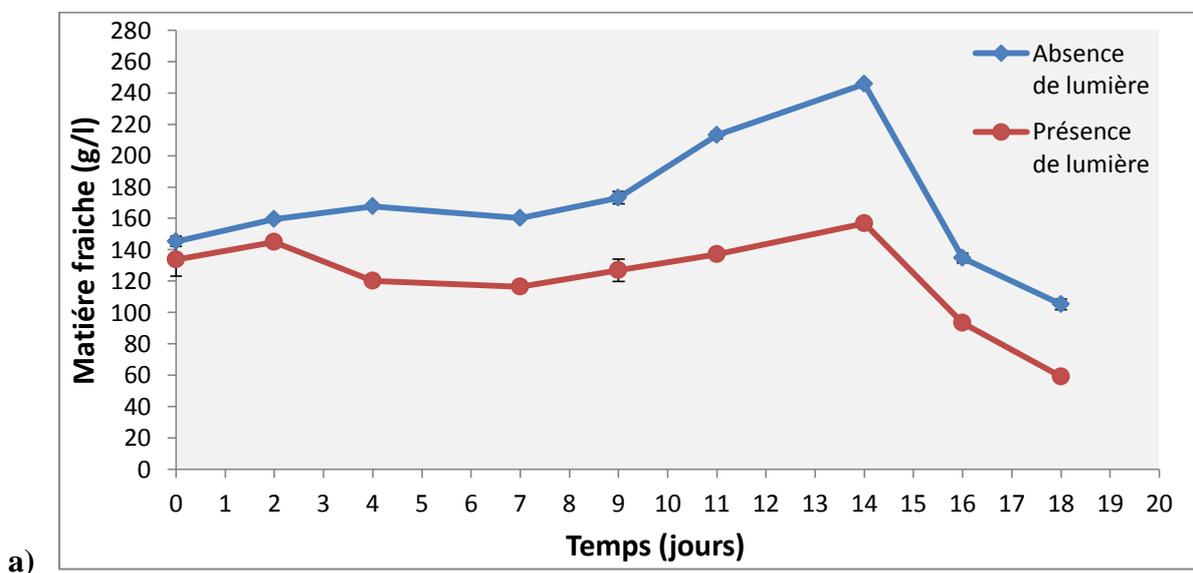
Figure 20 : Évolution des paramètres de la croissance de spiruline dans le milieu M_2 avec et sans aération, **a)** : teneur en matière fraîche (g/l), et **b)** : pH.

L'analyse de la figure 20 montre clairement une croissance de spiruline beaucoup plus importante dans la culture non aérée par rapport à la culture aérée. En outre, de faibles variations du pH ont été observées pour les deux cas de culture réalisées.

L'aération a un effet négatif sur la croissance de spiruline. En effet, l'inhibition de la culture dans le milieu M_2 aéré peut s'expliquer soit par, l'effet de l'agitation brutale, qui peut engendrer la destruction et la mort des spirulines (Cruchot, 2008), ou l'effet de sursaturation en oxygène. Selon Zarouk (1966), un débit de barbotage en air trop élevé (190 l/h.l^{-1}) casse la spiruline et la culture était inhibée au bout de 2 ou 3 jours.

V.1.2.4. 5^{ème} expérience : Résultats de l'optimisation de l'éclairage

Les résultats de l'effet de la lumière sur les paramètres de la culture de spiruline dans le milieu M_2 sont présentés dans la figure 21.



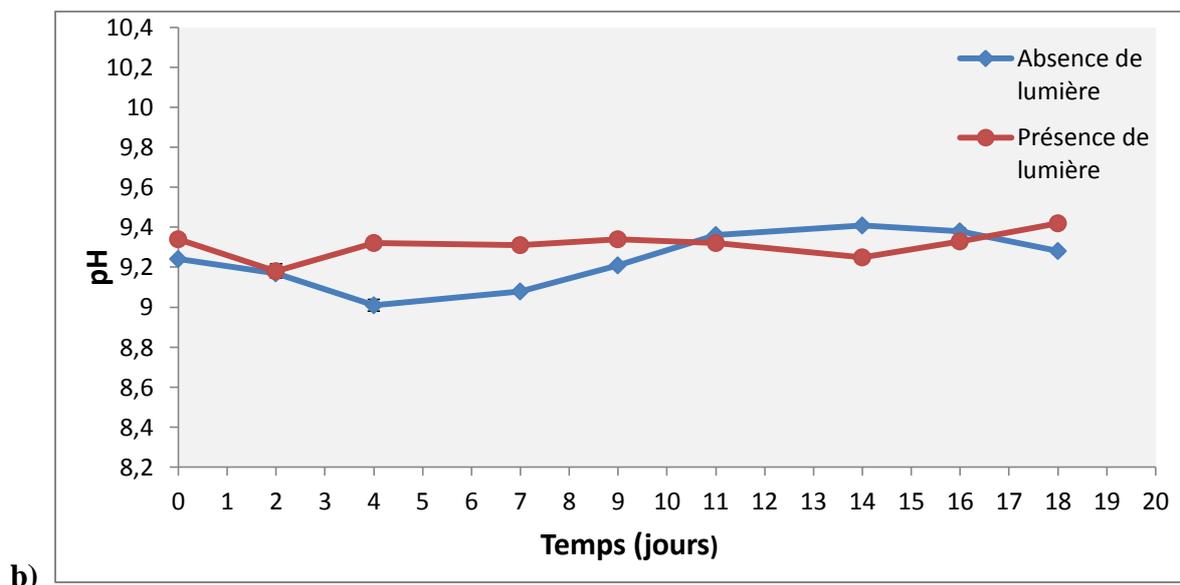


Figure 21 : Évolution des paramètres de la croissance de spiruline dans le milieu M₂ avec et sans lumière, **a**) : teneur en matière fraîche (g/l), et **b**) : pH.

L'éclairage a aussi un effet négatif sur la croissance de spiruline, la teneur en matière fraîche obtenue est presque similaire à celle issue de la culture dans le même milieu M₂ mais en présence de l'aération.

Les résultats obtenus dans le milieu M₂ exposé à la lumière sont prévisibles. Généralement, l'absence d'agitation en plein éclairage (lumière), provoque une décoloration, puis la destruction progressive de la spiruline.

En effet, une exposition directe à un fort éclairage provoque la photolyse des filaments de spiruline, c'est pour cela, qu'il faut agiter suffisamment pour que ces filaments ne restent pas plus d'une demi-minute à la surface en contact avec la lumière, mais plongent et remontent fréquemment (Jourdan, 2006).

En ce qui concerne le pH, on observe de très faibles variations dans les deux cultures au cours du temps.

V.2. Rendement en biomasse

Les rendements en spiruline obtenus dans les différentes cultures sont représentés dans le tableau XIV.

Tableau XIV : Rendement en spiruline cultivée dans le milieu M_0 et le milieu optimisé M_2 à différentes conditions de culture.

Essais de culture	Durée totale de la culture (jours)	Masse fraîche (g/100 ml)
M_0	16	1,75±0,21
M_2	21	2,2±0,56
C_1	21	2,2±0,14
C_2	21	2,85±0,07
C_3	21	4,3±0,56
M_2 non aéré	23	4±0,28
M_2 aéré	23	3,1±0,14
M_2 non exposé à la lumière	18	4,05±0,21
M_2 exposé à la lumière	18	2,95±0,21

M_0 : eau résiduaire de l'ENIEM, M_2 : (75 ml de M_0 + 25 ml de la lessive de cendres), C_1 = M_2 + 10ml d'inoculum ; C_2 = M_2 + 20ml d'inoculum et C_3 = M_2 + 30ml d'inoculum.

Il ressort du tableau ci-dessus que, l'optimisation de la quantité d'inoculum permet d'améliorer considérablement le rendement en biomasse.

En effet, le rendement obtenu pour le cas de la culture C_3 (4,3±0,56 g MF/100 ml) est presque trois fois plus important à celui trouvé pour la culture de spiruline dans l'eau de cette entreprise (milieu M_0 avec 1,75±0,21 g MF/100 ml).

Le milieu optimisé pour la culture C_3 présente un taux légèrement supérieur à celui déclaré par Benahmed Djilali (2012) qui a obtenu un rendement de l'ordre de 3,390±0,0051 g MF/100 ml dans un milieu naturel composé de l'eau de mer et les cendres de bois de figuier et d'olivier.

Toutefois, le milieu M_0 donne un taux nettement supérieur à celui rapporté par Markou *et al.* (2012), qui ont obtenu un rendement de 0,166±0,0024 g MF/100 ml dans un milieu conçu des eaux usées récupérées des moulins d'huile d'olives.

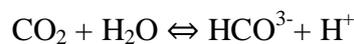
Les rendements issus du milieu M_2 en présence de l'aération ou de la lumière paraissent faibles de l'ordre (3,1±0,14 g MF/100ml ; 2,95±0,21 g MF/100 ml) respectivement. Il serait intéressant d'utiliser un système d'agitation performant ainsi que d'optimiser l'intensité de lumière adéquate (photobioréacteur) afin d'améliorer la biomasse en spiruline.

D'après les résultats de l'étude de la croissance de la souche *Spirulina platensis* dans le milieu M_0 ainsi que dans le milieu optimisé M_2 à différentes conditions de culture nous pouvons conclure les constatations suivantes :

L'augmentation de la quantité d'inoculum et d'alcalinité de l'eau de l'ENIEM (milieu M₀), améliorent et influencent la croissance de spiruline. Par contre, les paramètres d'agitation, d'aération et d'éclairage choisis dans notre étude ont conduit à une destruction et la mort de spiruline. Ces paramètres peuvent devenir des facteurs limitant s'ils ne sont pas bien maîtrisés et suivis au cours de la culture.

L'espèce de spiruline étudiée se caractérise par une durée de la phase de latence de 09 jours spécifique pour toutes les cultures réalisées dans le milieu M₂. La durée de cette phase dépend de l'âge de l'inoculum et son adéquation enzymatique aux constituants de l'eau de l'industrie en question (Doumandji, 2011).

La diminution du pH au cours de la phase de latence dans les différents essais de cultures réalisées est due probablement au dégagement du CO₂ par la spiruline (Jourdan, 2006). En effet, le métabolisme cellulaire (respiration) entraîne une acidification du milieu selon cette équation :



Par contre, l'augmentation du pH constatée pendant la période de croissance peut s'expliquer par la production et libération de substances hautement alcalines par la spiruline, telles que, la chlorophylle et surtout la phycocyanine (Benahmed Djilali, 2012).

En outre, les valeurs du pH des cultures réalisées varient de 8,25 à 11. Ces valeurs sont préconisées pour la culture de la spiruline.

V.3. Résultats de l'étude morphologique des poudres de spiruline

Afin de montrer l'effet de la composition du milieu sur la structure de spiruline obtenue, les photos des structures de poudres de spirulines issues des différentes cultures réalisées ont été prises grâce au microscope électronique à balayage (MEB) (Figure 22).

Les résultats obtenus montrent que, les spirulines issues de l'eau de l'ENIEM ou de la même eau enrichie en cendres de bois de figuier dans différentes conditions de culture présentent des particules de formes relativement irrégulières rugueuses non poreuses formant des agglomérats de différentes tailles ressemblent à la structure des particules de polymères (hélicoïdale). En fait, les diverses dimensions particulières et les distributions granulaires peuvent-être influencées par la composition des poudres (Xinde *et al.*, 2007).

Les poudres étudiées sont constituées de diverses substances hydrophiles: protéines, pigments, ce qui explique leur structure complexe (Benahmed Djilali, 2012).

Ces poudres présentent la même structure que celle de référence d'origine de Burkina-Faso.

Généralement, la spiruline change sa structure selon la composition du milieu de culture utilisé (Benahmed Djilali, 2012), nous pouvons conclure que l'eau de l'ENIEM a la même composition que l'eau initiale utilisée pour sa culture dans son pays d'origine Burkina-Faso.

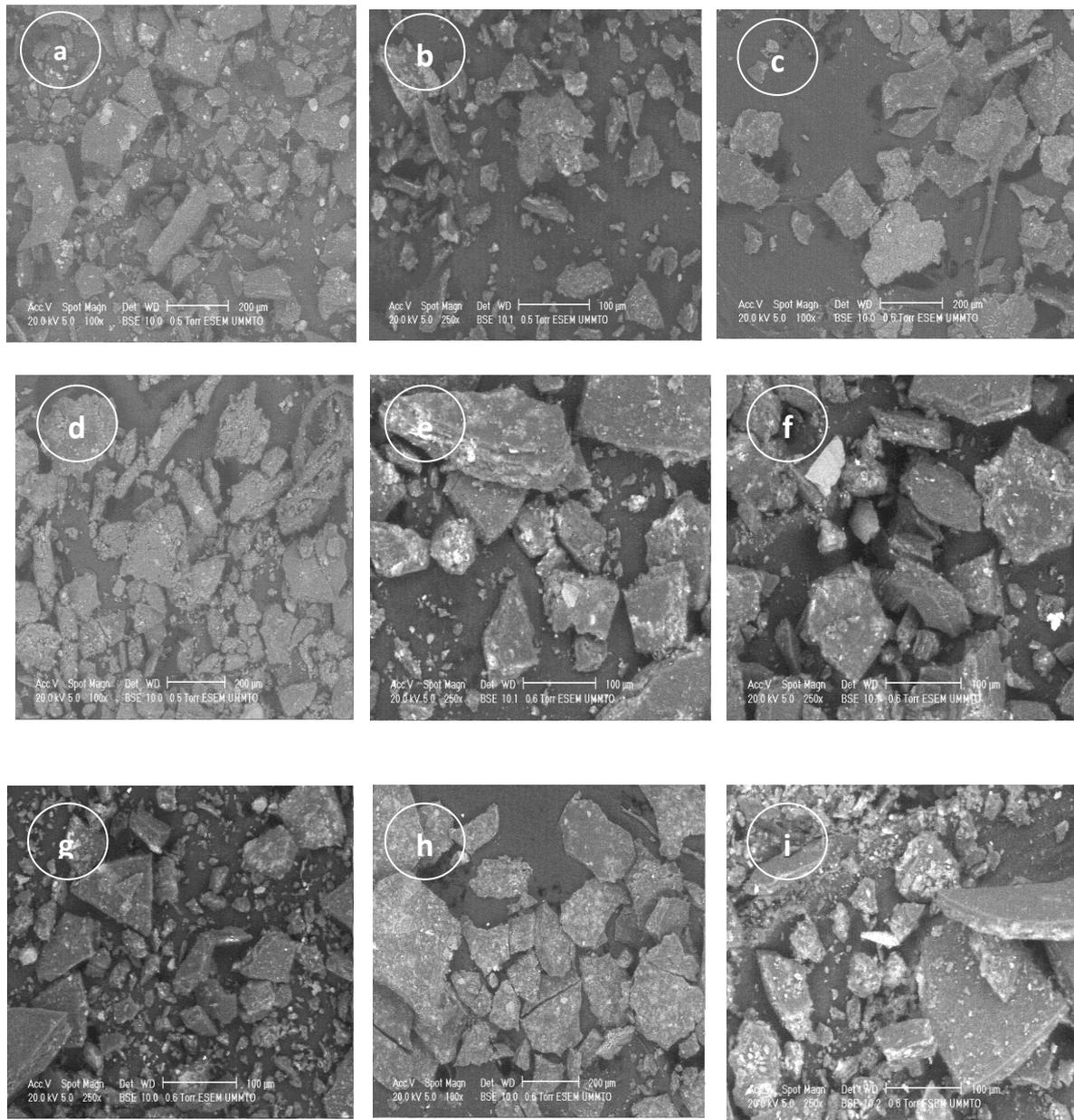


Figure 22 : Structure des différentes poudres de spiruline obtenues observées sous le microscope électronique à balayage.

a) : poudre issue du milieu M_0 , **b)** : poudre issue du milieu optimisé M_2 , **c)** : poudre issue de la culture C_1 , **d)** : poudre issue de la culture C_2 , **e)** : poudre issue de la culture C_3 , **f)** : poudre issue du milieu M_2 non aéré, **g)** : poudre issue du milieu M_2 aéré, **h)** : poudre issue du milieu M_2 non exposé à la lumière et **i)** : poudre issue du milieu M_2 exposé à la lumière.

V.4. Résultats d'analyse des eaux de l'ENIEM

V.4.1. Résultats d'analyse de la composition chimique

Les résultats d'analyse de la composition chimique (métaux lourds) du milieu M₀ ainsi que du milieu M₂ à différentes conditions de culture avant et après traitements biologique par la spiruline sont présentés dans le tableau XV au même temps que les normes Algérienne.

Tableau XV : Composition chimique (mg/l) de l'eau de l'ENIEM non traitée et traitée par la spiruline.

		Fer	Chrome	Manganèse	Plomb	Zinc	Cadmium	Cuivre
Avant traitement biologique par la spiruline	Lessive de cendres de figuier	0,408	< 0,006	0,005	< 0,05	0,0759	< 0,001	0,001
	Eau usée de l'ENIEM	0,311	0,06	0,032	0,078	0,3230	0,007	0,076
	Eau usée de l'ENIEM optimisée (M₂)	0,391	0,052	0,018	0,069	0,2741	0,002	0,042
Après traitement biologique par la spiruline	Milieu M₀	0,202	0,041	0,027	0,071	0,3571	0,006	0,069
	Milieu optimisé M₂	0,145	0,049	0,011	0,056	0,1751	< 0,002	0,052
	Milieu M₂ + 30 ml d'inoculum (C₃)	0,185	0,017	0,016	0,051	0,1481	< 0,003	0,010
	Milieu M₂ aéré	0,264	0,047	0,026	0,073	0,2668	< 0,001	0,053
	Milieu M₂ exposé à la lumière	0,287	0,042	0,022	0,064	0,1981	< 0,001	0,021
	Normes algériennes (JORAD, 2006)	03	0,5	01	0,5	03	0,2	0,5

Il ressort du tableau ci-dessus que, les teneurs en métaux lourds déterminées dans les rejets liquides industriels de l'ENIEM, sont inférieures aux normes adoptées par la réglementation Algérienne (JORAD, 2006). Cela peut s'expliquer par l'efficacité du traitement physico-chimique subit sur ces effluents avant d'être rejetés dans le milieu naturel.

Nous constatons que, la spiruline a dépollué l'eau de l'ENIEM et le pouvoir épuratoire est plus important dans la culture C₃ (M₂ + 30 ml d'inoculum), qui se traduit par une masse optimale en spiruline (4,3±0,56 g Masse Fraîche /100 ml).

Globalement, nous remarquons une diminution de la totalité des métaux étudiés (Fe, Cr, Mn, Pb, Zn, Cd et Cu) dans le milieu M₂ et ce selon les conditions de culture étudiées (quantité en inoculum, lumière et aération).

Ceci nous a permis de constater que, l'inoculum est un facteur limitant de la croissance de spiruline dans le milieu optimisé M₂ quant à l'aération et l'éclairage ont inhibé la croissance. Il serait intéressant d'utiliser des systèmes d'agitation et d'éclairage performants afin d'augmenter l'efficacité d'épuration (Jourdan, 2006).

Par ailleurs, à partir de ces résultats, nous pouvons déduire que, la spiruline peut absorber les métaux lourds présents dans le milieu de culture.

Plusieurs études ont été effectuées récemment, montrant l'utilisation de la spiruline comme agent bio-adsorbant des métaux (Jagiello *et al.* 2006 ; Solisio *et al.* 2006).

L'augmentation de la concentration de quelques métaux dans les différentes cultures réalisées après traitement par la spiruline, peut être due, à une contamination ou erreur de manipulation.

V.4.2. Résultats de la mesure de la DCO, DBO₅ et Ph

Le tableau XVI donne les valeurs de la DCO, DBO₅ et Ph des rejets de l'ENIEM et de la culture C₃ traitée par la spiruline.

Tableau XVI : Valeurs de la DCO, DBO₅ et pH de l'eau de l'ENIEM avant et après traitement biologique.

	DCO (mg d'O ₂ /l)	DBO ₅ (mg d'O ₂ /l)	pH
Rejets liquides de l'ENIEM avant traitement biologique	78,4	21,9	7,04±0,0079
Milieu M₂ + 30 ml d'inoculum (culture C₃) après traitement biologique	44,1	13	7,52±0,0208

Les analyses effectuées sur les effluents de la station d'épuration de l'ENIEM montrent que, les valeurs de la DCO (78,4 mg/l) et DBO₅ (21,9 mg/l) sont inférieures à celles rapportées par la norme Algérienne qui sont fixées respectivement à 120 mg/l et 35 mg/l. Ces valeurs indiquent que, le traitement physico-chimique effectué sur ces eaux par l'entreprise est très acceptable.

Par ailleurs, nous observons une légère diminution de la DCO et DBO₅ de la culture C₃ (milieu M₂ + 30 ml d'inoculum) après traitement par la spiruline. La concentration de la DCO et la DBO₅ est réduite respectivement de 78,4 mg/l à 44,1 mg/l soit un rendement de 44,11% et de 21,9 mg/l à 13 mg/l soit un rendement de 40,64%.

Le pH des eaux rejetées par la station de l'ENIEM est dans les normes, car selon la réglementation Algérienne ce dernier est fixé entre 6,5-8,5.

Après traitement de ces eaux par la spiruline (Culture C₃), nous remarquons une légère augmentation du pH qui passe de 7,04±0,0079 à 7,52±0,0208, ceci est probablement due à l'enrichissement de cette eau par la lessive de cendres de bois de figuier (Benahmed Djilali, 2012).

D'après ces résultats nous pouvons conclure que, le traitement des rejets de l'ENIEM enrichies par la lessive de cendres de bois de figuier par la spiruline s'avère très intéressante dans la diminution des métaux d'une part et d'autre part, la DCO et la DBO₅.

- La diminution de la DCO et la DBO₅ est respectivement de l'ordre de 44,11% et 40,64%.
- La diminution de l'ensemble des métaux lourds (Fer, Chrome, Manganèse, Plomb, Zinc et Cuivre) est respectivement de 40,61%, 71,66%, 50%, 34,61%, 54,15% et 86,84%.

Il est important de réaliser un contrôle sur les teneurs des métaux lourds de la spiruline obtenue.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail nous tenons à rappeler que, notre étude rentre dans le cadre général de la thématique du développement durable et la protection de l'environnement. Elle a pour objectif principal, l'amélioration de la qualité des eaux usées traitées au niveau de la station d'épuration de l'ENIEM avant de les rejeter dans le milieu naturel.

Le traitement biologique par la spiruline est une technique simple à mettre en œuvre, cette technique est efficace pour la dépollution des eaux industrielles de l'ENIEM et s'avère très encourageante dans l'épuration des eaux urbaines.

En premier lieu, l'adaptation de la spiruline dans les rejets d'eaux usées de l'ENIEM traitées par les méthodes physico-chimiques a été réalisée. Les résultats ont montré que, ces rejets ne constituent pas un bon substrat pour la croissance de cette micro-algue.

Ensuite, la culture a été optimisée, afin d'augmenter le rendement en biomasse.

Les résultats de l'ensemble des essais de culture réalisés sont résumés comme suit :

- L'augmentation de la quantité d'inoculum et d'alcalinité de l'eau de l'ENIEM (M_0) par la lessive de cendres de bois de figuier, améliorent la croissance de spiruline.
- Les paramètres d'agitation, d'aération et d'éclairage choisis dans notre étude ont conduit à une destruction et la mort de spiruline.
- L'essai de culture de la spiruline dans le milieu optimisé M_2 (75 ml du milieu M_0 + 25 ml de la lessive de cendres de figuier) ensemencé avec 30 ml d'inoculum (Culture C_3) a montré un rendement en biomasse de spiruline exceptionnel de $4,3 \pm 0,56$ g MF /100 ml après 21 jours de culture.
- L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) des poudres de spirulines obtenues des différents essais de culture dans l'eau de l'ENIEM présentent la même structure que celle de référence d'origine de Burkina-Faso, constituée de particules de formes relativement irrégulières rugueuses ressemblent à la structure des particules de polymères.

Les résultats d'analyse de la composition chimique ont montré que, les concentrations en métaux lourds sont inférieures aux normes requises.

Le pH des eaux rejetées par la station de l'ENIEM répond à la norme. Ce premier est fixé entre 6,5-8,5, les valeurs de la DCO et DBO_5 sont inférieures par rapport à la norme qui est fixée respectivement à 120 mg/l et 35 mg/l. À travers ces résultats, il est clair que l'ENIEM a fait effort dans sa démarche pour la protection de l'environnement.

Par ailleurs, le traitement biologique de ces rejets par la spiruline, a permis de réduire la concentration de la DCO et DBO_5 respectivement de 78,4 mg/l à 44,1 mg/l soit un rendement de 44,11% et de 21,9 mg/l à 13 mg/l soit un rendement de 40,64%.

Conclusion générale

Pour les métaux lourds, les résultats d'analyse ont montré une diminution de la quasi-totalité des métaux étudiés (Fe, Cr, Mn, Pb, Zn, Cd et Cu).

Enfin de cette étude nous pouvons dire que, le traitement biologique par la spiruline est un traitement qui peut être utilisé par l'ENIEM comme traitement secondaire complémentaire du traitement primaire (traitement physico-chimique).

Ce traitement est recommandé, dans certaines situations et lorsque ces rejets sont trop chargés en polluants, un traitement primaire seul ne suffit pas à dépolluer cette eau. Les normes de rejets ne sont donc pas toujours respectées.

Compte tenu des résultats intéressants obtenus, il paraît d'une grande utilité de poursuivre la présente étude. Alors, nous envisageons d'entreprendre les différentes activités de recherche suivantes :

- Amélioration des conditions de culture de la spiruline dans ces rejets en utilisant un système d'agitation performant et en optimisant l'aération et l'intensité de lumière adéquate (photobioréacteur) afin d'améliorer la croissance de spiruline.
- Caractérisation physico-chimique de la poudre de spiruline (pH, détermination de la teneur en protéines, détermination de la composition chimique en acides gras, quantification de la chlorophylle, dosage colorimétrique de la phycocyanine et des caroténoïdes...).
- Étude de d'autres paramètres de pollution : Matières en suspensions (MES), Température, d'autres métaux lourds, Hydrocarbures totaux, huiles et graisses... .
- Traitement et valorisation d'autres rejets d'eaux usées industriels par la spiruline.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Aba Aaki R., (2012).** Élimination des métaux lourds (Cd, Pb, Cr, Zn et As) des eaux usées industrielles et naturelles par le procédé d'infiltration-percolation. Thèse pour l'obtention de grade de Docteur en Matériaux et Environnement. Université Ibnou Zohr, Agadir, 149 p.
- Abouzlam M., (2006).** Optimisation d'un procédé de traitement des eaux par ozonation catalytique. Thèse de Doctorat. Université de Poitiers, 157 p.
- AFNOR., (1975).** Détermination de la demande biochimique en oxygène (DBO₅). Qualité de l'eau. NF T90-103 Décembre 1975, Paris.
- AFNOR., (1988).** Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO). Qualité de l'eau. NF T90-101 Octobre 1988, Paris.
- Austruy A., (2012).** Aspects physiologiques et biochimiques de la tolérance à l'arsenic chez les plantes supérieures dans un contexte de phytostabilisation d'une friche industrielle. Thèse de Doctorat. Université Blaise Pascal, Auvergne, 300 p.
- Babu M., (1995).** Evaluation of chemoprevention of oral cancer with spirulina. *Nutrition and Cancer*. Vol 24, N° 2, p 197-202.
- Becker E.W. et Venkataraman L.V., (1984).** Production and Utilization of the Blue-green Algae Spirulina in India. *Biomass*. Vol 4, p 105-125.
- Benahmed Djilali A., (2012).** Analyse des aptitudes technologiques de poudres de dattes (phoenix-dactylifera) améliorées par la spiruline. Étude des propriétés rhéologiques, nutritionnelles et antibactériennes. Thèse de Doctorat en Technologie Alimentaire. Université M'hamed Bougara, Boumerdés, 119 p.
- Benahmed Djilali A., Slimani D.J., Bensara A., Nabiev M., Bouksaim M., Benamara S., (2013).** Nouvelle méthode de production de *Spirulina platensis* en utilisant un milieu naturel à base de l'eau de mer, cendres de bois et la saumure de fromage. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 10 p.
- Berguey S., (1994).** Manual of Determinative Bacteriology. Ed Ninth, p 1711-1807.
- Carvalho, J.C.M., Pelizer, L.H. et Sato, S. (2002).** *Spirulina platensis* growth estimation by pH determination at different cultivations conditions. *Journal of Biotechnology*. Vol 5, p 251-256.
- Charpy L., (2002).** Compte rendu du mini colloque sur la production de spiruline artisanale. Colloque. p 1-7.
- Charpy L., Langlade M.J. et Alliod R., (2008).** La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ? Vol 6, N° 17, p 31-41.

Références Bibliographiques

- Ciferri O., (1983).** Spirulina, the edible microorganism. *Microbiological Reviews*. Vol 47, p 551-578.
- Contreras-Martel C., Matamala A., Bruna C., Poo-Caamaño G., Almonacid D., Figueroa M., Oyanedel J.M. et Bunster M., (2007).** The structure at 2 resolution Å of Phycocyanin from *Gracilaria chilensis* and the energy transfer network in a PC-PC complex. *Journal. Biophys. Chem.* Vol 125, p 388-396.
- Cruchot H., (2008).** La spiruline bilan et perspectives. Diplôme d'état de Docteur en Pharmacie. Université de Franche-comté, 323 p.
- Cuvelier C., Dotreppe O. et Istasse L., (2003).** Chimie, source alimentaire et dosage de la vitamine E. *Ann. Méd. Vét.* Vol 147, p 315-324.
- Dahmoune F., (2009).** L'impact de l'ouverture économique et de la concurrence sur l'industrie de l'électroménager en Algérie (Cas de l'ENIEM). Thèse pour l'obtention du diplôme de Magister. Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 157 p.
- Dangeard P.A., (1940).** A blue-green algae food for humans. *Act. Soc. Linn.* Vol 91, p 39-41.
- Doumandji A., Boutekrabt L., Saidi N.A., Doumandji S., Hamerouch D., Haouari S., (2011).** Étude de l'impact de l'incorporation de la spiruline sur les propriétés nutritionnelles, technologiques et organoleptiques du couscous artisanal. *Nature & Technologie*. N° 06, p 40-50.
- El Hachemi O., (2012).** Traitement des eaux usées par lagunage naturel en milieu désertique (Oasis de Figuig) : performances épuratoires et aspect phytoplanctonique. Thèse pour l'obtention de grade de Docteur en Production végétale. Université Mohammed Premier d'Oujda, 122 p.
- Falquet J., (2000).** Spiruline: quelques bases scientifiques... . *Antenna Technologies*.
- Falquet J. et Hurni J.P., (2006).** Spiruline : aspects nutritionnels. *Antenna Technologies*.
- Fox R.D., (1999).** La Spiruline: Technique, Pratique et Promesse. *Edisud*. Aix en Provence, N° 246, p 18-129.
- Gammouda Z., (2010).** Effet de plasmas des ions d'argon (Ar+) sur l'interaction entre des couches minces réfractaires et des substrats en acier. Mémoire de Magister. Université Kasdi Merbah, Ouargla, 158 p.
- Gardner N.L., (1917).** «New Pacific Coast marine algae .I. ». University of California. *Publications in Botany*. Vol 6, N° 14, p 377-416.
- Girardin-Andréani C., (2005).** Spiruline: Système Sanguine, Système Immunitaire et Cancer. *Phytother*. Vol 4, p 158-161.

Références Bibliographiques

- Gneclie Mahi A., (2006).** Utilisation des normes qualités comme outils de pérennisation des fermes de spiruline dans les pays en voie de développement. *Rongead*.
- Hacène H., Brahimi R., Benaïcha S., Ouahrani E.K., Chebhouni N., Siga A., (2001).** Essais de Production de Protéines d'organismes Unicellulaires (P.O.U.) par des Souches de Spirulina. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, p 65-68.
- Harouz L., (2012).** Essai d'analyse de stratégies de redressement d'entreprises en difficulté : Cas de l'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (ENIEM). Thèse du Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 234 p.
- Hayashi T. et Hayashi K., (1996).** Calcium spirulan, an inhibitor of enveloped virus replication, from a blue-green alga Spirulina. *Journal of Natural Products*. Vol 59, N° 1, p 83-87.
- Henrikson R., (1997).** Earth Food Spirulina. 4^{ème} édition, Ronore Entreprise, USA.
- Jagiello M., Minta E., Chojnacka K. et Kafarski P., (2006).** Mode of biosorption of chromium (III) by Spirulina Species cells from aqueous solutions. *Water Environnement Research*. Vol 78, N° 7, p 740-743.
- Jiménez C., Cossio B.R., Labella D. et Niell F.X., (2003).** The feasibility of industrial production of Spirulina in southern Spain. *Aquaculture*. Vol 217, p 179–190.
- JORAD : Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique., (2006).** Les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. Décret exécutif n° 06-141, p 04-09.
- Jourdan J.P., (2006).** Cultivez votre spiruline. Manuel de culture artisanale pour la production de spiruline. *Antenna Technologie*.
- Kabore F., (2001).** Réhabilitation nutritionnelle des enfants malnutris VIH positifs et négatifs par la spiruline et le misola à Ouagadougou. Mémoire de DEA. Université de Ouagadougou, Burkina faso.
- Kozlenko R.D. et Henson R.H., (1996).** Les dernières recherches scientifiques sur la spiruline : Effets sur le virus du SIDA, le cancer et le système immunitaire. *Spirulina Health Library*, 8 p.
- Lembrouk L., (2012).** Impact de la pollution industrielle générée par l'Électro-Industries d'Azazga et l'Entreprise Nationale des Industries Electro-Ménagères d'Oued Aissi sur la faune du sol. Thèse de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 96 p.
- Leonard J. et Compere P., (1967).** Spirulina platensis (Gom.) Geitler, algue bleue de grande valeur alimentaire par sa richesse en proteines. *Bull. jard. Bot. Nat. Belg.* Vol 37, N° 1, 23 p.
- Margain C., (2016).** La petite histoire de la spiruline. *Gourmet Spiruline*.

Références Bibliographiques

- Markou G., Chatzipavlidis I. et Georgakakis D., (2012).** Cultivation of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* in olive-oil mill wastewater treated with sodium hypochlorite. *Bioresource Technology*. Vol 112, p 234–241.
- Mccarty M.F., (2007).** Clinical potential of *Spirulina* as a Source of Phycocyanobilin. *Journal of Medicinal Food*. Vol 10, N° 4, p 566-570.
- Merair N. et Salmi A., (2014).** Étude de la biodégradation des eaux usées dans le réacteur à batch séquentiel et l'impact du solvant furfural dans le traitement biologique. Thèse de master. Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, 53 p.
- Metahri M.S., (2012).** Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville Tizi-Ouzou. Thèse pour l'obtention de grade de Docteur en Génie des procédés. Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 148 p.
- Moulin S., Rozen-rechels D. et Stankovic M., (2013).** Traitement des eaux usées. *Environmental Research and Teaching Institute*.
- Ogbonda K.H., Aminigo R.E. et Abu G.O., (2007).** Influence of temperature and pH on biomasse production and protein biosynthesis and putative *Spirulina* sp. *Bioresource Technology*. Vol 98, p 2207-2211
- Ould Bellahcen T., Bouchabchoub A., Massoui M., El Yachioui M., (2013).** Culture et production de *Spirulina platensis* dans les eaux usées domestiques. *Larhyss Journal*, N°14, p 107-122.
- Paniagua-Michel J., Dujardin E. et Sironval C., (1993).** Le Tecuital, concentré de spirulines source de -protéines comestibles chez les Aztèques. *Cahiers de l'Agriculture*. Vol 2, p 283-287.
- Parikh P., Mani U., Yer U., (2001).** Role of *Spirulina* in the control of Glycemia and lipidemia in type 2 Diabetes Mellitus. *Journal of Medicinal Food*. Vol 4, N° 4, p 193-199.
- Pelmont J., (1995).** Bactéries et environnement, Adaptations physiologiques. Presses universitaires de Grenoble. Vol 2, 897 p.
- Rejsek F., (2002).** Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques. Aquitaine, Bordeaux, France, 358 p.
- Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Champsaur H. et Rodi L., (2005).** L'analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduelles. Eau de mer. 8^{ème} Ed. *Dunod*. Paris, 1383 p.
- Romay C.H., González R., Ledón N., Ramirez D. et Rimbau V., (2003).** C-Phycocyanin: A Biliprotein with Antioxidant, Anti-Inflammatory and Neuroprotective Effects. *Current Protein and Peptide Science*. Vol 4, p 207-216.

Références Bibliographiques

- Sall M.G., Dankoko B., Badiane M., Ehua E. et Kuakuwi N., (1999). La spiruline : une source alimentaire à promouvoir. *Médecine d'Afrique Noire*. Vol 46, N° 3, p 140-141.
- Sguera S., (2008). *Spirulina platensis* et ses constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques. Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie. Université Henri Poincaré, Nancy, 162 p.
- Shimamatsu H., (2004). Mass production of Spirulina, an edible microalga. *Hydrobiologia*. Vol 512, p 39-44.
- Solisio C., Lodi A., Torre P., Converti A., Del Borghi M., (2006). Copper removal by dry and rehydrated biomasse of *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*. Vol 97, N° 14, p 1756-1760.
- Vonshak A., Abeliovich A., Boussiba S., Arad S., Richmond A., (1982). Production of Spirulina biomass: effects of environmental factors and population density. *Biomass*. Vol 2, p 175-185.
- Xinde X., Shanjing Y., Ning H. et Bin S.H., (2007). Measurement and influence factors of the flowability of microcapsules with high content β carotene. *Chin. Journal. Chem. Eng.* Vol 15, N° 4, p 579-585.
- Zarrouk C., (1966). Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler. Thèse Doctorat. Université de Paris.

Sites web

- Compagnie Tourne-Sol., (2016). La spiruline pour un monde sans famine [en ligne]. [Consulté le : 28/03/2016]. Disponible sur : <http://flore99.free.fr/spiru.html>.
- Document Natésis., (2003). Les phytonutriments majeurs de la Spiruline [en ligne]. [Consulté le : 02/04/2016]. Disponible sur : <https://www.natesis.com/spiruline-phytonutriments,fr,8,3.cfm>.
- ENIEM Électroménager., (2013). Présentation générale de l'entreprise [en ligne]. [Consulté le : 28/05/2016]. Disponible sur : <http://www.eniem.com.dz/#accroche>.

Annexes

ANNEXE N° 1

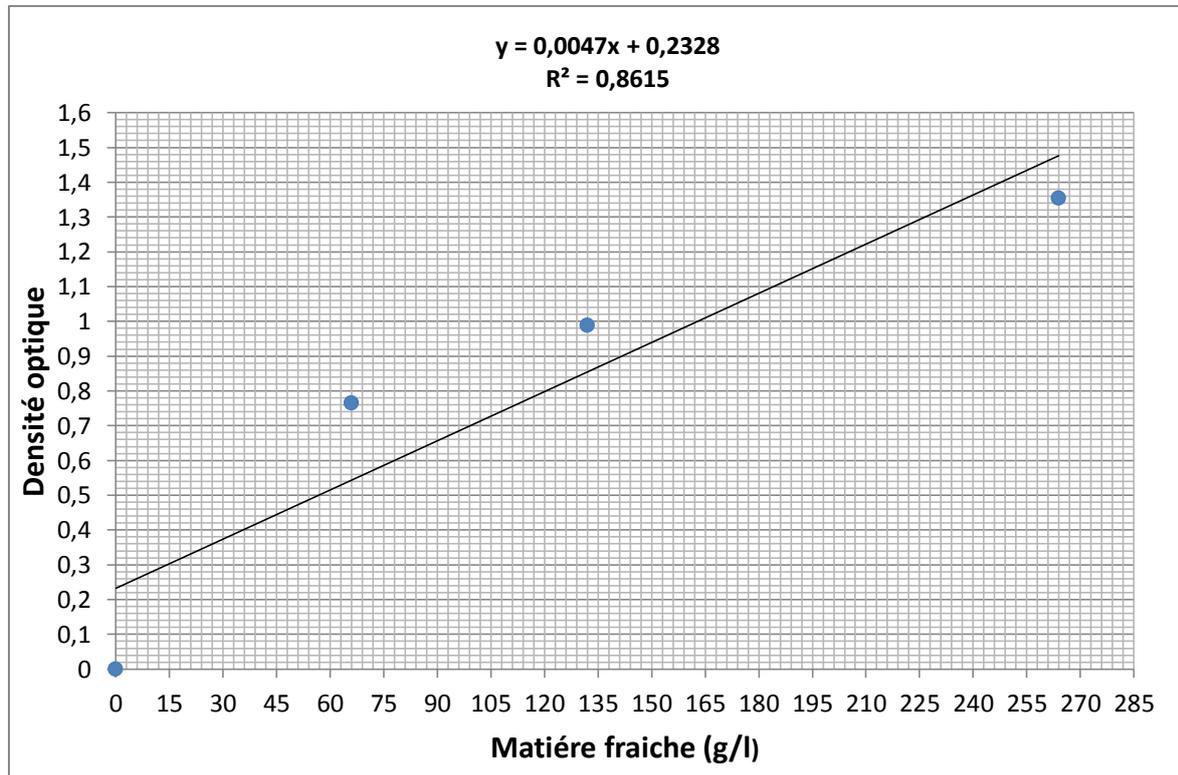


Figure 01 : La droite d'étalonnage $DO = f(C)$.

ANNEXE N° 2

DECRETS

Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

Le Chef du Gouvernement,

Sur le rapport du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-4° et 125 (alinéa 2) ;

Vu la loi n° 90-08 du 7 avril 1990, complétée, relative à la commune ;

Vu la loi n° 90-09 du 7 avril 1990, complétée, relative à la wilaya ;

Vu la loi n° 03-10 du 19 Jomada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;

Vu la loi n° 04-04 du 5 Jomada El Oula 1425 correspondant au 23 juin 2004 relative à la normalisation ;

Vu la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures ;

Vu le décret présidentiel n° 04-136 du 29 Safar 1425 correspondant au 19 avril 2004 portant nomination du Chef du Gouvernement ;

Vu le décret présidentiel n° 05-161 du 22 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 1er mai 2005 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels ;

Décète :

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 10 de la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003, susvisée, le présent décret a pour objet de définir les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

SECTION 1

DES DISPOSITIONS PRELIMINAIRES

Art. 2. — Au sens du présent décret on entend par rejet d'effluents liquides industriels tout déversement, écoulement, jet et dépôt d'un liquide direct ou indirect qui provient d'une activité industrielle.

Art. 3. — Les valeurs limites de rejets d'effluents liquides industriels sont celles fixées en annexe du présent décret.

Toutefois, en attendant la mise à niveau des installations industrielles anciennes dans un délai de cinq (5) ans, les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels prennent en charge l'ancienneté des installations industrielles en déterminant une tolérance pour les rejets d'effluents liquides industriels émanant de ces installations. Ces valeurs sont fixées et annexées au présent décret.

Pour les installations pétrolières, le délai est de sept (7) ans conformément aux dispositions législatives en vigueur, et notamment celles de la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, susvisée,

En outre et en raison des particularités propres aux technologies utilisées, des tolérances particulières aux valeurs limites sont également accordées selon les catégories industrielles concernées. Ces tolérances sont annexées au présent décret.

SECTION 2

DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES RELATIVES AUX REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

Art. 4. — Toutes les installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent être conçues, construites et exploitées de manière à ce que leurs rejets d'effluents liquides industriels ne dépassent pas à la sortie de l'installation les valeurs limites des rejets définies en annexe du présent décret et doivent être dotées d'un dispositif de traitement approprié de manière à limiter la charge de pollution rejetée.

Art. 5. — Les installations de traitement doivent être conçues, exploitées et entretenues de manière à réduire à leur minimum les durées d'indisponibilité pendant lesquelles elles ne peuvent assurer pleinement leur fonction.

Si une indisponibilité est susceptible de conduire à un dépassement des valeurs limites imposées, l'exploitant doit prendre les dispositions nécessaires pour réduire la pollution émise en réduisant ou en arrêtant, si besoin, les activités concernées.

SECTION 3

DU CONTROLE DES REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

Art. 6. — Au titre de l'autocontrôle et de l'autosurveillance les exploitants d'installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent tenir un registre où sont consignés la date et les résultats des analyses qu'ils effectuent selon des modalités fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement et, le cas échéant, du ministre chargé du secteur concerné.

Les mesures sont effectuées sous la responsabilité de l'exploitant et à ses frais dans les conditions fixées par la réglementation en vigueur.

Art. 7. — Les résultats des analyses doivent être mis à la disposition des services de contrôle habilités.

Art. 8. — Les services habilités en la matière effectuent des contrôles périodiques et ou inopinés des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des rejets d'effluents liquides industriels visant à s'assurer de leur conformité aux valeurs limites fixés en annexe du présent décret.

Art. 9. — Le contrôle des rejets comporte un examen des lieux, des mesures et analyses opérées sur place et des prélèvements d'échantillons aux fins d'analyses.

Art. 10. — L'exploitant de l'installation concernée est tenu d'expliquer, commenter ou fonder tout dépassement éventuellement constaté et fournir les actions correctives mises en œuvre ou envisagées.

Art. 11. — Les opérations de contrôle, telles que définies ci-dessus, donnent lieu à la rédaction d'un procès-verbal établi à cet effet.

Le procès-verbal comporte :

— les noms, prénoms et qualité des personnes ayant effectué le contrôle,

— la désignation du ou des générateurs du rejet d'effluents liquides industriels et de la nature de leur activité,

— la date, l'heure, l'emplacement et les circonstances de l'examen des lieux et des mesures faites sur place,

— les constatations relatives à l'aspect, la couleur, l'odeur du rejet, l'état apparent de la faune et de la flore à proximité du lieu de rejet et les résultats des mesures et des analyses opérées sur place,

— l'identification de chaque échantillon prélevé, accompagné de l'indication de l'emplacement, de l'heure et des circonstances de prélèvement,

— le nom du ou des laboratoires destinataires de l'échantillon prélevé.

Art. 12. — Les méthodes d'échantillonnage, de conservation et de manipulation des échantillons ainsi que les modalités d'analyses sont effectuées selon les normes algériennes en vigueur.

Art. 13. — Toutes dispositions contraires au présent décret et notamment les dispositions du décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993, susvisé, sont abrogées.

Art. 14. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006.

Ahmed OUYAHIA.

ANNEXE I

VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
1	Température	°C	30	30
2	PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
3	MES	mg/l	35	40
4	Azote Kjeldahl	"	30	40
5	Phosphore total	"	10	15
6	DCO	"	120	130
7	DBO5	"	35	40
8	Aluminium	"	3	5
9	Substances toxiques bioaccumulables	"	0,005	0,01
10	Cyanures	"	0,1	0,15
11	Fluor et composés	"	15	20
12	Indice de phénols	"	0,3	0,5
13	Hydrocarbures totaux	"	10	15
14	Huiles et graisses	"	20	30
15	Cadmium	"	0,2	0,25
16	Cuivre total	"	0,5	1
17	Mercuré total	"	0,01	0,05
18	Plomb total	"	0,5	0,75
19	Chrome Total	"	0,5	0,75
20	Etain total	"	2	2,5
21	Manganèse	"	1	1,5
22	Nickel total	"	0,5	0,75
23	Zinc total	"	3	5
24	Fer	"	3	5
25	Composés organiques chlorés	"	5	7

PH : Potentiel d'hydrogène
DBO₅ : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours
DCO : Demande chimique en oxygène
MES : Matière en suspension

ANNEXE II

TOLERANCE A CERTAINES VALEURS LIMITEES DES PARAMETRES DE REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS SELON LES CATEGORIES D'INSTALLATIONS

1 - INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE :

a - Abattoirs et transformation de la viande :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITEES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITEES ANCIENNES INSTALLATIONS
Volume /quantité	m3/t carcasse traitée	6	8
PH	-	5,5 - 8,5	6-9
DBO ₅	g/t	250	300
DCO	"	800	1 000
Matière décantable	"	200	250

b - Sucrierie :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITEES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITEES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	6-9	6-9
DBO ₅	mg/l	200	400
DCO	"	200	250
MES	"	300	350
Huiles et graisses	"	5	10

c - Levurerie :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITEES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITEES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	35
PH	-	5,5 - 8,5	6,5 - 8,5
DBO ₅	mg/l	100	120
DCO	"	7 000	8 000
MES	"	30	50

d - Brasserie :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITEES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITEES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	9 - 10,5
DBO ₅	g/t de malt produit	250	300
DCO	"	700	750
MES	"	250	300

PH : Potentiel d'hydrogène
DBO₅ : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours
DCO : Demande chimique en oxygène
MES : Matière en suspension

e - Corps Gras :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	6-9
DBO ₅	g/t	200	250
DCO	"	700	800
MES	"	150	200

2 - Industrie de l'Energie :**a - Raffinage de pétrole :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Débit d'eau	m ³ /t	1	1,2
Température	°C	30	35
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DBO ₅	g/t	25	30
DCO	"	100	120
MES	"	25	30
Azote total	"	20	25
Huiles et graisses	mg/l	15	20
Phénol	g/t	0,25	0,5
Hydrocarbures	g/t	5	10
Plomb	mg/l	0,5	1
Chrome 3+	"	0,05	0,3
Chrome 6+	"	0,1	0,5

b - Cokéfaction :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
DBO ₅	mg/l	30	40
DCO	"	120	200
Phosphores	"	2	2
Cyanures	"	0,1	0,1
Composés d'Azote	"	35	40
Indice Phénols	"	0,3	0,5
Benzène, Toluène, Xylène	"	0,08	0,1
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	"	0,08	0,1
Sulfure	"	0,08	0,1
Substances filtrables	"	40	50

PH : Potentiel d'hydrogène
DBO₅ : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours
DCO : Demande chimique en oxygène
MES : Matière en suspension

3 - Industrie mécanique :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5- 8,5	5,5- 8,5
DCO	mg/l	300	350
Cyanure	"	0,1	0,15
Cuivre	"	0,7	1
Nickel	"	0,7	1
Zinc	"	2,5	3
Plomb	"	0,7	1
Cadmium	"	0,5	1
Hydrocarbures	"	15	20
Phénol	"	0,5	1
Métaux totaux	"	20	25

4 - Industrie de transformation des métaux :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Cuivre	mg/l	1.5	2
Nickel	"	2	2,5
Chrome	"	1,5	2
Fer	"	5	7,5
Aluminium	"	5	7,5

5 - Industrie de minerais non métallique :**a - Céramique :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DCO	mg/l	80	120
Matière décantable	"	0,5	1
Plomb	"	0,5	1
Cadmium	"	0,07	0,2

b - Verre :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES INDUSTRIES ANCIENNES
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DCO	mg/l	80	120
MES	"	0,3	0,5
Plomb	"	0,5	1
Cadmium	"	0,07	0,2
Chrome	"	0,1	0,1
Cobalt	"	0,1	0,1
Cuivre	"	0,1	0,3
Nickel	"	0,1	0,5
Zinc	"	2	5

PH : Potentiel d'hydrogène
DCO : Demande chimique en oxygène
MES : Matière en suspension

c - Ciment, plâtre et chaux :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	30
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
DCO	mg/l	80	120
Matière décantable	"	0,5	1
Plomb	"	0,5	1
Cadmium	"	0,07	0,2
Chrome	"	0,1	0,1
Cobalt	"	0,1	0,1
Cuivre	"	0,1	0,3
Nickel	"	0,1	0,5
Zinc	"	2	5

6 - Industrie de textile :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Température	°C	30	35
PH	-	6,5-8,5	6-9
DBO ₅	mg/l	150	200
DCO	"	250	300
Matière décantable	"	0,4	0,5
Matière non dissoute	"	30	40
Oxydabilité	"	100	120
Permanganate	"	20	25

7 - Industrie de tannerie et mégisserie :

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES INDUSTRIES ANCIENNES
DBO ₅	mg/l	350	400
DCO	"	850	1000
MES	"	400	500
Chrome total	"	3	4

PH : Potentiel d'hydrogène
DBO₅ : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours
DCO : Demande chimique en oxygène
MES : Matière en suspension