



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique



**UNIVERSITE ABBES LAGHROUR -KHENCHELA**

**FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE**

**DEPARTEMENT : BIOLOGIE MOLECULAIRE ET CELLULAIRE**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**FILIERE : SCIENCES BIOLOGIQUES**

**OPTION: MICROBIOLOGIE APPLIQUEE**

**Thème :**

**Contribution à la caractérisation des  
cyanobactéries du lac des oiseaux (Wilaya  
d'El Tarf, Nord-Est de l'Algérie)**

**Présenté par :**

**BOUCHAREB Ouissem**

**Soutenu le : 31 Juin 2016**

**Jury de soutenance :**

|                       |                        |              |   |
|-----------------------|------------------------|--------------|---|
| <b>Président :</b>    | <b>THABET Rachid</b>   | <b>M.A.B</b> | <b>Université Abbès_Laghrouur_khenchela</b> |
| <b>Encadreur :</b>    | <b>BENREDJEM Lamia</b> | <b>M.A.A</b> | <b>Université Abbès_Laghrouur_khenchela</b> |
| <b>Examinatrice :</b> | <b>YAKHLEF Wahiba</b>  | <b>M.A.B</b> | <b>Université Abbès_Laghrouur_khenchela</b> |

**Promotion : Juin 2016**

**Le travail a été réalisé au niveau du : laboratoire pédagogique de Microbiologie, Université Abbess Laghrouur-Khenchela et le laboratoire de contrôle de qualité BIOLAB Annaba**

## **Remerciements**

*Au terme de ce travail, je remercie Le miséricordieux tout puissant, qui m'a donné la force et la volanté d'achever cette réalisation et je lui rends grâce: Merci Allah.*

*Je tiens aussi, à exprimer ma gratitude, à Ml. Benrdjem lamia M.A.A (Université de Khenchela), ma promotrice, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses précieux conseils, et surtout pour son soutien tout le long de notre travail.*

*Je remercie également, Mr. Thabet Rachid M.A.B (Université de Khenchela), de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect.*

*Il m'est très agréable de pouvoir présenter ici le plus profond remerciement à Mm. YAKHLEF M.A.B (Université de Khenchela), pour avoir accepté d'examiner mon travail, et de faire partie de mon jury.*

*Mes remerciements vont aussi à Tous mes enseignants Et à l'ensemble du personnel du Université de Khenchela.*

*Un grand merci à toutes personnes qui ont bien voulu répondre à mes questions particulièrement au personnel de laboratoire de biologie.*

*Et enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'exécution de ce modeste travail.*

*A toutes et à tous MERCI*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes parents, qui n'ont jamais cessé de  
m'encourager pour mes études.*

*A mon très cher mari houssem*

*Quand je t'ai connu, j'ai trouvé l'homme de ma vie, mon âme sœur et la  
lumière de mon chemin.*

*Ma vie à tes cotés est remplie de belles surprises.*

*Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égal, ton  
profond attachement m'ont permis de réussir mes études.*

*Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le  
jour.*

*Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce  
travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et  
fidèle.*

*A tous les membres de ma famille, petits et grands*

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection*

*A mes chères ami (e)s*

*Amina, halima, zineb, wided, chahinez,.....*

*A mes chers collègues*

*Amel, sara, marwa,.....*

# TABLE DE MATIERE

**REMERCIEMENTS**

**DEDICACE**

**SOMMAIRE**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**I NTRODUCTION GENERALE** ..... 01

**CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**..... 03

**I. GENERALITEES SUR LES CYANOBACTERIES** ..... 03

**1. Définition** ..... 03

1.1 Caractéristiques générales..... 04

1.2 Structure des cyanobactéries..... 05

1.3 Diversité morphologique ..... 05

1.4 Multiplication..... 06

1.5 Cycle de vie des cyanobactéries..... 06

**2. Taxinomie**..... 07

2.1 Classification des cyanobactéries..... 08

2.2 Suivant le code de nomenclature botanique..... 10

**3. Capacités d'adaptation**..... 11

3.1 Pigments photosynthétiques..... 12

3.2 Mobilité vertical et horizontale..... 13

3.3 Nutriments..... 15

3.4 Dormance..... 15

3.5 Prédation..... 16

3.6 Compétition..... 16

3.7 Résistance à des conditions environnementales défavorables..... 17

**4. Les paramètres de croissance des cyanobactéries**..... 17

4.1 Paramètres abiotiques..... 17

4.1.1 La température..... 18

4.1.2 La lumière..... 18

4.1.3 La PH..... 19

4.1.4 La turbidité..... 19

4.1.5 L'oxygène dissout..... 19

4.1.6 La profondeur..... 19

4.1.7 Les teneurs en sels nutritifs (phosphore et azote)..... 19

4. 2 Paramètres biotiques..... 20

4.2.1Chlorophylle-a..... 21

4.2.2 Le zooplancton..... 21

**II. LES PROLIFERATIONS DE CYANOBACTERIES** ..... 22

**1. Facteurs environnementaux favorables au développement de prolifération de cyanobactéries**..... 22

|  |    |
|--|----|
| <b>5. Les espèces des cyanobactéries</b> .....   | 23 |
| 5.1 Microcystis.....   | 23 |
| 5.2 Cylindrospermopsis.....  | 23 |
| 5.3 Aphanizomenon.....   | 24 |
| 5.4 Planktothrix.....  | 24 |
| <b>6. Les toxines de cyanobactéries</b> .....  | 25 |
| 6.1 Les hépatotoxines.....   | 25 |
| 6.1.1 Les microcystines(MCs).....  | 26 |
| 6.1.2 Les nodularines(Nod).....  | 27 |
| 6.1.3 Les cylindrospermopsine(CYN) et ces analogues.....                                 | 27 |
| 6.2 Les neurotoxines.....  | 27 |
| 6.2.1 Les anatoxines.....  | 28 |
| 6.2.2 Les saxitoxines et leurs dérivés.....  | 29 |
| 6.2.3 La B-N-méthylamino-L-alanine ou BMAA.....  | 29 |
| 6.3 Les dermatotoxines.....  | 30 |
| 6.4 Lypopolysaccharides.....   | 30 |
| 6.5 Les voies de biosynthèse des cyanotoxines.....                                       | 30 |
| <b>7. Effets indésirables des proliférations de cyanobactéries</b> .....                 | 31 |
| 7.1 Sur l'environnement et le cadre de vie.....  | 31 |
| 7.2 Impact sur les organismes vivants.....   | 31 |
| 7.3 Impact sur l'équilibre écologique.....   | 31 |
| 7.4 Sur la santé humaine (la santé publique).....  | 32 |
| <b>8. Règlementation relatives aux cyanobactéries et aux cyanotoxines</b> .....          | 34 |
| <b>9. Moyens de lutte contre les proliférations de cyanobactéries</b> .....              | 35 |
| <b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES</b>   |    |
| <b>1-Présentation du site d'étude (Lac des oiseaux)</b> .....                            | 36 |
| 1.1-Caractéristiques écologiques (faunistiques du Lac).....                              | 37 |
| 1.2-Caractéristiques physiques.....  | 37 |
| <b>2-Echantillonnage des cyanobactéries</b> .....  | 38 |
| <b>3- Analyses physico-chimiques</b> .....   | 39 |
| 3.1-Mesure des paramètres physicochimiques.....  | 39 |
| 3.2-Dosage des éléments nutritifs.....   | 39 |
| 3.2.1-Dosage des Orthophosphates ( $PO_4^{3-}$ ).....                                    | 39 |
| 3.2.2- Dosage des Nitrates.....  | 40 |
| <b>4-Identification et le dénombrement des Cyanobactéries</b> .....                      | 41 |
| <b>CHAPITRE 3 : RESULTAT ET DISCUSSION</b>   |    |
| <b>1- Caractéristiques physico-chimiques des eaux du Lac des oiseaux 2015/2016</b> ..... | 44 |
| a) Température.....  | 44 |
| b) pH.....   | 44 |
| c) Oxygène dissout.....  | 45 |

|   |           |
|---|-----------|
| d) Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ).....  | 46        |
| e) Nitrates .....   | 46        |
| <b>2- Identification et comptage des Cyanobactéries au niveau du lac des oiseaux.....</b>                                 | <b>47</b> |
| 2-1. Par la méthode classique (LAME ET LAMELLE) .....   | 47        |
| a) Le genre <i>Microcystis</i> .....  | 49        |
| b) Le genre <i>Spirulina</i> .....  | 50        |
| c) Le genre <i>Anabaena</i> .....   | 51        |
| d) Le genre <i>Anabaenopsis</i> .....   | 52        |
| e) Le genre <i>Pseudanabaena</i> .....  | 53        |
| <b>3. Dénombrement des cyanobactéries au lac des oiseaux .....</b>  | <b>53</b> |
| a) Les mois de Juillet à Décembre 2015.....   | 53        |
| b) Les mois de Janvier à Avril 2016.....  | 54        |
| <b>4. Etude statistique.....</b>  | <b>55</b> |
| 4.1 Analyse de la corrélation entre les paramètres physico-chimiques et les moyennes des densités des Cyanobactéries..... | 55        |
| <b>DISCUSSION .....</b>   | <b>59</b> |
| <b>CONCLUSION.....</b>  | <b>62</b> |
| <b>ANNEXE</b>   |           |
| <b>RESUME</b>   |           |

## LISTE DES ABREVIATIONS

**C°** : degré Celsius

**cm**: centimètre

**l'IPFM** : Intoxication Paralysante par les Fruits de Mer

**PSP** : paralytique shellfish poisons ».

**STX** : Les saxitoxines

**TTX** : la tétrodotoxine

**LPS** : Les lypopolysaccharides

**Chl a** : chlorophylle *a*

**OMS** : l'Organisation Mondiale de la Santé

**µm** : Le micromètre

**m** : mètre

**ADN** : L'acide désoxyribonucléique

**UV** : Le rayonnement ultraviolet

**pH** : Le potentiel hydrogène

**ARN** : L'acide ribonucléique

**ICBN** : International Code of Botanical Nomenclature

**ICNB** : International Conference on Nanotechnology and Biosensors

**N<sub>2</sub>** : diazote

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** : L'ion ammonium de formule brute

**%** : pourcentage

**mg** : Milgram

**L** : litre

**PO<sub>4</sub>** : phosphate

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : nitrate

**ml** : milligramme

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone

**MC-LR** : Microcystin-LR un toxine

**PP1** : Protein phosphatase 1

**PP2A** : Protein phosphatase 2 A un enzyme

**C15H21N5O7S** : Cylindrospermopsin

**Kb** : Kilobase

**K<sup>+</sup>** : un ion potassium

**Kg** : kilogramme

**h** : heure

**Ca<sup>2+</sup>** : Les protéine kinases

**Na<sup>+</sup>** : Le sodium

**N** : Nord

**E** : Est

**Km** : kilomètre

## LISTE DES FIGURES

| Figure           | Titre  | Page |
|------------------|--|------|
| <b>Figure 1</b>  | Structure d'une cyanobactérie  |      |
| <b>Figure 2</b>  | Cycle de vie des cyanobactéries  |      |
| <b>Figure 3</b>  | Exemples de localisation des cyanobactéries dans un lac profond  |      |
| <b>Figure 4</b>  | Situation géographique du Lac des oiseaux  |      |
| <b>Figure 5</b>  | Photographie du Filet à plancton   |      |
| <b>Figure 6</b>  | Echantillon de cyanobactéries après filtration   |      |
| <b>Figure 7</b>  | Variation spatiotemporelle de la température dans le Lac des oiseaux pendant la période d'étude                  |      |
| <b>Figure 8</b>  | Variation spatiotemporelle du pH dans le Lac des oiseaux pendant la période d'étude                              |      |
| <b>Figure 9</b>  | Variation spatiotemporelle de la teneur en oxygène dissout dans le Lac des oiseaux pendant la période d'étude    |      |
| <b>Figure 10</b> | Variation spatiotemporelle de la concentration des Orthophosphates au niveau du Lac des oiseaux                  |      |
| <b>Figure 11</b> | Variation spatiotemporelle de la concentration des nitrates au niveau du Lac des oiseaux                         |      |
| <b>Figure 12</b> | Distribution des Cyanobactéries au lac des oiseaux (Lame /lamelle)   |      |
| <b>Figure 13</b> | Photographie du genre <i>Microcystis</i>   |      |
| <b>Figure 14</b> | Photographie du genre <i>limnothrix pseudospirulina</i>  |      |
| <b>Figure 15</b> | Photographie du genre <i>limnothrix hypolimnica</i>  |      |
| <b>Figure 16</b> | Photographie du genre <i>Anabaena</i>  |      |
| <b>Figure 17</b> | Photographie du genre <i>Anabaenopsis</i>  |      |
| <b>Figure 18</b> | Photographie du genre <i>Pseudanabaena</i>   |      |
| <b>Figure 19</b> | Variation des moyennes des densités mensuelles globales des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux          |      |
| <b>Figure 20</b> | La corrélation entre la température et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux    |      |
| <b>Figure 21</b> | La corrélation entre le pH et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux             |      |
| <b>Figure 22</b> | La corrélation entre l'oxygène dissout et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux |      |
| <b>Figure 23</b> | La corrélation entre l'Orthophosphate et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux  |      |
| <b>Figure 24</b> | La corrélation entre le nitrate et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux        |      |



## LISTE DES TABLEAUX

| <b>Tableau</b>   | <b>Titre</b>   | <b>Page</b> |
|------------------|--|-------------|
| <b>Tableau 1</b> | Correspondance entre la classification botanique et la classification bactériologique des cyanobactéries   |             |
| <b>Tableau 2</b> | Les principaux ordres de cyanobactéries  |             |
| <b>Tableau 3</b> | Exemples d'intoxications animales liées aux toxines de cyanobactéries  |             |
| <b>Tableau 4</b> | Exemples d'intoxications humaines liées aux toxines de cyanobactéries  |             |
| <b>Tableau 5</b> | Distribution générique mensuelle des Cyanobactéries potentiellement toxiques au niveau du Lac des oiseaux durant la période d' Juillet 2015 à Avril 2016 |             |
| <b>Tableau 6</b> | Variation des moyennes des densités de chaque prélèvement des mois de Juillet à Décembre 2015 des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux            |             |
| <b>Tableau 7</b> | Variation des moyennes des densités de chaque prélèvement des mois de Janvier à Avril 2016 des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux               |             |
| <b>Tableau 8</b> | Coefficient de corrélation entre les paramètres physico-chimique de l'eau et la densité des cyanobactéries toxiques                                      |             |



## INTRODUCTION GENERALE

Les eaux douces incluent des systèmes d'eau ouverts tels que les lacs et les rivières ou fermés tels que les barrages. Ces eaux contiennent des gaz dissous, des nutriments, des traces de métal et de composés organiques et inorganiques (**Mackenzie et al., 2000**). La présence de ces éléments favorise la prolifération de différents phytoplanctons induisant l'eutrophisation qui se traduit par la modification de la transparence des plans d'eau (**Chorus & Bartram, 1999; Paerl et al., 2001; Havens et al., 2003**).

Les blooms de cyanobactéries reflètent l'augmentation du phénomène d'eutrophisation dans plusieurs lacs et réservoirs dans différents pays du monde (**Paerl et al. 2001**). Dans le langage courant, on réserve le non d'eutrophisation au passage artificiel, par pollution d'origine humaine, à l'état eutrophe. Il faut signaler qu'il n'y a pas de différence écologique fondamentale entre les états naturels et ceux dus à l'eutrophisation provoquée : Elle se caractérise par une production primaire excessive et un déséquilibre entre les consommateurs et les décomposeurs au détriment des premiers (**Crouzet et al.1987**). Elle représente une menace croissante pour les plans d'eau car elle provoque une prolifération massive des algues que les spécialistes dénomment « fleur d'eau » (algal bloom) ou plus simplement «bloom» (**Falconer et al.,1983**).

La présence des espèces toxiques dans les eaux destinées à l'alimentation, l'irrigation et aux activités récréatives pose de graves problèmes pour la santé humaine et l'agriculture puisqu'elles produisent des substances hydrosolubles qui sont potentiellement hépatotoxiques et/ou neurotoxiques (**Carmichael ,1994**).

Les proliférations des blooms cyanobactériens sont le plus souvent associées à trois facteurs principaux (**Brient et al., 2000**) :

- Des concentrations élevées en nutriments dont le phosphore et/ou l'azote qui sont souvent les éléments nutritifs limitant dans le plan d'eau
- Les conditions météorologiques favorables : luminosité et température
- Le zooplancton qui exerce une pression sélective et régule leur croissance via le broutage.

La croissance algale est favorisée par des caractéristiques optimales particulières (Température, pH, ensoleillement, nutriments, etc.).

Ce travail intitulé "Contribution à la caractérisation des cyanobactéries du lac des oiseaux (wilaya d'El Tarf, Nord-Est de l'algérie)".

Cette étude comporte plusieurs volets:

- Le suivi des variations des paramètres physico-chimiques de l'eau du lac des oiseaux.
- L'identification et l'inventaire des genres de Cyanobactéries toxiques qui peuplent le lac des oiseaux.
- La distribution et de la dynamique mensuelle des Cyanobactéries recensées.
- L'évolution des Cyanobactéries en fonction de certains paramètres physico-chimiques de l'eau du lac.

## **CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **I. GENERALITES SUR LES CYANOBACTERIES**

Les cyanobactéries sont des microorganismes aquatiques qui présentent à la fois des caractéristiques provenant des bactéries et des algues. Elles contiennent, comme les algues, de la chlorophylle qui est le pigment responsable de la photosynthèse. La photosynthèse est un processus qui permet aux plantes et à d'autres organismes d'utiliser l'énergie solaire pour fabriquer leur nourriture.

Les cyanobactéries sont présentes de façon naturelle dans les lacs. Leur présence devient problématique lorsque certaines espèces se multiplient rapidement et forment une masse visible à l'œil nu (à la surface du lac ou dans l'eau) que l'on nomme fleur d'eau ou « bloom » de cyanobactéries.

#### **1. Définition**

Parmi le peuplement phytoplanctonique qui est présent dans les eaux douces, on cite les cyanobactéries, sont des organismes procaryotes (**Carmichael, 1994 ; Chorus & Bartram, 1999; Pitois, et al., 2000**).

Les cyanophytes se distinguent des autres embranchements car ils regroupent les micro-organismes procaryotes (sans membrane nucléaire définie). Cet embranchement est composé de la classe des Cyanophycées. Ces micro-organismes sont dépourvus de flagelles et leur appareil végétatif peut être unicellulaire, colonial ou filamenteux. Les cellules renferment de la chlorophylle a et des phycobiliprotéines.

Les réserves sont constituées par le glycogène, la cyanophycine et des gouttelettes lipidiques. Il existe aussi des granules de polyphosphates. La multiplication s'effectue principalement par division cellulaire et par fragmentation chez les filamenteux (**Reviere, 2003**).

Apparues il y a environ 3,8 milliards d'années, elles ont contribué à l'expansion des formes actuelles de vie sur terre par leur production d'oxygène par photosynthèse (elles sont responsables de la Grande Oxydation et par leur contribution au premier puits biologiques de carbone et à une désacidification des océans, lorsqu'elles se sont organisées en colonies fixées (stromatolithes), capables de produire du calcaire. La photosynthèse est leur principal mode pour obtenir de

l'énergie. Toutefois, certaines espèces peuvent survivre dans des conditions de noirceur totale durant de longues périodes (**Oliver & Ganf, 2000**).

Grâce à leurs pigments, les cyanobactéries utilisent efficacement la lumière verte, jaune et orange, portion du spectre qui est généralement moins bien exploitée par les autres algues planctoniques (**Mur et al., 1999**).

Elles peuvent ainsi survivre lorsque seule la lumière verte est disponible. C'est la forte concentration en phycocyanine, sous certaines conditions, qui rend les cyanobactéries d'une couleur bleuâtre (**Whitton et M. Potts, 2000**).

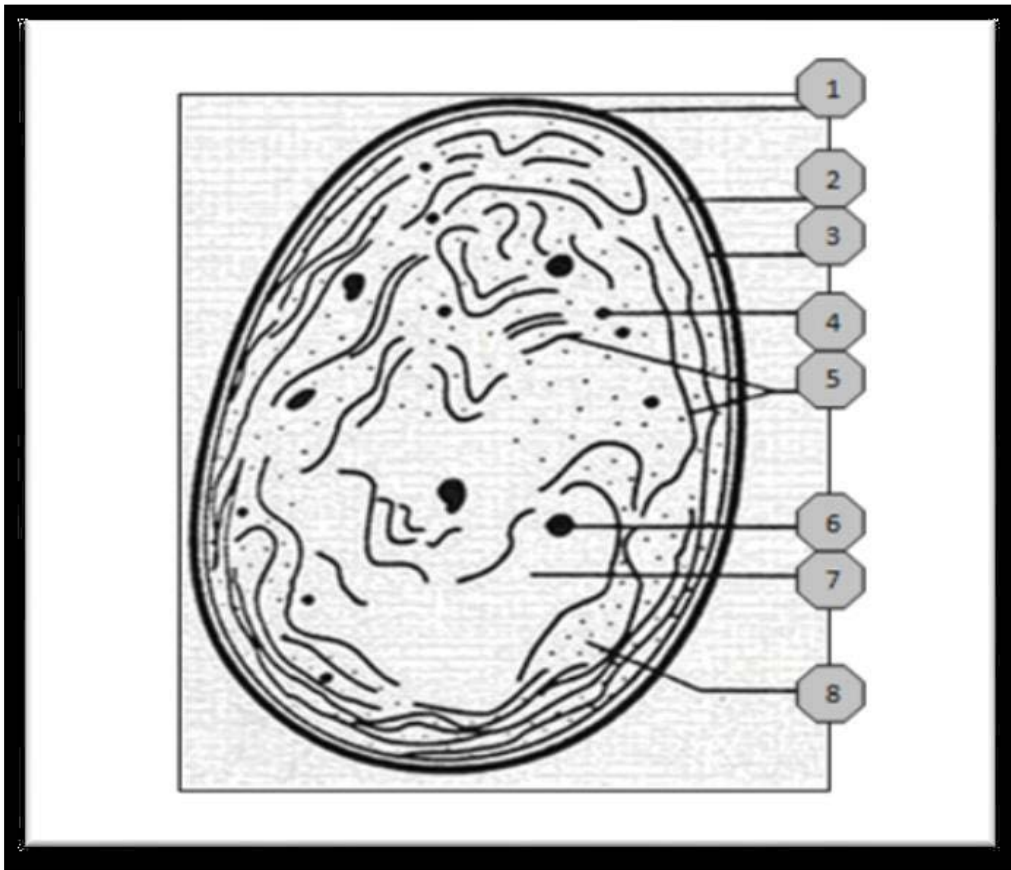
Elles se regroupent en quelque 2000 espèces réparties en 150 genres (**Duy et al., 2000**).

### 1.1. Caractéristiques générales

Les cyanobactéries sont des procaryotes à Gram négatif, photosynthétiques, elles sont classées du point de vue systématique dans le règne des *Bacteria* (**Garrity et al., 2001**). Ces microorganismes ont longtemps été rangés dans le règne végétal car ils présentent, outre des propriétés spécifiques des bactéries, des caractéristiques propres aux algues :

- la structure cellulaire est similaire à celle des bactéries et caractérisée en particulier par l'absence de noyau et d'organites intracellulaires (absence de mitochondrie, d'appareil de Golgi et de réticulum endoplasmique),
- comme les algues, la plupart des cyanobactéries des eaux continentales possède de la chlorophylle *a* et non de la bactériochlorophylle comme certaines bactéries. Ces pigments photosynthétiques sont localisés au niveau des thylacoïdes au lieu d'être enfermés dans les chloroplastes comme dans les systèmes photosynthétiques eucaryotes. Elles renferment aussi généralement des phycobiliprotéines et réalisent une photosynthèse productrice d'oxygène en utilisant l'eau comme donneur d'électrons. Ces pigments accessoires sont responsables, en fonction de leur présence et de leurs concentrations relatives, de la couleur bleue (phycocyanine, allophycocyanine) ou rouge (phycoérythrine) de certaines espèces de cyanobactéries.

## 1.2. Structure des cyanobactéries



**Fig 1 : Structure d'une cyanobactérie (www.futura-science.com)**

1- Enveloppe, 2- Paroi cellulaire, 3- Membrane plasmique, 4- gouttelettes lipidiques, 5- Membrane internes contenant les pigments chlorophylliens, 6- Corps protéique, 7- Corps nucléaire ou nucléoïde (matériel génétique), 8- Hyaloplasme avec ribosomes.

## 1.3. Diversité morphologique

Ces microorganismes présentent une large gamme d'organisation morphologique (**Bourelly, 1985**).

Unicellulaires sphériques, ellipsoïdales, cylindriques, ovoïdes ou piriformes, isolées ou agrégées en colonies de formes irrégulière, sphérique, globuleuse, lobée, quadratique ou plane. Les formes pluricellulaires filamenteuses pourront être uni- ou plurisériées (une ou plusieurs séries de cellules jointives) avec ou sans gaine de polysaccharides (on parle alors respectivement de filaments et de trichomes), avec ou sans ramifications (vraies ou fausses). Un mucilage peut entourer les colonies, trichomes et filaments et présentera des contours nets ou diffluent et une coloration plus ou moins marquée.

Les cyanobactéries sont par ailleurs capables de différencier trois types cellulaires (Komarek *et al.*, 2003) :

- les cellules végétatives, au contenu cellulaire assez homogène pouvant contenir des granules ou encore, chez certaines espèces planctoniques, des vésicules à gaz, organites leur conférant une flottabilité dans la colonne d'eau et leur permettant pour certaines espèces de s'accumuler à la surface des plans d'eau.
- les hétérocytes, observés chez certaines formes filamenteuses, sont des cellules différenciées, à paroi épaisse, spécialisées dans la fixation de l'azote atmosphérique par réduction du N<sub>2</sub> en NH<sub>4</sub><sup>+</sup> catalysée par la nitrogénase. Les espèces qui possèdent ces structures sont capables d'une autotrophie vis-à-vis de l'azote.
- les akinètes, observés également chez certaines formes filamenteuses, sont des cellules différenciées de grande taille, à paroi épaisse, riches en polypeptides qui constituent des formes de résistance permettant la survie des cyanobactéries lorsque les conditions environnementales sont défavorables.

### 1.4. Multiplication

La multiplication des cyanobactéries est végétative, c'est-à-dire asexuée, et elle s'effectue par division binaire d'une cellule mère en deux cellules filles, par bourgeonnement ou par divisions multiples. Selon les espèces et les conditions environnementales, les temps de doublement des populations varient de quelques heures à plusieurs jours. Chez les formes unicellulaires la division successive de la cellule mère libère des nanocytes ou baeocytes. Ainsi, les formes filamenteuses se dispersent par fragmentation au niveau des nécriides (cellules dégénérantes) libérant de courts trichomes ou filaments (les hormogonies).

### 1.5. Le cycle de vie des cyanobactéries

Le cycle de vie des cyanobactéries peut être décomposé en étapes liées aux cellules de résistance:

#### Cellule de résistance

C'est l'une des formes de reproduction des cyanobactéries. Les cellules de résistance peuvent soit être unicellulaires ou pluricellulaires. Elles ressemblent parfois



aux cellules de cyanobactéries, mais qui auraient une enveloppe plus épaisse pour les protéger.

Les étapes de cycle de vie sont :

- le recrutement (mouvement des sédiments vers la colonne d'eau)
- la germination (transformation d'un état de résistance vers un état actif)
- la croissance
- la formation de cellules de résistance (différentiation cellulaire ou la mort d'une partie du filament)
- la sédimentation (mouvement vers les sédiments).

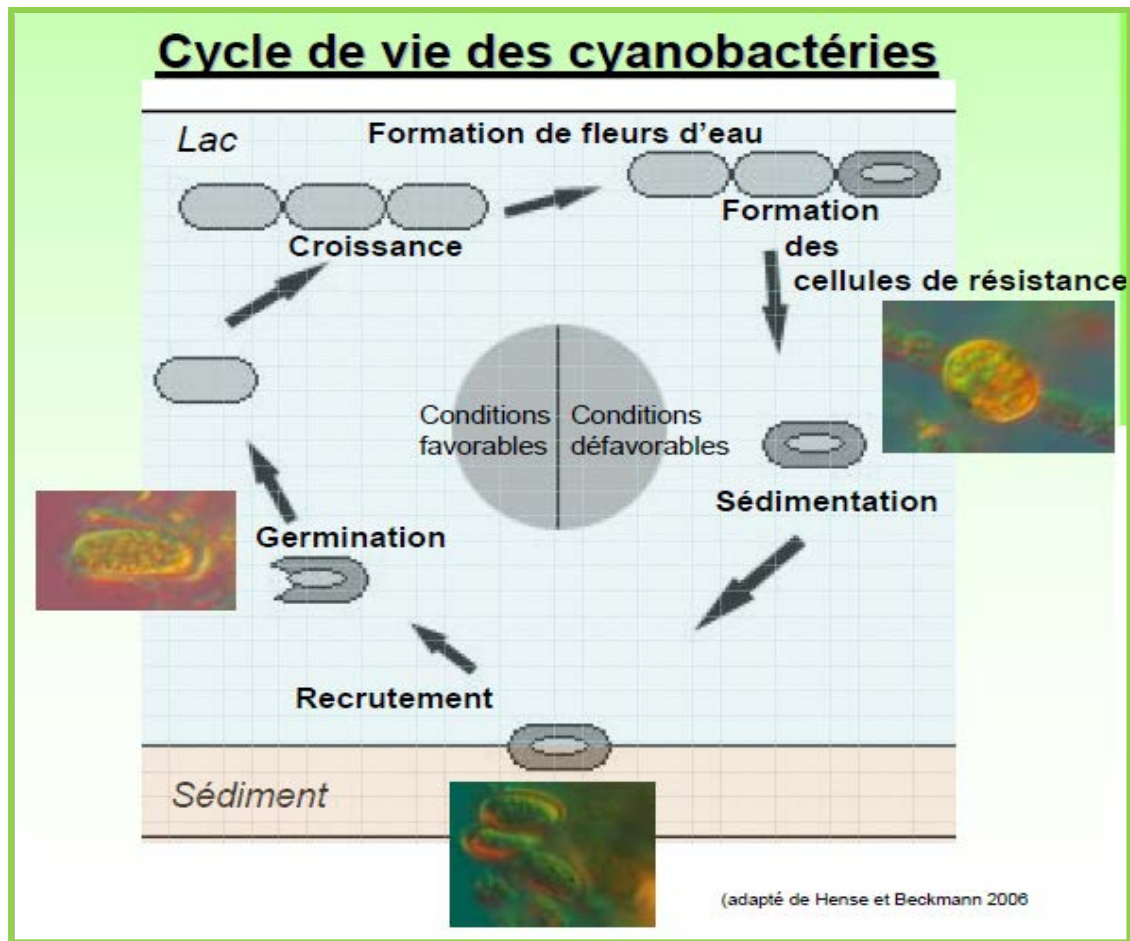


Fig 2 : cycle de vie des cyanobactéries (Hense et Beckmann 2006)

## 2. Taxinomie

A ce jour, la classification de ces organismes dépend à la fois du Code International de Nomenclature Botanique (ICBN, **Greuter et al., 2000**) et du Code International de

Nomenclature des Bactéries (ICNB, **Lapage et al., 1992**). La classification selon le code de nomenclature botanique repose sur des critères morphologiques (dimensions cellulaires) et physiologiques tels que la composition en pigments, la présence de vésicules à gaz, la composition en substances de réserve, la paroi cellulaire ou encore la présence de cellules différenciées (hétérocytes et/ou akinètes) et le mode de multiplication. Après de nombreuses modifications, la classe unique des Cyanophycées a été subdivisée en quatre ordres (Chroococcales, Nostocales, Oscillatoriales et Stigonématales), eux-mêmes divisés en familles regroupant 124 genres pour 2500 espèces (**Anagnostidis and Komarek, 1985, 1988, 1990; Komarek and Anagnostidis, 1986, 1989, 1998, 2005; Komarek et al., 2003**). Dans tous les cas, les noms de genres et d'espèces actuellement utilisés pour l'identification et la systématique sont ceux empruntés à la botanique.

Le code de nomenclature bactériologique est basé sur des études comparatives entre souches axéniques en culture. Cette classification prend en compte la morphologie mais aussi les caractéristiques physiologiques, biochimiques et génétiques (**Rippka and Herdman, 1992**).

Pour les bactériologistes, ces microorganismes sont des bactéries photo-autotrophes et elles sont appelées cyanobactéries dans le Bergey's Manual (**Garrity, et al., 2001**) Les apports de la biologie moléculaire à la systématique et à la phylogénie devraient permettre à terme la définition d'une taxinomie des cyanobactéries stable et universelle.

### 2.1. Classification des cyanobactéries

La correspondance entre la classification de ces organismes dans le code international de nomenclature botanique ICBN(1) (**Greuter et al., 1994**). et celle du code international de nomenclature des bactéries ICNB ( **Sneath (ed) 1992**), est représentée dans le tableau 1.

Les cyanobactéries étant considérées comme des micros algues, leur nomenclature a été d'abord régie par les règles du code de nomenclature botanique. Les espèces types sont déposées sous forme d'herbier ou d'illustrations ou sous leurs caractéristiques morphologiques et écologiques.

**Tableau 1 : Correspondance entre la classification botanique et la classification bactériologique des cyanobactéries (Greuter *et al.*, 1994).**

|                            | Classification botanique | Classification bactériologique |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| <b>Division<br/>classe</b> | <b>Cryptogames</b>       |                                |
|                            | <b>Thallophytes</b>      |                                |
|                            | <b>Algues</b>            |                                |
|                            | <b>Procaryotes</b>       | <b>Procaryotes</b>             |
|                            | <b>Cyanophytes</b>       | <b>Eubactéries</b>             |
|                            | <b>Cyanophycées</b>      | <b>Gracilicutes</b>            |
|                            |                          | <b>Cyanobactéries</b>          |

Aujourd'hui ces micro-organismes peuvent être décrits selon des codes de nomenclatures botaniques ainsi que bactériologiques. Selon le dernier, la validité des espèces est généralement basée sur des études comparatives des souches en culture pure (Stanier *et al.*, 1978).

L'avantage d'un tel matériel de référence est que l'on peut examiner aussi bien la morphologie que les besoins nutritionnels, les propriétés enzymatiques et biochimiques des souches en plus, des études génétiques (détermination du pourcentage en guanine plus cytosine ; hybridation ADN/ADN ou ADN/ARN) peuvent être conduites afin d'établir les relations de parenté sans ambiguïté.

Elles sont des procaryotes placés dans le règne des eubactéries, des bactéries gram Négative. Photosynthétiques qui se répartissent en 150 genres totalisant environ 2000 espèces Selon nombreux chercheurs (Brock, 1973 ; Bourlley, 1991 ; Thebault et Lesne, 1995 ; Charmichael, 1997 ; Vesie *et al.*, 1998) il y a seulement 22 genres comprenant 40 espèces qui sont à l'origine des efflorescences toxiques.

Les cyanobactéries les plus étudiées sont des neurotoxines qui agissent sur le système nerveux, paralysant les muscles respiratoires et des hépatoxines (*microcystis* et nodularine) qui endommagent le foie où le sang s'y accumule, On compte parmi les

genres toxiques : *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Oscillatoria* et *Microcystis*, ce dernier est considéré comme le plus fréquemment impliqué dans les cas de toxicité.

La classification bactériologique suit largement la taxonomie traditionnelle botanique (**Geitler, 1932**) en utilisant des caractères tels que la morphologie, le mode de division et la différenciation des cellules spécialisées (hétérocystes et akinètes) (**Stanier et al., 1971; Rippka et al., 1979**).

### 2.2. Suivant le code de nomenclature botanique

A l'heure actuelle, l'embranchement ne comprend qu'une classe unique, celle de cyanophycées, subdivisée en deux sous classes :

#### 1- Sous classe des coccogonophycidées

Groupant les formes solitaires ou coloniales, parfois filamenteuses mais sans hormogonies et se multipliant uniquement par spores unicellulaires. Trois ordres existent dans cette sous –classe :

- a. Chroococcales
- b. Oscillatoriales
- c. Pleurocapsale

#### 2- Les hormogonophycidées

Qui ont des formes filamenteuses à trichomes souvent entourés d'une gaine, à multiplications par Hormogonies pluricellulaires. Dans cette sous classe on rencontre des espèces à hétérocystes ; il existe deux ordres dans cette sous classe :

- a. Stigonématales
- b. Nostocale

**Tableau 2: Les principaux ordres de cyanobactéries (Ghedadbia, 2012).**

| Ordre           | Forme générale                                    | Hétérocystes | Autres propriétés   | Genres représentatifs   |
|-----------------|---|--------------|---|---|
| Chroococcales   | Bacilles ou coques<br>Agrégats non filamenteux    | Non          | Presque toujours<br>Immobilés   | <i>Chamaesiphon</i> ,<br><i>Gloeobacter</i> ,<br><i>Synechococais</i> |
| Pleurocapsales  | Bacilles ou coques<br>Peuvent former des agrégats | Non          | Seuls quelques béocytes (petites cellules sphériques reproductrices) sont mobiles                         | <i>Plei/rocapsa</i> ,<br><i>Derniocarpa</i>                           |
| Oscillaloiiales | Filaments, trichomes non ramifiés                 | Non          | Généralement mobiles  | <i>lyngbya</i> .<br><i>Oscillatoria</i> ,<br><i>Spirulina</i>         |
| Xostocales      | Filaments, trichomes non ramifiés                 | Oui          | Souvent mobiles ; peuvent produire des akinètes (cellules à paroi épaisse, résistantes à la dessiccation) | <i>Ambaena</i> ,<br><i>Nostoc</i> ,<br><i>Calothrix</i>               |
| Stigonérnatales | Trichomes Filamenteux ramifiés                    | Oui          | Peuvent produire des akinètes.  | <i>Fischerella</i> ,<br><i>Stigonema</i> ,<br><i>Geitieria</i>        |

### 3. Capacités d'adaptation

Les cyanobactéries utilisent un ensemble de stratégies qui leur a permis de coloniser la plupart des écosystèmes terrestres (sols humides ou arides, glaciers, grottes, rochers) et aquatiques d'eaux douce, marins ou saumâtres (**Bourrelly, 1985**). Leurs capacités d'adaptation leur permettent de survivre et de se développer dans une large gamme de températures (depuis les glaciers (**Skulberg, 1996**) jusqu'aux sources thermales (**Brock, 1967**), de salinité (depuis les lacs hypersalés aux eaux oligohalines), de pH (depuis les eaux carbonatées aux tourbières acides) et de luminosité (depuis les grottes aux lacs tropicaux).

Certains genres de cyanobactéries peuvent former des associations symbiotiques avec divers organismes tels que des algues (diatomées marines et dulçaquicoles), des champignons pour former des lichens, des animaux comme des protozoaires, des

éponges ou des ascidies ou avec des végétaux comme des fougères aquatiques, gymnospermes et angiospermes (**Rowell and Kerby, 1991**).

La majorité des cyanobactéries vit en milieu dulçaquicole et elles prolifèrent en général dans les milieux eutrophes à hypereutrophes. Cependant certaines espèces sont aussi capables dans certaines conditions de connaître des développements importants dans les lacs oligotrophes (**Mez et al., 1997**). En milieu aquatique, les cyanobactéries sont dites planctoniques si elles prolifèrent dans la colonne d'eau ou benthiques si elles vivent fixées sur un substrat (sédiments, roches, coraux, algues, animaux).

### 3.1.Pigments photosynthétiques

Les cyanobactéries utilisent un ensemble de stratégies qui leur a permis de coloniser tous les écosystèmes d'eau douce. D'abord, elles présentent une pigmentation diversifiée qui assure une efficacité photosynthétique élevée et une capacité à soutenir la production photosynthétique nette à une faible intensité lumineuse. Ce sont les phycobiliprotéines qui confèrent cet avantage aux cyanobactéries, comparativement à la plupart des algues, en leur permettant d'exploiter le rayonnement solaire disponible (PAR, *photosynthetically available radiation* ou lumière visible, 400-700 nm) sur une plus grande étendue de longueurs d'ondes.

Une caractéristique importante des cyanobactéries est leur capacité à modifier la composition des pigments-protéines dans leurs complexes photosynthétiques (*lightharvesting complexes*), ce qui leur donne une couleur différente selon les longueurs d'ondes auxquelles elles croissent (**Grossman et al., 2001**).

La forme des cellules et la taille des colonies peuvent également influencer l'absorption de la lumière par les différentes espèces de cyanobactéries.

Les cyanobactéries ont également développé différentes stratégies de protection contre les rayons ultraviolets (UV) et le rayonnement excessif. Par exemple, elles synthétisent des composés qui agissent comme un écran solaire (mycosporine-like amino acids) et d'autres pigments qui sont photo protecteurs (caroténoïdes) car ils éliminent les molécules oxydantes résultant du rayonnement

excessif. Elles possèdent également des mécanismes efficaces de réparation des composantes cellulaires endommagées par les fortes radiations solaires (par ex., l'ADN).

Bien que les cyanobactéries n'atteignent pas les taux de croissance maximums observés chez les algues vertes, leur taux de croissance est plus élevé en conditions de faible intensité lumineuse que celui des algues. Cette dernière caractéristique pourrait expliquer pourquoi les cyanobactéries développent souvent des fleurs d'eau dans les milieux eutrophes, où la lumière est souvent réduite.

### 3.2. Mobilité verticale et horizontale

En condition relativement calme, plusieurs espèces de cyanobactéries peuvent migrer verticalement dans la colonne d'eau grâce à leurs vacuoles gazeuses (structure présente chez plusieurs espèces). Elles peuvent ainsi profiter de la lumière en surface durant le jour, et migrer en profondeur dès la fin de la journée afin d'en exploiter les nutriments qui s'y trouvent souvent en plus grande concentration. En effet, l'absence d'oxygène (anoxie) à la surface des sédiments peut entraîner la remise en suspension du phosphore séquestré et le rendre disponible (Nürnberg, 1984; Carpenter *et al.*, 1999). Ainsi, les fleurs d'eau sont souvent observées le matin alors qu'elles disparaissent en après-midi (Oliver & Ganf, 2000). Cette caractéristique est importante à considérer dans l'élaboration d'un plan d'échantillonnage.

Les cyanobactéries peuvent également ajuster leur position dans la colonne d'eau lorsque l'éclairement est trop élevé, évitant ainsi des dommages causés par un excès de lumière (en particulier les rayons ultraviolets). Le potentiel de migration des cyanobactéries s'étend au delà de la zone photique et de la thermocline. L'étude classique de (Ganf et Oliver, 1982) démontre la capacité qu'ont les cyanobactéries de traverser la barrière de densité que représente une thermocline, alors qu'une population composée de *Microcystis aeruginosa* et d'*Anabaena spiroides* migrait jusqu'à une profondeur de 12 m, traversant la thermocline située alors à 7 m.

Les cyanobactéries régulent leur flottaison en fonction des conditions environnementales, soit en modifiant le taux de formation de vacuoles gazeuses par rapport à la croissance cellulaire, soit en modifiant l'accumulation d'hydrates de

carbone et de protéines lors de la photosynthèse (Oliver & Ganf, 2000). La production de vacuoles gazeuses, lorsqu'il y a abondance de lumière, d'azote et de phosphore, est suffisante pour contrevenir à l'augmentation de la densité cellulaire causée par l'accumulation d'hydrates de carbone (Brookes et Ganf, 2001). L'accumulation de réserves de granules de phosphates influence aussi la flottaison des cellules en modifiant leur densité. L'azote est un facteur limitant la régulation de la flottaison des cyanobactéries à vacuoles gazeuses puisqu'il est une composante essentielle à la synthèse de leurs vacuoles (Oliver & Ganf, 2000).

La forme de la colonie influence également sa flottabilité. Par exemple, les colonies de *Microcystis aeruginosa* ayant un diamètre inférieur à 20 µm ont un pouvoir de migration très limité, alors que les colonies jusqu'à 1 600 µm de diamètre peuvent se transporter verticalement sur une distance de 10 m trois fois par jour (Cronberg et Annadotter, 2006).

En plus de la migration « active » sur le plan vertical, les cyanobactéries subissent également une migration « passive » horizontale due au vent ou aux mouvements des masses d'eau.

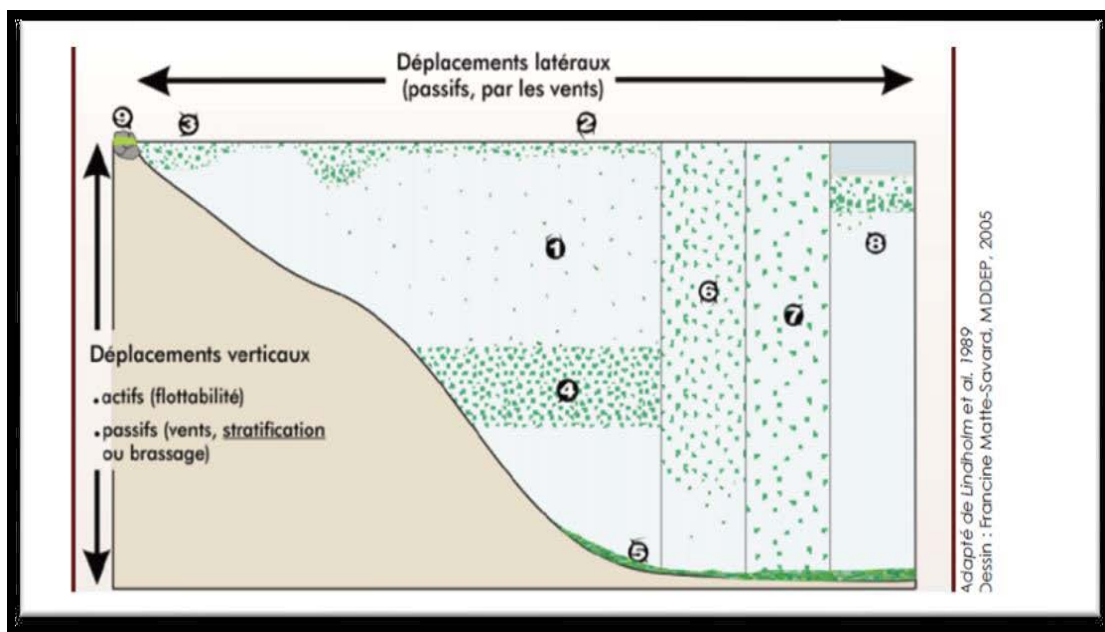


Fig 3: Exemples de localisation des cyanobactéries dans un lac profond (Ishikawa *et al.*, 2002)



1. Dispersion dans la couche d'eau supérieure.
2. Fleur d'eau accumulée en surface sous la forme d'une écume lors d'une journée calme.
3. Ecume de surface accumule près du rivage ou dans une baie en raison du vent.
4. Fleur d'eau dans la couche d'eau intermédiaire (habitat préfère pour certaines espèces).
5. Accumulation de cyanobactéries sur les sédiments.
6. Dispersion sur toute la portion supérieure de la colonne d'eau durant le début du brassage automnal des eaux.
7. Dispersion sur toute la colonne d'eau durant le plein mélange des eaux au printemps (lorsque le lac « cale ») et à l'automne (lorsque les eaux refroidissent).
8. Concentration sous la couche de glace.
9. Dépôt d'écume sur le rivage pouvant résulter d'une baisse du niveau des eaux du plan d'eau ou bien pouvant avoir été apporté par les vagues.

### 3.3. Nutriments

Les cyanobactéries possèdent certaines capacités physiologiques leur conférant une bonne fitness dans le cadre des compétitions entre espèces phytoplanctoniques pour les ressources nutritives. C'est ainsi qu'elles ont des capacités importantes de stockage du phosphore, principal élément limitant dans les écosystèmes aquatiques, sous forme de granules de polyphosphates (**Kromkamp, 1987**) ou d'azote, sous forme de cyanophycine et de phycocyanine ( **Allen and Hutchison, 1980 ; Kolodny et al., 2006**). D'autres sont capables d'utiliser des formes très variées du carbone qui peut être aussi dans certains cas un élément limitant (**Oliver and Gant, 2000**). Enfin, la différenciation des hétérocytes confère à certaines cyanobactéries filamenteuses (par exemple *Aphanizomenon*, *Anabaena* ou *Cylindrospermopsis*) la possibilité de se développer dans des milieux très appauvris en azote inorganique (**Mur, et al., 1999**).

### 3.4. Dormance

Lorsque les conditions du milieu ne sont plus favorables à leur prolifération, les cyanobactéries ont la capacité d'entrer en dormance en attendant un environnement meilleur. Cet état de dormance est possible grâce à la formation de spores ou akinètes (cellules aux parois épaisses contenant des réserves) ou à une modification des cellules végétatives (**Mur et al., 1999**). Les akinètes peuvent ainsi survivre dans les sédiments durant l'hiver et même durant plusieurs années en consommant leurs réserves d'hydrates de carbone par respiration ou Fermentation.

Les cellules qui remontent vers la surface après la dormance sont unicellulaires ou en colonies de très petite taille.

### 3.5. Prédation

Les cyanobactéries sont considérées comme peu soumises à la prédation par le zooplancton et les poissons en raison de leur organisation cellulaire et de leur capacité à synthétiser des toxines.

De nombreux genres de cyanobactéries sont en effet organisés sous forme de filaments ou de trichomes (exemple : *Anabaena*, *Planktothrix*, *Oscillatoria*...) qui peuvent être assemblés en faisceaux (exemple : *Aphanizomenon*), ou sous forme de colonies (exemple : *Microcystis*, *Aphanothece*...) (**Couté et Bernard, 2001**). Cette organisation les rend plus difficiles à être consommé par la plupart des organismes brouteurs du zooplancton par rapport à des cellules isolées (**Oberhaus et al., 2007**).

La capacité à synthétiser des toxines pourrait aussi conférer un avantage sélectif aux cyanobactéries par rapport aux autres microorganismes autotrophes. Bien que le rôle exact des cyanotoxines ne soit pas encore clairement établi, il a été montré que ces métabolites, notamment les microcystines, peuvent avoir un impact direct (mortalité, baisse de fécondité...) sur le zooplancton (**Oberhaus et al., 2006**). En plus de la production de toxines, les cyanobactéries peuvent aussi synthétiser des substances allélopathiques qui tendent à cibler directement les brouteurs et qui peuvent altérer leur physiologie, induire des réactions d'évitement ou causer leur mortalité (**Leflaive and Ten-Hage, L. 2007**).

### 3.6. Compétition

Les cyanobactéries sont adaptées à une multitude de conditions environnementales et excellentes particulièrement sous conditions extrêmes. Il n'est donc pas surprenant qu'elles aient été parmi les premiers organismes à coloniser la Terre et qu'elles soient encore aujourd'hui très compétitives et parfois dominantes. Ce résumé des caractéristiques et adaptations des cyanobactéries n'est pas exhaustif mais présente une image générale de cet organisme primitif. Tous ces facteurs rendent les cyanobactéries très compétitives, surtout à la fin de l'été lorsque la stratification est fréquente et les nutriments en déficit dans l'épilimnion. Par contre, toutes les espèces de cyanobactéries ne possèdent pas ces aptitudes de façon égale et les stratégies

d'adaptation au milieu sont variables selon les espèces et les conditions environnementales. De plus, puisque les cyanobactéries ont peu de prédateurs et puisqu'elles ont la capacité d'éviter la sédimentation par le biais de la flottaison, les taux de perte des cyanobactéries sont généralement faibles (**Vincent, 1989**).

Leurs taux de croissance plus lents sont alors compensés par la forte prévalence des populations une fois qu'elles sont établies (**Mur et al., 1999**). et par leur capacité à modifier l'environnement aquatique à leur avantage.

### 3.7. Résistance à des conditions environnementales défavorables

Certaines cyanobactéries (*Anabaena* et *Aphanizomenon*) sont capables de différencier des cellules de résistance, les akinètes, lorsque les conditions environnementales sont défavorables. Ces cellules peuvent ainsi survivre dans les sédiments durant l'hiver et même durant plusieurs années en consommant leurs réserves d'hydrates de carbone par respiration ou fermentation. Lorsque les conditions environnementales redeviennent propices au développement du phytoplancton, des cellules végétatives sont générées à partir de ces cellules (**Latour and Giraudet, 2004; Kim et al., 2005**).

Une autre stratégie permettant la survie des cyanobactéries consiste à s'installer dans les sédiments pendant l'hiver. Plusieurs études ont montré que le genre *Microcystis* avait un cycle de vie comportant une phase benthique de la fin de l'automne au printemps, puis une phase pélagique de l'été jusqu'à l'automne (**Brunberg and Blomqvist, 2002, 2003; Latour, 2002**).

## 4. Les paramètres de croissance des cyanobactéries

Le développement des cyanobactéries et la formation de fleurs d'eau sont influencés par divers facteurs physiques, chimiques (abiotiques) et biologiques (biotiques); dont les effets combinés ont pour conséquence de très grandes fluctuations aussi bien saisonnières qu'annuelles des niveaux de cyanobactéries et de leurs métabolites secondaires (**Park et al., 1993; Thébault & Lesne, 1995**).

### 4.1. Paramètres abiotiques

Les cyanobactéries sont présentes et surplombent même les autres microorganismes (algues vertes, diatomées...). Elles sont caractérisées par une

croissance massive du printemps jusqu'au début de l'automne. La croissance des cyanobactéries dépend d'abord de la température, de la lumière ainsi que de la présence de sources inorganiques d'azote et de phosphore (**Mur et al., 1999; Haider et al., 2003**). Elles prolifèrent dans une eau dont la température est comprise entre 15°C et 30°C (**Skulberg et al., 1984; Carmichael et al., 1990**), les plus hautes favorisant habituellement un développement plus rapide (**Carmichael et al., 1990**), un pH plutôt basique (compris entre 6 et 9) avec des concentrations assez importantes en azote et en phosphore, une bonne oxygénation, une intensité lumineuse pas très forte et une faible profondeur (**Skulberg et al., 1984; Carmichael et al., 1990**).

### 4.1.1. La température

La température est au nombre des facteurs les plus importants qui permettent à une espèce donnée d'apparaître, d'atteindre un développement maximal, enfin de disparaître à des époques de l'année bien déterminées (**Gayral, 1975**). Les cyanobactéries prolifèrent à une température, comprise entre 15°C et 30°C, (**Carmichael et al., 1990**) sachant que les cyanobactéries possèdent un optimum de croissance à des températures élevées autour de 25°C (**Robarts & Zohary, 1987**); bien qu'elles soient capables de tolérer et de survivre à des températures bien plus basses (**Briand, 2001**).

### 4.1.2. La lumière

Un autre paramètre important est la lumière, les cellules sont capables d'ajuster le fonctionnement de leur appareil photosynthétique en fonction de l'éclairement.

Les cyanobactéries doivent faire face à des conditions lumineuses très changeantes en quantité et en qualité qui dépendent de la latitude, du cycle diurne, des saisons, et de la climatologie (**Smith, 1982**). Ces micro-organismes croissent mieux en présence d'une lumière d'intensité modérée bien qu'ils puissent tolérer des niveaux faibles de lumière (**Carmichael et al., 1990; Mur et al., 1999**).

La forte luminosité d'été étant habituellement photo-inhibitrice (**Skulberg et al., 1984; Carmichael et al., 1990; Mur et al., 1999**). Les cyanobactéries sont capables de croître à de très faibles intensités lumineuses en raison de plus faibles exigences énergétiques des cellules (**Richardson et al., 1983**).

### 4.1.3. Le pH

L'augmentation de la biomasse relative des Cyanophytes et des chlorophytes est favorisée par des pH acides (**Tiffany, 1951**). En revanche, un pH entre 6 et 9 avec des concentrations assez importantes en azote, une bonne oxygénation et une intensité lumineuse pas très forte et une faible profondeur favorisent le développement des cyanobactéries (**Botes *et al.*, 1984**). Le pH et le carbone inorganique dissous évoluent lors des efflorescences de cyanobactéries, avec généralement de fortes valeurs de pH lors de leur croissance et donc des diminutions importantes en carbone inorganique dissous, généralement défavorables pour les autres communautés phytoplanctoniques (**Shapiro, 1997**).

### 4.1.4. La turbidité

Qui est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes, présente elle aussi un facteur limitant de cette prolifération microbienne (**MC Barron & May, 1966**).

### 4.1.5. L'oxygène dissout

Les périodes de fortes densités phytoplanctoniques ne sont pas associée à une saturation en oxygène quelle que soit la station (**Ouattara *et al.*, 2001**).

### 4.1.6. La profondeur

L'augmentation de la profondeur fait diminuer la biomasse relative des Chromophytes (de 61 à 27 %) mais fait augmenter celle des Cyanophytes (de 10 à 24 %) (**Dia & Reynaud, 1982**).

### 4.1.7. Les teneurs en sels nutritifs (phosphore et azote)

Les teneurs en sels nutritifs, en azote et en phosphore, sont des éléments essentiels de croissance mais sont généralement limitées dans l'eau (**Wetzel & Likens, 2000**). Fréquemment, les efflorescences de cyanobactéries sont liées à de fortes concentrations ponctuelles en phosphore et en azote.

Les cyanobactéries peuvent se reproduire en abondance dans les plans d'eau, notamment s'ils sont surchargés de phosphore (**Chevalier *et al.*, 2001**), sa présence sera déterminante quant à l'apparition de fleurs d'eau (**Carmichael *et al.*, 1990; Mur *et al.*, 1999; Kaebernick & Neilan, 2001**).

De plus, la présence de phosphore est essentielle pour la croissance et la prolifération des cyanobactéries, ils l'utilisent sous forme d'orthophosphates, le phosphore est identifié comme étant la substance critique puisqu'il est habituellement, l'élément limitant en milieu aquatique dulcicole (**Prairie & Soucisse, 1999**).

Les réserves internes en phosphore sont caractéristiques des cyanobactéries sous forme de polyphosphates (**Kromkamp, 1987**). Ainsi les cellules stockent du phosphore en conditions non limitantes (près des sédiments) et l'utilisent quand les conditions de lumière deviennent favorables.

Un léger enrichissement des eaux en phosphore total (125 mg/l de PT) et en orthophosphates (25 mg/l de PO<sub>4</sub>) coïncide avec le développement des blooms à cyanobactéries. En réalité, la faible profondeur de la colonne d'eau, associée aux vents quasi-permanents qui règnent au niveau d'une retenue, favoriseraient largement la resuspension des sédiments fortement enrichis en phosphore (**Piersen & Weyhenmeyer, 1994; Derraz, 1995**).

La fixation d'azote atmosphérique moléculaire est l'apanage des cyanobactéries hétérocystées. La capacité de fixer l'azote atmosphérique leur confère un avantage lorsque l'azote inorganique devient l'élément limitant dans la colonne d'eau. De plus les cyanobactéries ont une préférence pour l'azote sous forme d'ammonium (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) alors que le nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) est la forme préférentielle des cellules eucaryotes du phytoplancton (**Blomqvist et al., 1994**).

### 4.2. Paramètres biotiques

En condition favorable, les cyanobactéries ont tendance à supplanter les autres espèces d'algues. Leur adaptabilité et leur prédominance sont dues à leur composition pigmentaire et à la présence de vacuoles gazeuses (**Thébault & Lesne, 1995**).

Ces microorganismes se développent massivement et forment des efflorescences (blooms) qui apparaissent vers le début de l'automne en Europe. Leur prolifération est induite par l'augmentation dans les eaux eutrophes, d'éléments nutritifs tels que les nitrates et le phosphore qui proviennent des activités urbaines et agricoles (**Dawson, 1998 ; Bouaïcha, 2001**), en outre le rejet des substances nutritives inorganiques, provenant de stations d'épuration d'eaux usées municipales

ou d'activités agricoles, est susceptible de favoriser la prolifération des algues microscopiques et celle des cyanobactéries (Cootte & Gregorich, 2000; *et al.*, 2000).

### 4.2.1. Chlorophylle-a

Les algues ayant sensiblement la même densité que le milieu dans lequel elles se développent, il a été admis qu'un ml de matière vivante correspondait à 1 mg (Dia & Reynaud, 1982).

Il existe des corrélations positives au seuil de signification de 1 % entre concentration en chlorophylle a et chlorophytes ( $r^2 = 0.77$ ) ou cyanophytes ( $r^2 = 0.82$ ) (Dia & Reynaud, 1982).

Selon Fqih Berrada et al. en 2000, l'évolution saisonnière de la chlorophylle-a dans la zone qui est euphotique suit plus ou moins bien celle de la biomasse algale. Une corrélation assez élevée ( $r = 0.6$ ) a été trouvée entre ces deux paramètres. Le pic de 40 mg/l de chlorophylle-a en juin 1995 coïncide avec celui de *Microcystis aeruginosa*. Les minima de chlorophylle-a correspondent au déclin de la communauté algale (en hiver notamment).

Certaines discordances apparaissent, de faibles teneurs en chlorophylle-a sont enregistrées (3,2 mg/l), en dépit d'une poussée algale importante. Cette discordance semble être liée aux variations de la teneur cellulaire en chlorophylle qui dépend notamment de la densité cellulaire (Holmes, 1966; Devaux *et al.*, 1982). des quotas cellulaires en nutriment et des conditions d'éclairement (un éclairement intense entraîne une réduction du contenu cellulaire en chlorophylle) (Testard, 1983).

### 4.2.2. Le zooplancton

Le broutage par le zooplancton, l'un des facteurs de contrôle descendant du phytoplancton, s'exerce peu sur les cyanobactéries par rapport aux autres groupes du phytoplancton. Certaines cyanobactéries ont développé différents moyens de défense pour éviter leur consommation par le zooplancton. Hormis une libération de composés chimiques, voire toxiques, leur association en colonies ou leur forme en filaments ne permettent pas au zooplancton de réaliser leurs mécanismes de filtration ou de broutage (Lampert, 1987 ; Bouvy *et al.*, 2001).

Parmi tous ces facteurs, il est souvent difficile de différencier celui qui domine et structure la communauté phytoplanctonique, car différentes échelles de temps et d'espace sont impliquées pour chacun d'eux, en synergie ou non. Cependant, il est important de souligner l'influence des processus physiques sur la biologie et la physiologie des organismes aquatiques ; leur intégration dans les études d'écologie est indispensable pour comprendre la dynamique d'un compartiment trophique (comme le phytoplancton), et donc de la dynamique générale des propriétés d'un plan d'eau (Ngansoumana, 2006).

## **II. LES PROLIFERATIONS DE CYANOBACTERIES : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES**

### **1. Les facteurs environnementaux favorables au développement de proliférations de cyanobactéries**

Le développement des proliférations de cyanobactéries est le plus souvent associé à trois facteurs principaux :

- des concentrations élevées en nutriments (azote et/ou phosphore) qui sont souvent les éléments nutritifs limitants dans les plans d'eau (**Chorus and Mur, 1999**).
- une stabilité de la colonne d'eau au moment du développement (Visser et al., 1996).
- des conditions météorologiques favorables en termes de luminosité et température permettant des taux de croissance importants (Mur et al., 1999).

Ainsi, les proliférations de cyanobactéries apparaissent le plus souvent dans les milieux eutrophes (enrichis en nutriments) et lorsque les masses d'eau sont stratifiées, c'est-à-dire en période estivale.

Un autre processus des changements globaux actuels, l'augmentation des concentrations en CO<sub>2</sub> atmosphérique, pourraient favoriser les proliférations de cyanobactéries.



## 5. Les espèces des cyanobactéries

### 5.1. *Microcystis*

#### a. Description

Colonies de formes variées, à mucilage incolore. Cellules sphériques (diamètre : 0.8-10  $\mu\text{m}$ ) munies de pseudovacuoles, sans disposition particulière au sein de la colonie. Une dizaine d'espèces en Europe, se différenciant par la taille des cellules, leur espacement, la forme de la colonie, l'importance et la consistance du mucilage... Parmi les espèces les plus fréquentes: *Microcystis aeruginosa* , *M. flos - aquae*, *M. viridis* , *M. wesenbergii*...

#### b. Écologie

Capable de migrations verticales. Préfère les eaux calmes ou stratifiées (lacs, réservoirs, plans d'eau, mares). Assez exigeant en nutriments. Peut former des fleurs d'eau très importantes particulièrement en été. Sous certaines conditions de milieu, les colonies peuvent se trouver disloquées, et les nombreuses cellules éparpillées.

Parfois, le mucilage abrite des trichomes de *Pseudanabaena* ( d é- tail photo), dont le nombre semble d'autant plus important que la population de *Microcystis* est âgée (**Kutzing & Lemmermann, 1907**).

### 5.2. *Cylindrospermopsis*

#### a. Description

Organisme filamenteux, unisériel, non ramifié et sans gaine mucilagineuse. Trichomes solitaires, rectilignes, enroulés ou spiralés. Cellules végétatives cylindriques ou ellipsoïdales présentant ou non des pseudovacuoles (L : 2.1-33  $\mu\text{m}$  x l : 0.8-5  $\mu\text{m}$ ). Diamètre en général inférieur à 2  $\mu\text{m}$  pour les espèces françaises. Constriction ou non au niveau des cloisons. Hétérocytes pointus à leur apex libre, exclusivement terminaux (pas toujours présents) et akinètes simples ou par paires, éloignés ou adjacents aux hétérocytes.

Il est très abondant, de façon durable, dans certaines stations. *Cylindrospermopsis* peut être difficile à identifier chez les populations très jeunes, car hétérocytes et akinètes sont souvent absents.

**b. Écologie**

Genre planctonique initialement à distribution strictement tropicale, mais semble avoir depuis les années 1990 un comportement invasif en Europe. Observé toujours en été, avec des températures d'eau assez élevées ( $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) Il peut développer des proliférations impressionnantes (plusieurs centaines de millions de trichomes par litre), qui rendent l'eau verdâtre, opaque et généralement sans écume **5.3 (Seenayya & Subba Raju, 1972).**

**5.3. *Aphanizomenon***

**a. Description**

Organisme filamenteux, unisériel, non ramifié et sans gaine mucilagineuse. Trichomes droits, solitaires ou en faisceaux. Cellules cylindriques ou en tonnelet voire très allongées, renfermant la plupart du temps des pseudovacuoles (L:  $2\text{-}30\text{ }\mu\text{m}$  x l :  $2\text{-}8\text{ }\mu\text{m}$ ). Constriction au niveau des cloisons absente ou peu marquée. Hétérocytes intercalaires, contigus ou non aux akinètes et généralement cylindriques allongés. Cellules apicales plus ou moins incolores, vacuolisées et, selon les espèces et la phase de croissance, un peu atténuées jusqu'à très effilées (semblables à un poil).

**b. Écologie**

Planctonique, ce genre peut engendrer de très importantes fleurs d'eau, très visibles lorsque les faisceaux de trichomes s'accumulent en surface. Cette disposition groupée (cf. *Aphanizomenon flos-aquae*) semble favoriser les migrations verticales, lorsque les eaux sont stratifiées. *Aphanizomenon* supporte mal des conditions turbulentes. Exigeant en lumière et en phosphore, *Aphanizomenon* est cependant fixateur d'azote (atmosphérique) grâce à ses hétérocytes. Cependant, lorsque le milieu est très riche en azote dissous, les hétérocytes peuvent être totalement absents, d'où une possible confusion avec *Planktothrix*. Le degré de vacuolisation des apex est variable, et semble dépendre des conditions environnementales (nutritives notamment). Parfois les trichomes montrent des constriction au niveau des cloisons, la confusion avec *Anabaena* est alors possible (**Nageli, 1849**).

**5.4. *Planktothrix***

**a. Description**

Organisme filamenteux, unisériel, non ramifié, constitué exclusivement de cellules végétatives et dépourvu de gaine mucilagineuse. Trichomes en général rectilignes,

solitaires munis de nombreuses pseudovacuoles. Cellules de forme cylindrique et plutôt courtes ; diamètre en général compris entre 3.5 et 10  $\mu\text{m}$  (limites du genre L : 2-6  $\mu\text{m}$  x 1 : 2.2-11.5  $\mu\text{m}$ ). Distinction des espèces parfois difficile, en fonction de la couleur, du diamètre, du degré de constriction entre les cellules, de la forme de la cellule apicale et de son apex.

### b. Écologie

*Planktothrix*, typiquement planctonique, est souvent cité dans des milieux assez riches du point de vue trophique (**Anagnostidis & Komarek, 1988**).

## 6. Les toxines de cyanobactéries

La présence de toxines a été rapportée dans pratiquement toutes les régions où les Cyanobactéries ont été étudiées, faisant de la cyanotoxicose un problème d'envergure mondiale. Les toxines de cyanobactéries sont généralement classées selon leur mode d'action : les hépatotoxines (foie), les neurotoxines (système nerveux) et les dermatotoxines (peau). Elles peuvent également être catégorisées selon leur structure chimique (microcystines, cylindrospermopsines, anatoxines, saxitoxines, etc.) ou selon leur type de molécules (alkaloides, lipopolysaccharides, polycétides et peptides). Les cyanotoxines sont principalement libérées à l'extérieur de la cellule lors de la sénescence et de la lyse cellulaire. La lyse cellulaire peut entre autre être causée par les attaques virales (cyanophages ou cyanovirus naturellement présents en milieux aquatique, ou les algicides (**Suttle, 2000**)). Les cyanotoxines les plus communes appartiennent au groupe des microcystines (MC). Ces peptides cycliques sont principalement produits par les genres *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Nostoc*, *Microcystis*, *Oscillatoria* et *Nodularia*, les trois derniers étant les plus toxiques (**Haider et al., 2003**). Le potentiel d'une souche de cyanobactéries à être toxique dépend principalement du fait qu'elle possède le gène de production de toxines.

### 6.1. Les hépatotoxines

Ce sont les toxines de cyanobactéries qui sont le plus fréquemment rencontrées lors de proliférations. Elles sont impliquées dans de nombreux épisodes d'intoxication. Chez les vertébrés, l'organe cible est essentiellement le foie, où elles

provoquent d'importantes lésions *via* l'inactivation des protéines phosphatases 1, 2A et 3 (Sivonen and Jones, 1999). Induisant lors d'intoxications aiguës une dégénérescence du cytosquelette des hépatocytes, une lyse cellulaire et la mort des individus intoxiqués par hémorragie hépatique (Nishiwaki-Matsushima *et al.*, 1992 ; Humpage *et al.*, 2000). D'autres organes tels que les reins ou les intestins peuvent être également altérés. Les microcystines sont également des agents promoteurs de tumeurs hépatiques.

### 6.1.1. Les microcystines (MCs)

Jusqu'à les années 2012, près de 80 variantes de Microcystines (MC) ont été identifiées (Dietrich, et Hoeger, 2005). Il est important de signaler que leur structure chimique variable présente des différences de solubilité dans l'eau ce qui peut conduire à des variations dans les organes cibles, le métabolisme et la bioaccumulation (Craig, *et al.*, 1993 ; Gupta *et al.*, 2003). La MC-LR, qui présente une toxicité élevée sur souris, est la toxine la plus fréquemment détectée dans les écosystèmes. Elle est de ce fait la plus étudiée et la mieux connue. Peu de données sont disponibles sur les autres variantes de la microcystine.

#### ▪ Mécanismes de la toxicité

Les MCs se lient à des protéines phosphatases à sérine/thréonine, essentiellement les PP1 et PP2A, en établissant des liaisons covalentes dans le cytoplasme entre leur résidu Mdha (N-methyldihydroalanine) et les cystéines 273 et 226 des sous-unités catalytiques de ces enzymes (Mc kintosh *et al.*, 1990; Runnegar *et al.*, 1995; Bagu *et al.*, 1997).

L'inhibition de ces enzymes entraîne une modification de l'état de phosphorylation de nombreuses protéines. Il en résulte des effets divers et en particulier :

- une perte de l'intégrité du cytosquelette (altération du micro filaments, des filaments intermédiaires et des microtubules), et en conséquence une nécrose ;
- une apoptose des hépatocytes mais aussi des cellules glomérulaires et tubulaires proximales (Eriksson *et al.*, 1990 ; Eriksson *et al.*, 1992 ; Khan *et al.*, 1996 ; Mc Dermott *et al.*, 1998 ; Fisher & Dietrich, 2000 ; Fischer *et al.*, 2000 ; Hooser, 2000 ; Lankoff *et al.*, 2003). Cette atteinte des hépatocytes conduit à une hémorragie hépatique importante pouvant entraîner la mort (Dawson, 1998).

### 6.1.2. Les nodularines (Nod)

Neuf nodularines ont été isolées à ce jour (Codd *et al.*, 2005) et la plus étudiée est la nodularine R. La molécule qui contient une valine à la place de l'arginine est connue sous le nom de motuporine et a été isolée d'une éponge de Papouasie-Nouvelle-Guinée (Silva *et al.*, 1992). La toxicité de la nodularine présente des similitudes avec celle des MCs.

#### ▪ Mécanismes de la toxicité

Les études de toxicité ont été menées principalement sur la nodularine-R. Comme les MCs, la nodularine agit en inhibant des phosphatases à sérine/thréonine (PP1 et PP2A essentiellement), même si les potentialités d'inhibition sont différentes (Yoshizawa *et al.*, 1990). À la différence des MCs, la toxine n'établit pas de liaison covalente avec les phosphatases (Goldberg *et al.*, 1995 ; Bagu *et al.*, 1997).

### 6.1.3. La cylindrospermopsine (CYN) et ses analogues

La cylindrospermopsine (C<sub>15</sub>H<sub>21</sub>N<sub>5</sub>O<sub>7</sub>S) est un alcaloïde possède une unité guanidine cyclique. Elle est synthétisée par *Cylindrospermopsis raciborskii* qui apparaît souvent dans les eaux tropicales (Hawkins *et al.*, 1985). La cylindrospermopsine est un alcaloïde agissant principalement sur le foie via l'inhibition de la synthèse protéique (Terao *et al.*, 1994 ; Hawkins *et al.*, 1997).

D'autres organes sont également atteints tels que les reins, les poumons, les intestins et le thymus. Cette toxine est également un agent mutagène connu.

#### ▪ Mécanismes de la toxicité

La cylindrospermopsine provoque une inhibition irréversible de la synthèse protéique en interagissant avec les ARN de transfert. La partie uracile de la toxine serait en partie responsable de sa toxicité, par inhibition compétitive au niveau d'un site catalytique.

## 6.2. Les neurotoxines

Les neurotoxines produites par les cyanobactéries sont regroupées en deux familles :

-les anatoxines

-la saxitoxine et ses dérivés

Leur cible est la jonction neuro-musculaire avec un mode d'action spécifique à chacune des familles de neurotoxines. Elles sont essentiellement produites par les genres planctoniques *Anabaena* et *Aphanizomenon*, mais également le genre benthique *Phormidium*.

### **6.2.1. Les anatoxines**

Les anatoxines sont des alcaloïdes synthétisés uniquement par des cyanobactéries. L'anatoxine-a est une amine secondaire de 165 Da. C'est un agent dépolarisant post-synaptique de la jonction neuromusculaire entraînant une paralysie musculaire menant à la mort par arrêt respiratoire chez les mammifères (**Falconer, 1998**). Son homologue, l'homoanatoxine-a (179 Da), possède des propriétés physico-chimiques et toxicologiques très voisines. Leur toxicité sur souris exprimée en DL50 i. p. est de 200 à 250 µg kg<sup>-1</sup> (**Sivonen and Jones, 1999**).

L'anatoxine-a(s) est un ester phosphate d'une N-hydroxyguanine cyclique de 252 Da.

C'est une toxine inhibitrice de l'acétylcholinestérase. Elle induit une hyperactivité des neurones post-synaptiques et donc une paralysie musculaire conduisant à la mort par arrêt respiratoire. Sa toxicité sur souris exprimée en DL50 à 24 h en i. p. est de 20 µg kg<sup>-1</sup> (**Sivonen and Jones, 1999**).

#### ▪ **Mécanismes de la toxicité**

Les anatoxines, dont la cible est la jonction neuromusculaire, provoquent la paralysie des muscles striés squelettiques dont les muscles respiratoires. La mort survient par arrêt respiratoire en quelques minutes à quelques heures. L'anatoxine-a, l'anatoxine-a(s) et l'homoanatoxine ont cependant des modes d'action différents.

L'anatoxine-a est un agoniste nicotinique à acétylcholine des jonctions nerveuses et neuromusculaires. Cette liaison provoque une dépolarisation locale qui ouvre les canaux Ca<sup>2+</sup> et Na<sup>+</sup> voltage dépendant. Suite à une dépolarisation extrême, la transmission électrique est bloquée.

L'anatoxine-a(s) est un inhibiteur irréversible de l'acétylcholinestérase. Elle présente un mécanisme d'action similaire à celui des insecticides organophosphorés.

L'hyper salivation est l'un des nombreux symptômes rapportés lors d'intoxications animales. Cette salivation est à l'origine du (s) ajouté au nom de la toxine.

### 6.2.2. Les saxitoxines et leurs dérivés

Les saxitoxines et leurs dérivés ont été plus largement étudiés dans le domaine, marin où elles sont responsables de l'IPFM (Intoxication Paralysante par les Fruits de Mer). Elles sont connues sous l'acronyme PSP pour « paralytique shellfish poisons ».

Les données toxicologiques disponibles proviennent donc majoritairement des études menées dans ce cadre, la saxitoxine, qui est la plus toxique, est la mieux connue.

#### ▪ Mécanismes de la toxicité

Les saxitoxines (STX) et leurs dérivés ont une action pharmacologique similaire à la tétródotoxine (TTX) en agissant par blocage de la transmission nerveuse par liaison avec le site 1 des canaux Na<sup>+</sup> voltage dépendant, qui traversent la membrane plasmique de nombreuses cellules excitables (nerfs, fibres de muscles squelettiques et la plupart des fibres musculaires cardiaques). Lorsqu'une dépolarisation appropriée de la membrane cellulaire a lieu, le canal change de conformation et permet ainsi le passage du sodium du milieu extracellulaire vers l'intérieur de la cellule. La repolarisation s'effectue par transport inverse des ions K<sup>+</sup>.

Les saxitoxines et leurs dérivés bloquent les canaux sodium sans affecter les canaux potassium, provoquant un ralentissement ou l'abolition de la propagation du potentiel d'action. Tous les analogues sont considérés occuper le même site du récepteur mais les affinités diffèrent largement selon les structures des toxines et les isoformes des canaux (Shimizu, 2000).

### 6.2.3. La β-N-méthylamino-L-alanine ou BMAA

La β-N-méthylamino-L-alanine est une molécule de type acide aminé non impliquée dans la synthèse ribosomale de protéine. La BMAA est une neurotoxine qui provoque une excitation des neurones et qui serait à l'origine de maladies neurodégénératives (sclérose amyotrophique latérale, Alzheimer, Parkinson) (Spencer *et al.*, 1986, 1987).

### 6.3. Les dermatotoxines

La lyngbyatoxine A, les aplysiatoxines et la debromoaplysiatoxine sont des alcaloïdes, responsables de cas de fortes irritations cutanées et d'inflammations gastro-intestinales et dont la présence n'a été démontrée à ce jour que dans les eaux de mer (**Mynderse et al., 1977**). La lyngbyatoxine A a par ailleurs une structure similaire à la téléocidine A produite par un actinomycètes (*Streptomyces*) qui est un agent potentiel de promotion tumorale (**Fugiki et al., 1984**). Aplysiatoxines et debromoaplysiatoxine sont également de potentiels agents promoteurs de tumeurs et des activateurs de protéines kinase C (**Fugiki et al., 1990 ; Mynderse et al., 1977**).

### 6.4. Les lipopolysaccharides

Les lipopolysaccharides (LPS) sont des endotoxines constitutives de la paroi cellulaire de cyanobactéries ou d'autres bactéries Gram négatives. Elles sont constituées d'un sucre et d'un lipide. C'est ce dernier qui est responsable de réactions allergiques et toxiques chez les animaux et les humains et à l'origine d'irritations cutanées (**Sivonen and Jones, 1999**).

### 6.5. Voies de biosynthèse des cyanotoxines

Les voies de biosynthèse des cyanotoxines passent par la voie non ribosomale et font intervenir des complexes enzymatiques multifonctionnels. La partie du génome codant pour les microcystines a d'abord été décrite chez *Microcystis aeruginosa* K-139 et PCC 7806 (**Nishizawa et al., 1999**) puis chez *Planktothrix agardhii* CYA 126 (**Christiansen et al., 2003**) et *Anabaena* sp. 90 (**Rouhiainen et al., 2004**).

Le cluster de gènes codant pour les nodularines a été décrit chez *Nodularia spumigena* NSOR10 (**Moffitt and Neilan, 2004**) et récemment pour la cylindrospermopsine chez *Cylindrospermopsis raciborskii* AWT205 (**Mihali et al., 2008**).

Les microcystines sont codées par un groupe de 9 à 10 gènes d'une taille totale de 55 kb. Des différences sont notables entre les genres *Anabaena*, *Microcystis* et *Planktothrix* comme la présence et l'ordre des gènes, ainsi que l'orientation et nombre d'opérons. Par ailleurs, les similarités de séquence entre espèces sont assez faibles (67



à 81 % d'homologie de séquence entre *Anabaena* sp. 90 et *Planktothrix agardhii* CYA 126 et 69 à 79 % entre *Anabaena* sp. 90 et *Microcystis aeruginosa* PCC 7806).

### 7. Les effets indésirables des proliférations de cyanobactéries

Les effets de ces proliférations, quand elles sont massives, sont multiples :

#### 7.1. Sur l'environnement et le cadre de vie

- modification de l'aspect de la ressource par une coloration inhabituelle (bleue, rouge ou verte), des irisations en surface et/ou des masses d'écume se déplaçant au gré des vents ;
- nuisance olfactive lors de la décomposition de la prolifération.
- l'eutrophisation des rivières et des lacs qui se traduit par une modification de la transparence et de la coloration des eaux due à la prolifération d'algues est de plus en plus préoccupante du fait de multiples problèmes liés à la toxicité potentielle de certaines espèces phytoplanctoniques (**Carmichael & Falconer, 1993**).

#### 7.2. Impact sur les organismes vivants

- perturbation de la biodiversité de l'écosystème aquatique ;
- perturbation des réseaux trophiques aquatiques car les cyanobactéries sont peu ou pas consommées par le zooplancton et leur prolifération s'effectue le plus souvent au détriment du développement des autres microorganismes photosynthétiques (compétition pour les nutriments et la lumière) ;
- mortalités de poissons, par intoxication ou diminution de la teneur en oxygène de l'eau,
- mortalités d'oiseaux, par intoxication directe ou *via* leur alimentation (mollusques, poissons,...),
- intoxication d'animaux domestiques ou sauvages par abreuvement à proximité d'écumes toxiques (**Briand et al., 2003**).

#### 7.3. Impact sur l'équilibre écologique

Les blooms à cyanobactéries ont provoqué de grands dégâts pour les animaux, dans les milieux naturels et dans les bassins d'aquaculture, conduisant à d'importantes pertes économiques. D'après la littérature plus de 80 incidents liés à la toxicité de cyanobactéries signalées depuis 1878 dans les cinq continents du monde. Ces

intoxications animales atteignent surtout le bétail, les moutons, les chiens, les oiseaux et les poissons (Codd *et al.*, 1989 ; Henriksen *et al.*, 1997 ; Zimba *et al.*, 2001) Les neurotoxines et les hépatotoxines favorisent l'apparition de tumeurs chez les animaux (Carmichael & Falconer, 1993).

Les effets néfastes des cyanobactéries se manifestent également sur la croissance, le développement et la reproduction de plusieurs espèces de zooplancton et de crustacés (Vansconcelos, 1999).

Les hépatotoxines, libérées dans le milieu suite à la lyse cellulaire, peuvent s'accumuler et inhiber l'activité photosynthétique des plantes supérieures aquatiques (Codd *et al.*, 1989).

Les cyanotoxines engendrent des perturbations nettes dans le développement embryonnaire des alevins de poissons et provoquent même des troubles physiologiques notamment cardiaques chez certains poissons, comme la truite (Best *et al.*, 2001).

Enfin, les cyanobactéries ont un large spectre d'activités contre plusieurs espèces de bactéries comme *E. coli*. D'autres espèces de cyanobactéries au contraire, favorisent le développement de certaines bactéries pathogènes. C'est le cas de *Synechocystis* qui stimule la croissance de *Vibrio cholerae* (Mezrioui *et al.*, 1994).

#### 7.4. Sur la santé humaine (la santé publique)

Les cyanobactéries ont causé la mort de plusieurs animaux à travers le monde (par ex., chiens, chats, vaches et moutons), Les lipopolysaccharides produits par les cyanobactéries peuvent également être des irritants cutanés et peuvent provoquer des réactions allergiques (Sivonen & Jones, 1999). Ces patients étaient traités à une clinique dont les appareils d'hémodialyse étaient alimentés par une eau contaminée en microcystines (Carmichael, 2001).

**Tableau 3 : Exemples d'intoxications animales liées aux toxines de cyanobactéries (Chorus and Bartram, 1999).**

| Cyanobactéries   | Animaux dé c é d é s  | Toxicité/toxines  | Pays   |
|--|---|---|--|
| <i>Microcystis aeruginosa</i>  | Bétail<br>Bétail<br>Moutons<br>Chiens<br><br>Truites<br>Bétail,<br>Rhinocéros<br>blanc<br><br>Canards | Hépatotoxicité/MC<br>Hépatotoxicité<br>Hépatotoxicité<br>Hépatotoxicité/MC<br><br>Hépatotoxicité/MC<br>Hépatotoxicité/MC<br><br>Hépatotoxicité/MC | Argentine<br>Norvège<br>Australie<br>Angleterre et<br>France<br><br>Ecosse<br>Afrique<br><br>Japon |
| <i>Anabaena circinalis</i><br><i>Anabaena flos-aq u a e</i>            | Bétail, Moutons<br>Chiens,<br>Cochons,<br>Canards<br>Bétail<br>Oiseaux<br>aquatiques                  | Neurotoxicité/SAX<br>Neurotoxicité/ANTX-a<br><br>Neurotoxicité/ANTX-a<br>Neurotoxicité/ANTX-a   | Australie<br>Etas-Unis<br><br>Canada<br>Canada   |
| <i>Oscillatoria sp.</i>  | Chiens  | Neurotoxicité/ANTX-a  | Ecosse,<br>Irlande   |
| <i>Planktothrix agardhii</i>   | Oiseaux<br>aquatiques,<br>Poissons et Rats<br>musqués   | Hépatotoxicité  | Finlande   |
| <i>Nodularia spumigena</i>   | Chiens, Bétail<br><br>Chiens<br>Moutons, Bétail   | Hépatotoxicité/Nodulari<br>nes<br><br>Hépatotoxicité<br>Hépatotoxicité/Nodulari<br>nes  | Finlande,<br>Norvège,<br>Suède,<br>Afrique,<br>Allemagne<br>Australie                              |
| <i>Phormidium favosum</i><br><i>Cylindrospermopsis<br/>raciborskii</i> | Chiens<br>Chiens<br>Bétail, Moutons   | Hépatotoxicité<br>Neurotoxicité/ANTX-a<br>Hépatotoxicité/CYL  | Allemagne<br>France<br>Australie   |

MC : Microcystines, SAX : Saxitoxines, ANTX-a : Anatoxine-a, CYL : Cylindrospermopsine

**Tableau 4: Exemples d'intoxications humaines liées aux toxines de cyanobactéries (Chorus and Bartram, 1999).**

|                        | <b>Cyanobactérie s /Toxines</b>        | <b>Effet</b>   | <b>Pays</b>              |
|------------------------|--|--|--------------------------|
| <b>Par ingestion</b>   | <i>Microcystis</i> sp.                 | épidémie de gastro-entérite                                | Etats Unis               |
|                        | <i>Microcystis</i> sp. Et              | nausées, diarrhées   | Canada                   |
|                        | <i>Anabaena</i>                        |  |                          |
|                        | <i>Circinalis</i>                      | épidémie de gastro-entérite                                | Zimbabwe                 |
|                        | <i>Microcystis aeruginosa</i>          | épidémie de gastro-entérite                                | Etats Unis               |
|                        | <i>Phormidium</i> sp. <i>Lyngbiasp</i> | hépatite, vomissements, diarrhées...                       | Australie                |
|                        | <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>  | maux de tête, diarrhées, vomissements                      | Grande Bretagne          |
|                        | <i>Microcystis aeruginosa</i>          | épidémie de gastro-entérite dermatite, asthme, vomissement | Suède<br>Grande Bretagne |
|                        | <i>Planktothrix aga rdhii</i>          |  | Bretagne                 |
|                        | <i>Planktothrix agardhii</i>           |  |                          |
| <b>Par hémodialyse</b> | Microcystines                          | 117 intoxications, 60                                      | Brésil                   |
|                        | <i>Microcystis aeruginosa</i> et       | morts  | Portugal                 |
|                        | <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>        | intoxications ?  |                          |

### 8. Règlementations relatives aux cyanobactéries et cyanotoxines

Au cours de ces dix dernières années, de nombreux pays à travers le monde se sont trouvés confrontés à de graves problèmes sanitaires et environnementaux liés aux proliférations ou aux accumulations excessives de cyanobactéries dans les réservoirs d'eau potable et les aires de loisirs aquatiques. En conséquence, des règles de sécurité à respecter et des niveaux d'exposition maximale ont été définis pour les cyanobactéries et les microcystines, hépatotoxines les mieux connues et les plus

fréquemment mises en évidence dans les milieux aquatiques en période de proliférations cyanobactériennes.

Actuellement, la surveillance des proliférations à cyanobactéries est réalisée grâce à des indicateurs de biomasse comme la concentration en chlorophylle *a* (Chl *a*), à des indicateurs d'abondance et aussi grâce à l'identification des espèces présentes. En effet, au niveau international, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande depuis 2003, à partir de ces paramètres, des seuils pour les eaux de baignades (Tableau 3), définis à partir de l'étude épidémiologique de Pilotto *et al.* (1997).

### **9. Moyens de lutte contre les proliférations de cyanobactéries**

Cette partie a fait l'objet d'une analyse bibliographique dressant l'état de l'art sur les moyens de lutte des perturbations induites par la présence des cyanobactéries dans les plans d'eau.

## CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

### I. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

#### 1. Localisation générale

Le lac des oiseaux est situé à 45 Km respectivement à l'Ouest et à l'Est des villes d'El Kala et d'Annaba. Il fait partie de la commune du Lac des Oiseaux, Daïra de Boutheldja, wilaya d'El Tarf (fig. 4).

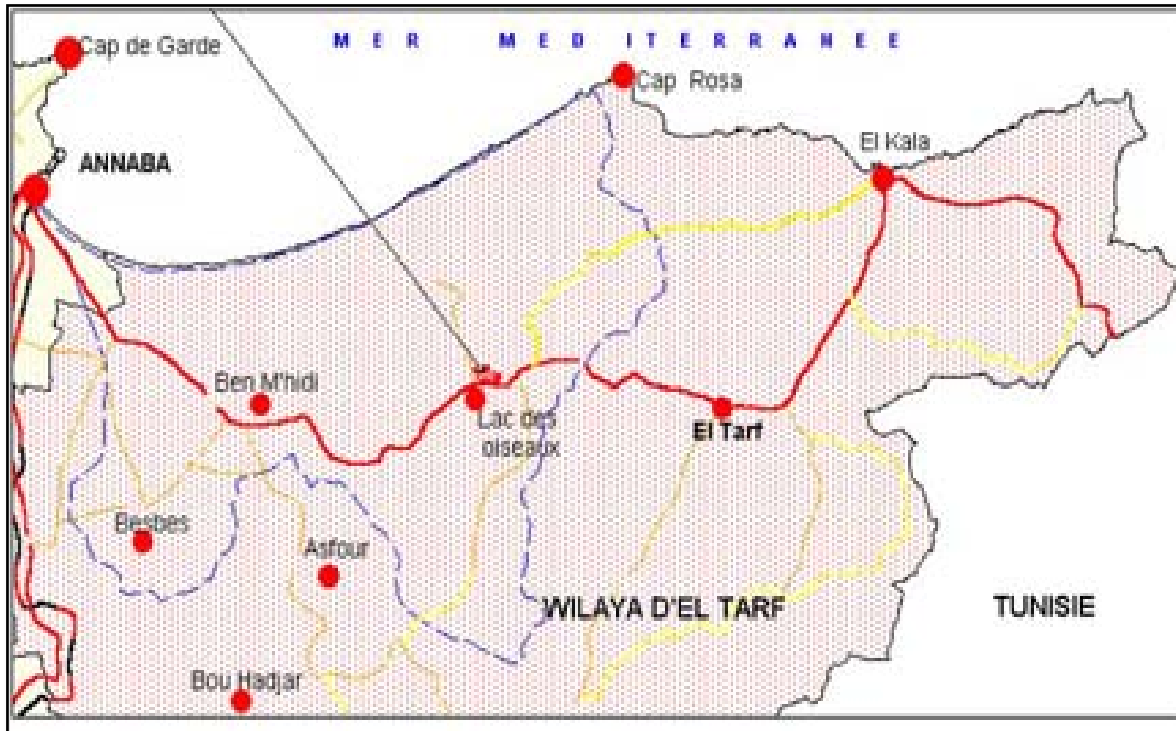


Figure 4: Situation géographique du Lac des oiseaux.

C'est un lac d'eau douce d'une superficie de 120 hectares en période hivernale et 70 en période sèche. Sa flore est très riche, pour certaines espèces végétales c'est l'unique station. Le lac des Oiseaux est, de par sa localisation au nord de la route nationale 44, un centre naturel privilégié pour l'éducation environnementale.

#### Coordonnées géographiques

Longitude : 36°42' N Latitude : 08°07' E

#### Altitude

Moyenne 10 mètres

#### Superficie

120 hectares

**1.1. Caractéristiques écologiques (faunistiques du lac)**

- **Les oiseaux d'eau :** Site de nidification pour l'Erismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*) espèce en voie de disparition sur la Liste rouge de l'IUCN, le Fuligule nyroca (*Aythya nyroca*), la Talève sultane (*Porphyrio porphyrio*), la Sarcelle marbrée (*Marmaronetta angustirostris*), espèces sont inscrites sur la Liste rouge de l'IUCN comme espèces vulnérables et le Blangios nain (*Ixobrychus minutus*).
- **Mammifères :** On note la présence de la mangouste (*Herpestes ichneumon*) et de l'hérisson (*Erinaceus algirus*).
- **Les insectes :** 23 espèces d'odonates dont 14 espèces d'Anisoptères, 9 zygoptères, soit le 1/3 des odonates signalées en Algérie. Parmi les huit espèces d'odonates d'origine afro-tropicale signalées pour la région d'El-Kala, le lac des oiseaux en compte cinq, à savoir : *Orthetrum chrysostigma*, *Acisoma panorpoides*, *Diplacodes lefebvreii*, *Brachythemis leucosticta* et *Trithemis annulata*.

**1.2. Caractéristiques physiques**

- **Hydrologie :** l'alimentation se fait naturellement par les eaux superficielles de ruissellement du bassin versant et par les eaux souterraines.
- **Géologie :** les principales formations géologiques sont représentées par les grés et les argiles de Numidie et les sols de marécages.
- **Pédologie :** il y a deux types de sols, le type 1 représenté par des sols saturés acides et des sols podzoliques. Le type 2 représenté par des sols des marais, occupant la partie centrale du lac, des sols hydromorphes et des sols de prairies marécageuses.
- **Climat :** Méditerranéen, humide en hiver, entre octobre et avril, et sec en été avec une moyenne annuelle de 640 mm/ an. Les vents dominants de Nord-Est sont assez fréquents mais faibles.
- **Valeurs Hydrologiques:** maîtrise des crues, captage des sédiments.  
**(Gherouana, 1996 ; Boumezbeur, 1993 ; Samraoui de Belair et Benyacoub, 1992 ; MC Maazi, 1991 ; Morgan, 1982 ; Blondel, 1967)**

## **2. Echantillonnage des cyanobactéries:**

Les prélèvements d'eaux brutes du lac ont été effectués mensuellement, entre Juillet 2015 et Avril 2016. Les prélèvements se font à une profondeur de 15 à 30 cm de la surface de l'eau.

En période de bloom (Juillet, Aout, Septembre, Octobre, Novembre et Décembre) 100 ml d'échantillon sont prélevés directement. Pour le reste de la période d'étude, la récolte est réalisée à l'aide d'un filet à plancton, de 20  $\mu\text{m}$  de vide de mailles, muni d'un collecteur. L'opération consiste à filtrer 50 L d'eau de surface afin de concentrer la population des Cyanobactéries (Fig 5). Les échantillons sont conservés avec du lugol.

Le transport des échantillons depuis le point de prélèvement jusqu'au laboratoire se fait dans une glacière à 4 °C, ensuite ils sont conservé à 4 °C jusqu'à utilisation.



**Figure 5: Photographie du Filet à plancton**



**Figure 6: Echantillon de cyanobactéries après filtration**



### **3. Analyses physico-chimiques**

Les méthodes analytiques utilisées sont décrites par **Rodier (1996)** et **Tardat-Henry (1984)** ou les catalogues de l'appareillage utilisé. Les méthodes utilisées sont aussi bien volumétriques, colorimétriques, spectrophotométriques que potentiométriques. Différents paramètres globaux sont ainsi mesurés tels que la température, le pH et l'oxygène dissous et quelques polluants : nitrates et orthophosphates.

#### **3.1. Mesure des paramètres physicochimiques :**

Les mesures des paramètres physicochimiques : température, pH et oxygène dissout ont été réalisées *in situ* à l'aide d'un «multi paramètres à 6 paramètres C535T» de terrain.

#### **3.2. Dosage des éléments nutritifs**

Une bouteille d'eau de 1,5 L est remplie d'eau de surface et conservée à 4°C pendant le transport.

Les paramètres de pollutions, nitrate et orthophosphates, sont mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre.

##### **3.2.1. Dosage des Orthophosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ )**

###### **a. Principe**

Selon **Rodier en 1978**, en milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue susceptible d'un dosage spectrométrique.

Certaines formes organiques pouvant être hydrolysées au cours de l'établissement de la coloration et donner des orthophosphates, le développement de la coloration est accélérée par l'utilisation d'un catalyseur, le tartrate double d'antimoine et de potassium.

###### **b. Réactifs : voir annexe 1.**

###### **c. Établissement de la courbe d'étalonnage**

On introduit dans chaque fiole 1 ml de solution d'acide ascorbique, on agite bien puis on ajoute 4 ml de réactif, après on mélange soigneusement, et on complète éventuellement le volume à 25 ml.

Après la stabilisation de la coloration (30 minutes), on effectue les mesures au spectromètre à la longueur d'onde de 700 ou 800 nm en cuve de 1 cm. Enfin on construit la courbe d'étalonnage.

| Numéro des fioles                           | T  | I     | II    | III   | IV    | V     |
|---|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Solution étalon de phosphore à 1 mg/L (ml)  | 0  | 1     | 5     | 10    | 15    | 20    |
| Eau distillée (ml)                          | 20 | 19    | 15    | 10    | 5     | 0     |
| Correspondance en milligrammes de phosphore | 0  | 0,001 | 0,005 | 0,010 | 0,015 | 0,020 |

### d. Mode opératoire

- Vérifier le pH de l'échantillon qui doit être compris entre 2 et 7, l'ajuster si nécessaire.
- Introduire 20 ml d'eau dans une fiole jaugée de 25 ml ;
- Ajouter 1 ml de solution d'acide ascorbique puis poursuivre comme pour l'établissement de la courbe d'étalonnage ;
- Tenir compte de la valeur lue pour le témoin ;
- Se reporter à la courbe d'étalonnage.

### e. Expression des résultats

La courbe donne la teneur en phosphore, exprimée en milligrammes pour la prise d'essai.

## 3.2.2. Dosage des Nitrates

### a. Principe

Selon **Rodier en 1978**, en présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique.

### b. Réactifs : annexe 2.

### c. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Dans une série de capsules de 60 ml, on introduit successivement :

| Numéro des capsules                         | T  | I   | II | III | IV |
|---|----|-----|----|-----|----|
| Solution étalon d'azote nitrique à 0,005g/l | 0  | 1   | 2  | 5   | 10 |
| Eau distillée (ml)                          | 10 | 9   | 8  | 5   | 0  |
| Correspondance en mg/L d'azote nitrique     | 0  | 0,5 | 1  | 2,5 | 5  |
| Solution de salicylate de sodium (ml)       | 1  | 1   | 1  | 1   | 1  |

Puis on évapore à sec au bain-marie ou dans une étuve portée à 75-80 °C. on les Laisse refroidir. On Reprend le résidu par 2 ml d'acide sulfurique concentré ayant soin de l'humecter complètement. Après 10 minutes,on ajoute 15 ml d'eau distillée puis 15 ml de solution d'hydroxyde de sodium et de tartrate double qui développe la couleur jaune. Ensuite, on Effectue les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 420 nm afin de Soustraire des densités optiques lues pour les étalons, la valeur relevée pour le témoin. Enfin, on construit la courbe d'étalonnage.

### d. Mode opératoire

- Introduire 10 ml d'eau dans une capsule de 60 ml.
- Alcaliniser faiblement avec la solution d'hydroxyde de sodium.
- Ajouter 1ml de solution de salicylate de sodium puis poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage.
- Préparer de la même façon un témoin avec 10 ml d'eau distillée.
- Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 415 nm et tenir compte de la valeur lue pour le témoin.
- Se reporter à la courbe d'étalonnage.

### e. Expression des résultats

Pour une prise d'essai de 10 ml, la courbe donne directement la teneur en azote nitrique exprimée en milligrammes par litre d'eau. Pour obtenir la teneur en nitrate ( $\text{NO}_3$ ), multiplier ce résultat par 4,43.

## 4. Identification et le dénombrement des Cyanobactéries

### 4.1. Identification

La détermination des genres de chaque récolte est réalisée à partir de l'observation des caractères morphologiques selon les clés d'identification universellement admises (**Komarek et Anagnostidis, 2008, 2005; Komarek, 2013**). L'observation est réalisée sous microscope à caméra, au Grossissement x10 et x40, cette opération est répétée 5 fois pour chaque échantillon.

Les critères retenus sont :

- La structure et la couleur des cyanobactéries (coloniale ou filamenteuse).

- La forme (sphérique, cubique, amorphe, régulière, étirée, clathrée, droite, coudée, Spiralee...),
- L'organisation du thalle (filamenteux, colonial, cellule isolé).
- La taille des cellules
- La présence ou l'absence de : gaine gélatineuse (couleur, aspect et taille), akinètes, hétérocystes, vacuoles à gaz (pseudovacuoles).

#### **4.2.Dénombrement :**

La numération des Cyanoprocaryotes a été réalisée après observation au microscope, d'un volume d'échantillon homogénéisé monté entre lame et lamelle de comptage spéciale, cellule de Malassez.

Lorsque la suspension cellulaire est trop concentrée, il est nécessaire de réaliser une dilution préalable.

La cellule de Malassez possède un quadrillage spécifique comportant 100 rectangles :

Parmi les 100 rectangles totaux, on trouve 25 rectangles qui sont divisés en 20 petits carrés afin de faciliter le comptage.

→ le volume correspondant au quadrillage total est égal à  $1 \text{ mm}^3 = 10^{-6} \text{ dm}^3$

→ Chaque rectangle correspond à un volume 100 fois plus faible, soit  $0,01 \text{ mm}^3 = 10^{-8} \text{ dm}^3$

Le compter les cellules se fait dans 4, 10, 20 ou dans la totalité des 100 rectangles du quadrillage.

#### **o Calcul de la concentration cellulaire**

Après avoir effectué la manipulation, on calcule la concentration cellulaire de la suspension de cellules étudiée.

Soient : -n : nombre de cellules comptées.

-V : volume de comptage.

-f : facteur de dilution.

-N : nombre de cellules par litres.

Si on a n cellules dans V litres, alors on a N cellules dans un litre :

$$N \times V = n \times 1$$

$$N = n / V$$

Si la solution avait été diluée :  $N = (n / V) \times f$

**4.3.Traitement des données**

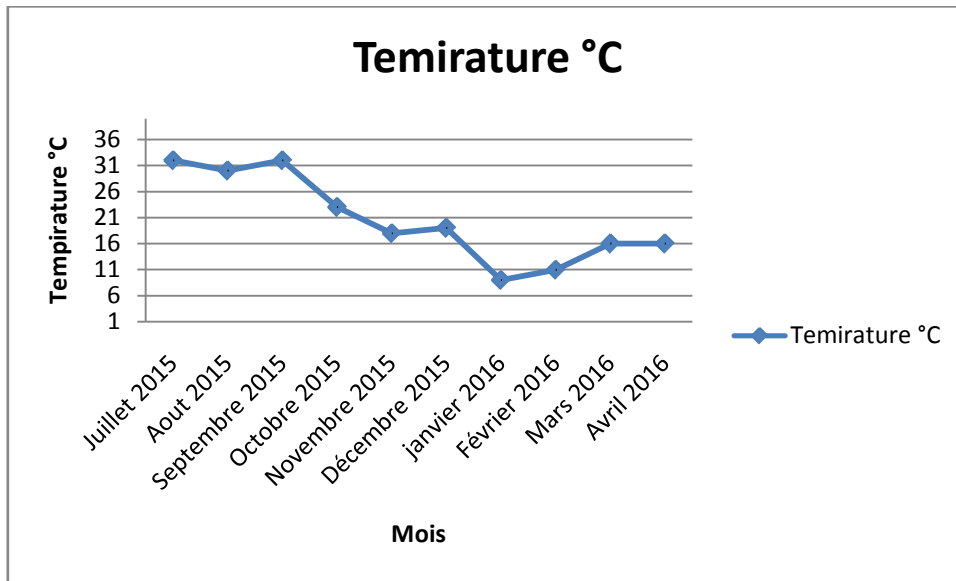
Les résultats obtenus sont exprimé sur un tableau excel. Le test de corrélation est utilisé pour calculer les corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques et biologiques.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux du Lac des oiseaux 2015/2016

Les différentes analyses physico-chimiques ont été effectuées durant la période d'Juillet 2015 à Avril 2016, au niveau du Lac des oiseaux.

a) Température

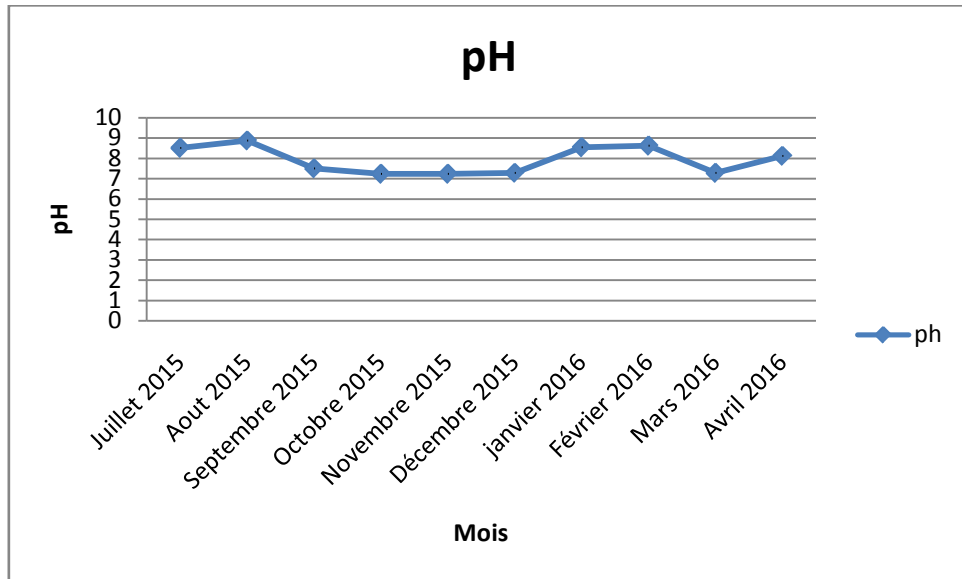


**Fig. 07 : Variation spatiotemporelle de la température dans le Lac des Oiseaux pendant la période d'étude.**

La figure 07 présente la variation temporelle de la température dans le Lac des oiseaux pendant toute la période d'étude (de juillet 2015 à Avril 2016). Nous avons constaté que les températures les plus élevées ont été mesurées aux mois Juillet 2015 et Septembre 2015 où la température est 32°C. Cependant les températures les plus faibles ont été enregistrées au mois de Janvier (9 °C).

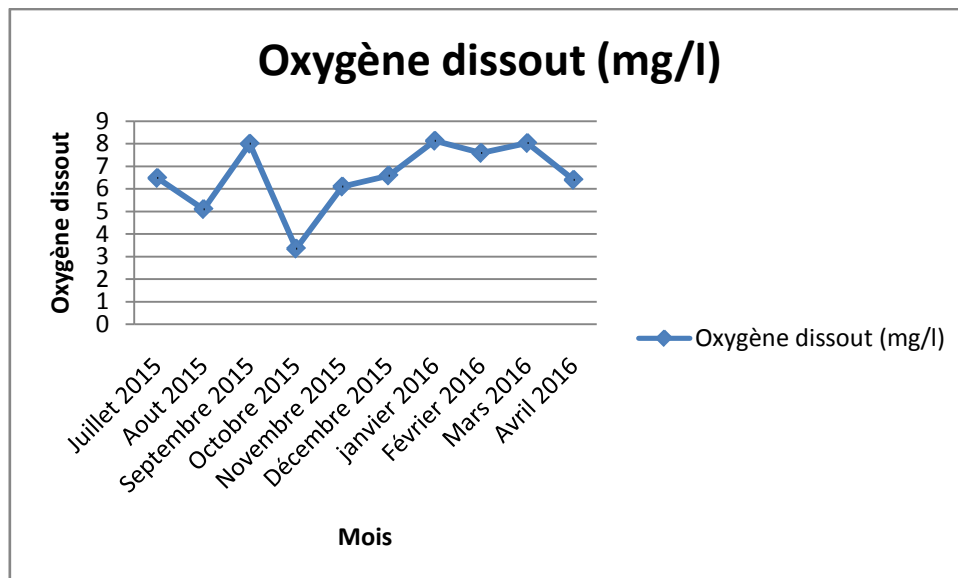
b) pH

La figure 08 présente la variation temporelle du pH du milieu dans le Lac des oiseaux durant la période d'étude. Selon le graphe ci-dessus, nous avons constaté que les valeurs du pH les plus élevées sont observées au mois de Juillet et Aout 2015 et de Janvier et Février 2016 où le pH varie entre 8,51 et 8,88. Cependant les valeurs les plus faibles sont obtenues au mois d'Octobre et Novembre 2015 où le pH est de 7,23 Mais les variations en fonction du temps restent vraiment minimales.



**Fig. 08: Variation spatiotemporelle du pH dans le Lac des oiseaux pendant la période d'étude.**

**c) Oxygène dissout**

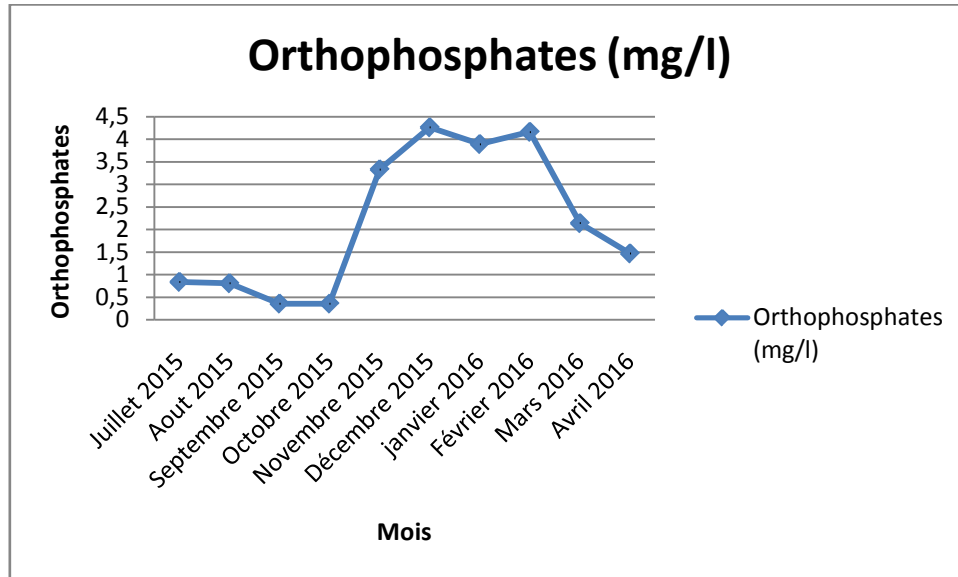


**Fig. 09 : Variation spatiotemporelle de la teneur en oxygène dissout dans le Lac des oiseaux pendant la période d'étude.**

La figure 09 montre que les concentrations en oxygène dissout présentent des variations. En effet, nous avons constaté que les concentrations en oxygène dissout les plus élevées étaient au mois de Janvier et Mars (varient entre 8,03 et 8,13 mg/l) ; Cependant les concentrations les plus faibles en oxygène dissout ont été mesurées au mois d'Octobre.

**d) des Orthophosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ )**

Les résultats pour les Orthophosphates des eaux du Lac des oiseaux sont présentés dans la Figure 10, pour la période expérimentale allant d'juillet 2015 à avril 2016.



**Fig. 10 : Variation spatiotemporelle de la concentration des Orthophosphates au niveau du Lac des oiseaux.**

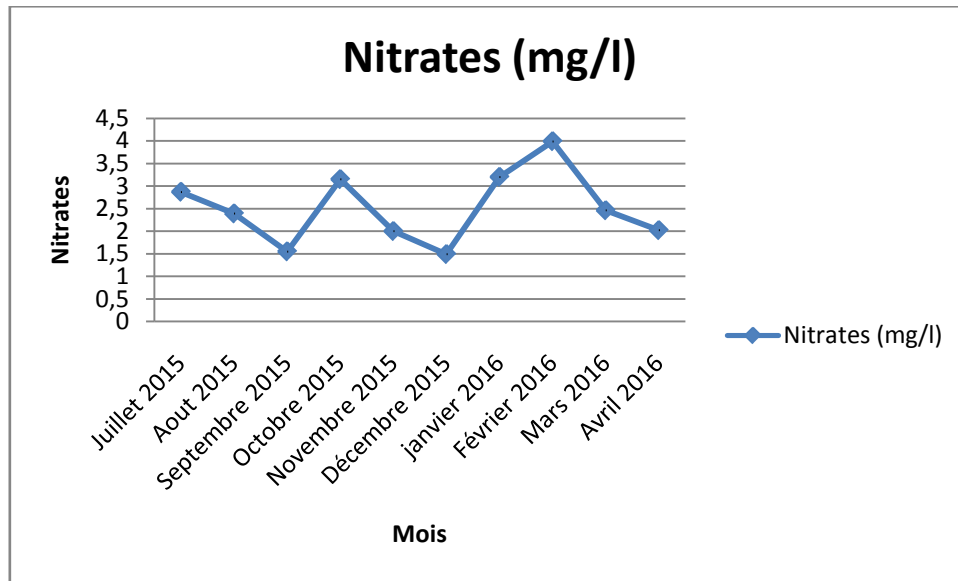
La figure 10 présente les variations temporelles des concentrations des Orthophosphates durant la période s'étendant de juillet 2015 à Avril 2016. D'après le graphe nous observons une forte augmentation de la concentration des Orthophosphates au mois de Décembre, Janvier et Février 4,26 mg/l et une faible concentration pendant les mois Juillet, Aout, Septembre et Octobre 0,36 mg/l.

**e) des Nitrates :**

Les résultats des dosages des nitrates des échantillons d'eau prélevés dans le Lac des oiseaux, depuis juillet 2015 à avril 2016 sont présentés dans la Figure 11 .

La figure 11 présente les variations temporelles des concentrations des nitrates de juillet 2015 à Avril 2016 au niveau du Lac des oiseaux. Selon le graphe ci-dessus, on a obtenu une forte concentration durant le mois de Février (3,99 mg/l). En revanche les concentrations les plus faibles sont observées pendant les mois Septembre et Décembre (1,49 mg/l).





**Fig. 11 : Variation spatiotemporelle de la concentration des nitrates au niveau du Lac des oiseaux.**

## 2. Identification et comptage des Cyanobactéries au niveau du lac des oiseaux

### 2.1. Par la méthode classique (LAME ET LAMELLE)

- **Identification et distribution des cyanobactéries au lac des oiseaux**

Des prélèvements ont été effectués chaque mois durant la période de Juillet 2015 à Novembre 2015 avec une conservation par lugole et des prélèvements ont été effectués chaque mois durant la période de Décembre 2015 à Avril 2016 au niveau d'une station du lac "des oiseaux". Après observation au microscope optique à caméra des échantillons prélevés, nous avons pu identifier selon la clé de détermination de (Komarek and Anagnostidis, 2008, 2005; Komarek, 2013 ; Rodier, 1978) Cinq (05) genres de cyanobactéries potentiellement toxiques, sur les 40 genres répertoriés comme toxiques à travers le monde (Bourrelly, 1985) (Tableau 5).

- Le genre: *Microcystis* est de forme cellulaire et se présente en colonies (ou en amas).
- Les genres : *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Pseudanabaena*, *Limnothrix* sont de formes filamenteuses ou trichomes (Voir photos).

L'identification a été basée sur des critères morphologiques tels que :

- La forme des cellules (largeur, longueur, filamenteuse, coloniale) ;

- Leurs enveloppes mucilagineuses ;
- Coloration, pigmentation ;
- -La présence ou non de structures cellulaires caractéristiques « akinètes, hétérocystes et vacuoles gazeuses ».

**Tableau 5 : Distribution générique mensuelle des Cyanobactéries potentiellement toxiques au niveau du Lac des oiseaux durant la période d’ Juillet 2015 à Avril 2016.**

| Date    | Genre   | Nbr | Date    | Genre                                   | Nbr |
|---------|---|-----|---------|---|-----|
| Juillet | <i>Microcystis</i>  | 01  | Dec     | <i>Microcystis</i><br><i>Limnothrix</i> | 02  |
| Aout    | <i>Microcystis</i><br><i>Limnothrix</i><br><i>Anabaenopsis</i><br><i>Anabaena</i>                         | 04  | Janvier | <i>Microcystis</i><br><i>Limnothrix</i> | 02  |
| Sept    | <i>Microcystis</i><br><i>Anabaenopsis</i><br><i>Pseudanabaena</i>   | 03  | Février | <i>Microcystis</i><br><i>Limnothrix</i> | 02  |
| Octo    | <i>Microcystis</i><br><i>Limnothrix</i><br><i>Anabaenopsis</i><br><i>Anabaena</i><br><i>Pseudanabaena</i> | 05  | Mars    | <i>Microcystis</i>                      | 01  |
| Nov     | <i>Microcystis</i><br><i>Limnothrix</i><br><i>Anabaenopsis</i><br><i>Pseudanabaena</i>                    | 04  | Avril   | <i>Microcystis</i>                      | 01  |

D’après le tableau n°5 on peut voir que la fréquence la plus élevée est au mois d’octobre avec la présence de cinq 05genres qui sont : ***Microcystis*, *Limnothrix*, *Anabaenopsis*, *Anabaena*, *Pseudanabaena***. En revanche la fréquence la plus faible est enregistrée au mois de Janvier, Mars et Avril Avec un 01genre qui est : ***Microcystis***

La figure n° 12 nous montre la distribution des cyanobactéries (genres rencontrés) dans chaque prélèvement au cours de la période d’étude (juillet 2015 à avril 2016).

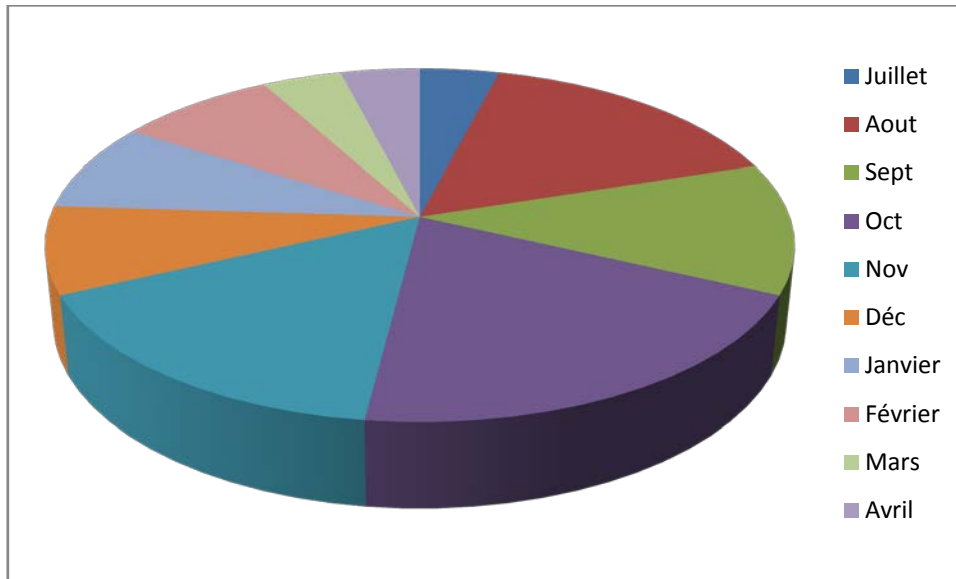


Fig. 12 : Distribution des Cyanobactéries au lac des oiseaux (Lame /lamelle)

a) Le genre *Microcystis*

Les cellules sphériques de diamètre du 0,8 à 10  $\mu\text{m}$ , munies de pseudovacuoles, sans disposition particulière au sein de la colonie. Elles sont réparties plus ou moins régulièrement dans toute la gelée. Les colonies ont des formes très variées, à mucilage incolore.



Fig. 13 : Photographie du genre *Microcystis*.

Une dizaine d'espèces en Europe, se différenciant par la taille des cellules, leur espacement, la forme de la colonie, l'importance et la consistance du mucilage...

Parmi les espèces les plus fréquentes: *Microcystis aeruginosa* , *M. flos-aquae*, *M. viridis* , *M. wesenbergii*,.... (*Mutzing ex Lemmermann, 1907*)

#### b) Le genre *limnothrix*

Organisme filamenteux, unisériel, fin, non ramifié et sans gaine mucilagineuse, constitué seulement de cellules végétatives.

Trichomes solitaires, droits ou flexueux. Cellules cylindriques nettement plus longues que larges (L : 2-16  $\mu\text{m}$  x l : 1.3-2.3  $\mu\text{m}$ ). Pas de constriction au niveau des cloisons. Pseudovacuoles groupées en aérotopes situés à des endroits précis comme aux pôles des cellules et/ou en leur centre.

Parmi les espèces les plus fréquentes, *limnothrix pseudospirulina*, *limnothrix hypolimnica*... (*meffert, 1988*)

#### b.1) L'espèce *limnothrix pseudospirulina*



**Fig. 14: Photographie du genre *limnothrix pseudospirulina*.**

b.2) L'espèce *limnothrix hypolimnica*



Fig. 15: Photographie du genre *limnothrix hypolimnica*.

c) Le genre *Anabaena*

Organisme filamenteux, unisériel, non ramifié et sans gaine mucilagineuse. Trichomes solitaires, droits, enroulés ou spiralés. Cellules sphériques, en forme de tonneau ou cylindriques. La plupart du temps, constriction marquée au niveau des cloisons.

Dimensions cellulaires : L : 1-33  $\mu\text{m}$  x l : 2-15  $\mu\text{m}$ , le plus souvent le diamètre compris entre 5 et 10  $\mu\text{m}$ .



Fig. 16 : Photographie du genre *Anabaena*.

Les principaux critères d'identification sont : la forme des trichomes (droits, spiralés...), la présence ou l'absence de pseudovacuoles, la position relative des hétérocytes et akinètes, les dimensions cellulaires...

Parmi les espèces les plus fréquentes : *Anabaena flos-aquae*, *A. solitaria*, *A. spiroides*... (*bory de saint vincent, ex bornet & flahault, 1886*).

#### d) Le genre *Anabaenopsis*

Organisme filamenteux, unisérié, non ramifié et sans gaine mucilagineuse. Trichomes enroulés à spiralés le plus souvent, rarement très longs. Cellules globuleuses, subsphériques jusqu'à cylindriques (L : 1-33  $\mu\text{m}$  x l : 4.6-9  $\mu\text{m}$ ), avec des pseudovacuoles.

Constriction très marquée au niveau des cloisons. Hétérocytes toujours terminaux, parfois aussi en une paire dans la région médiane du trichome. Akinètes toujours intercalaires, parfois associés en paire.

Ce genre peut être confondu avec *Anabaena* lorsque les trichomes de ce genre sont fragmentés et qu'ils présentent un hétérocyte à l'une de leurs extrémités (*Woloszynska miller, 1923*).



**Fig. 17 : Photographie du genre *Anabaenopsis*.**

**e) Le genre *Pseudanabaena***

Filaments flottant librement, dont on trouve quelques espèces réunies en faisceau microscopique (jusqu'à 2 cm de long) avec des colonies trichomes; trichomes droites, légèrement courbées, cylindrique ou conique fortement ou en permanence à l'extrémités et toujours sans gaines fermes (Bornet & Flahault, 1886).

Cellules cylindriques (L : 2-12.3  $\mu\text{m}$  x l : 1-3.5  $\mu\text{m}$ ) ; constriction au niveau des cloisons, présence parfois d'un pont hyalin entre les cellules (*lauterborn, 1915*).



**Fig. 18 : Photographie du genre *Pseudanabaena*.**

**3. Dénombrement des cyanobactéries au lac des oiseaux**

La numération des Cyanobactéries été réalisée après observation au microscope optique à caméra, d'un volume d'échantillon 0,1 ml homogénéisé monté entre lame et lamelle de Cellule de Malassez qui possède un quadrillage spécifique en choisir 10 quoidrants pour le dénombrement.

**Calcul de la moyenne des densités de chaque prélèvement**

**a) Les mois de Juillet à Décembre 2015**

Selon la formule suivante:  $M.D = X \cdot 10^5$  (Individu/L)

**Tableau 6 : Variation des moyennes des densités de chaque prélèvement des mois de Juillet à Décembre 2015 des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux.**

| Date    | Genre                | M.D     |
|---------|----------------------|---------|
| Juillet | <i>Microcystis</i>   | 2110000 |
| Aout    | <i>Microcystis</i>   | 2750000 |
|         | <i>Limnothrix</i>    | 200000  |
|         | <i>Anabaenopsis</i>  | 200000  |
|         | <i>Anabaena</i>      | 200000  |
| Sept    | <i>Microcystis</i>   | 1090000 |
|         | <i>Anabaenopsis</i>  | 100000  |
|         | <i>Pseudanabaena</i> | 100000  |
| Octo    | <i>Microcystis</i>   | 1280000 |
|         | <i>Limnothrix</i>    | 300000  |
|         | <i>Anabaenopsis</i>  | 100000  |
|         | <i>Anabaena</i>      | 100000  |
|         | <i>Pseudanabaena</i> | 100000  |
| Nov     | <i>Microcystis</i>   | 660000  |
|         | <i>Limnothrix</i>    | 200000  |
|         | <i>Anabaenopsis</i>  | 100000  |
|         | <i>Pseudanabaena</i> | 200000  |
| Dec     | <i>Microcystis</i>   | 410000  |
|         | <i>Limnothrix</i>    | 200000  |

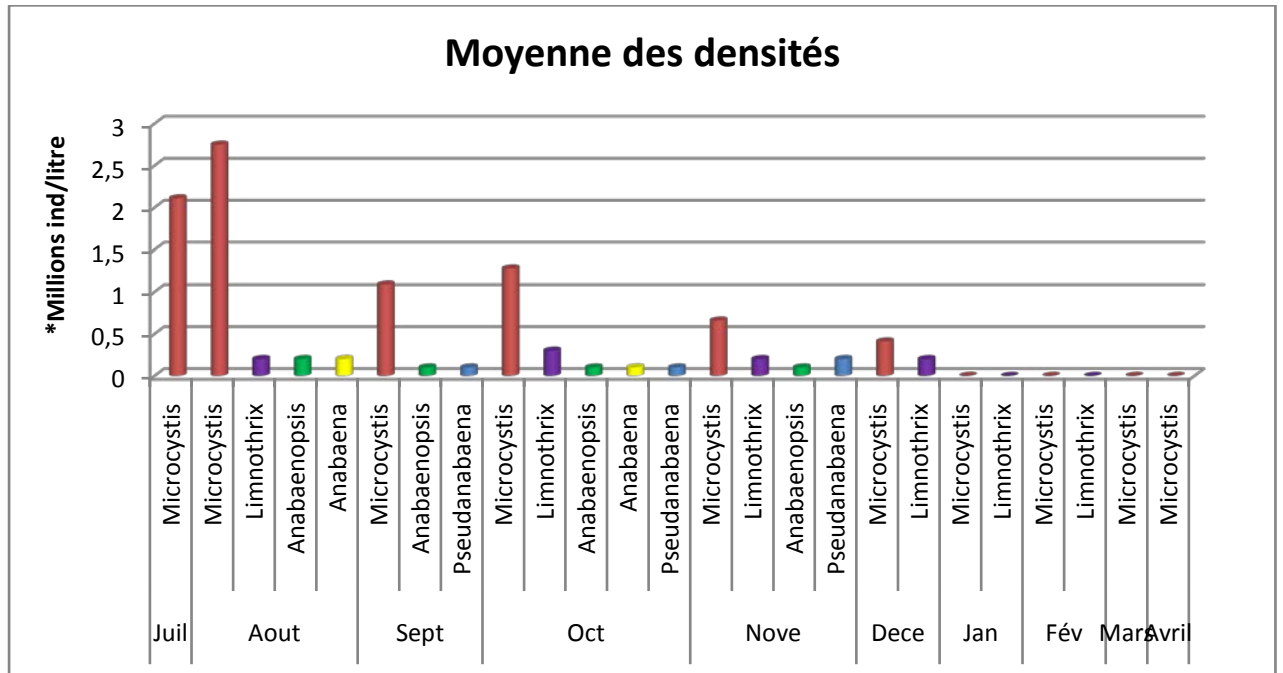
**b) Les mois de Janvier à Avril 2016**

Selon la formule suivante:  $M.D = X.10^3 / 5$  (Individu/L)

**Tableau 7 : Variation des moyennes des densités de chaque prélèvement des mois de Janvier à Avril 2016 des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux.**

| Date    | Genre              | M.D |
|---------|--------------------|-----|
| Janvier | <i>Microcystis</i> | 960 |
|         | <i>Limnothrix</i>  | 200 |
| Février | <i>Microcystis</i> | 540 |
|         | <i>Limnothrix</i>  | 200 |
| Mars    | <i>Microcystis</i> | 720 |
| Avril   | <i>Microcystis</i> | 600 |





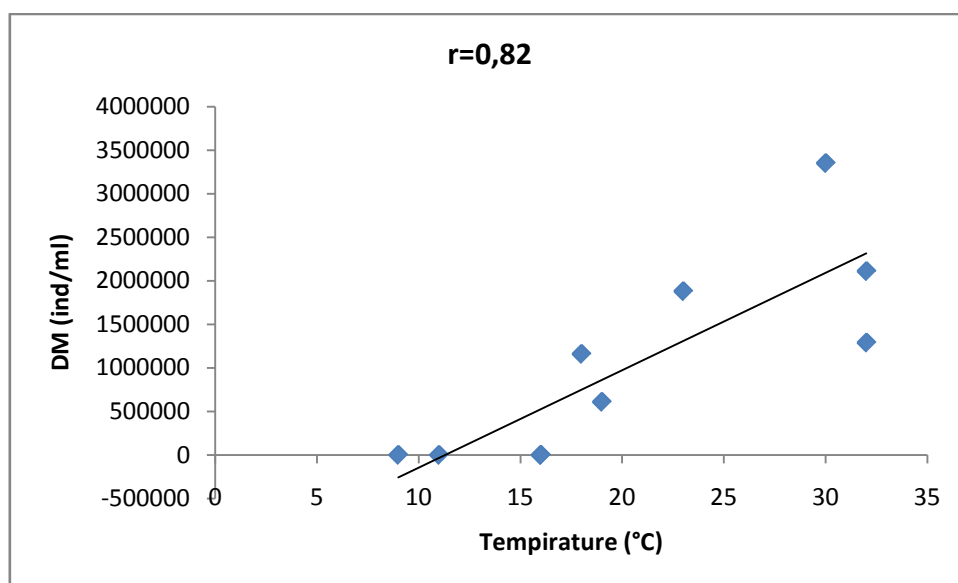
**Fig. 19 : Variation des moyennes des densités mensuelles des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux**

#### 4. Etudes statistiques

##### 4.1. Analyse de la corrélation entre les paramètres physico-chimiques et les moyennes des densités des Cyanobactéries

###### a) Température

Le coefficient de corrélation  $r=0,82$ , positive alors il ya une corrélation entre la température et la densité moyenne des cyanobactéries.



**Fig. 20: La corrélation entre la température et la densité moyenne des**

Cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux

b) pH

Selon la figure 21 nous constatons une corrélation positive entre le pH et la densité moyenne des cyanobactéries( $r=0,20$ )

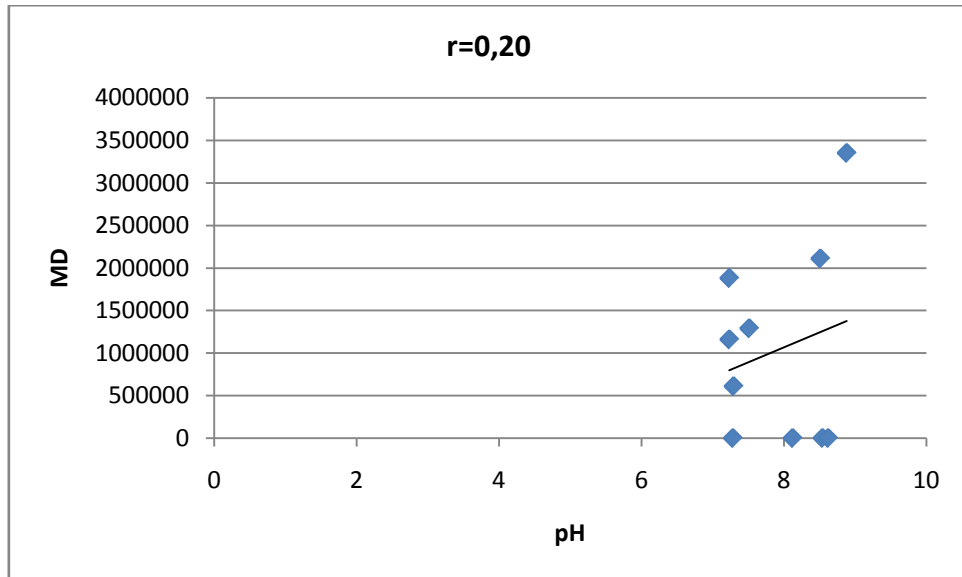


Fig. 21: La corrélation entre le pH et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux

c) Oxygène dissout

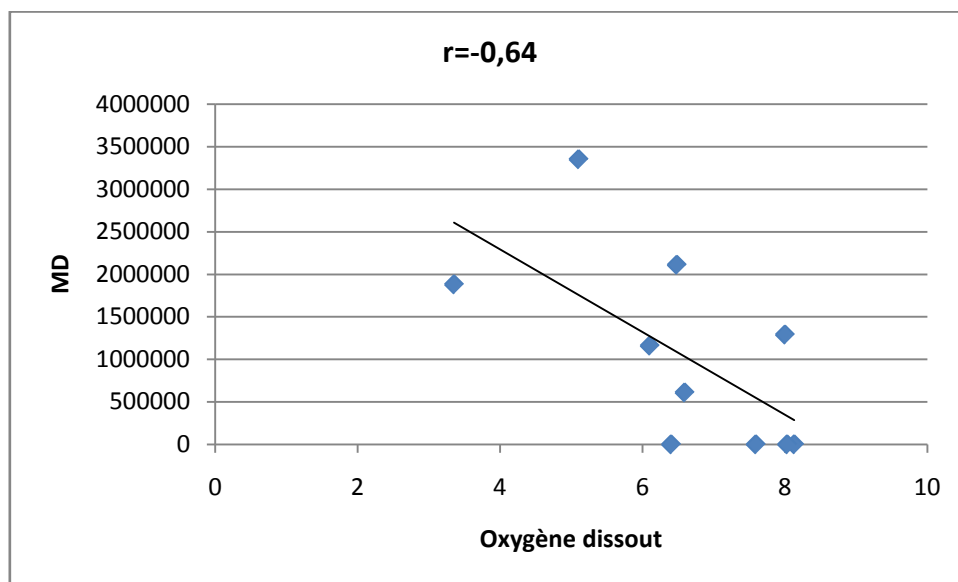
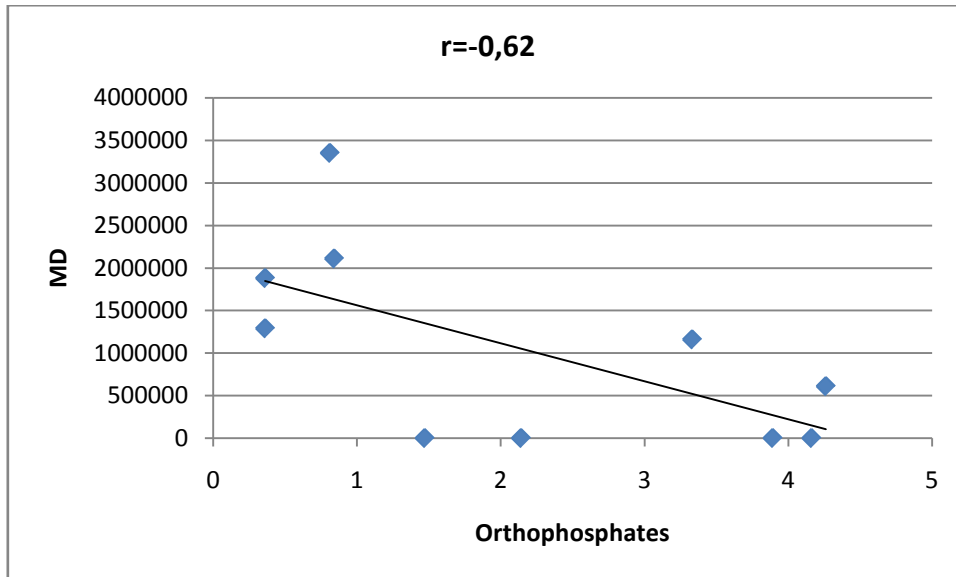


Fig. 22 : La corrélation entre l’oxygène dissout et la densité moyenne des Cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux.

Selon la figure 22 on observe qu’il n’ya pas une corrélation entre l’oxygène dissout et la densité moyenne des cyanobactéries.

**d) des Orthophosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ )**

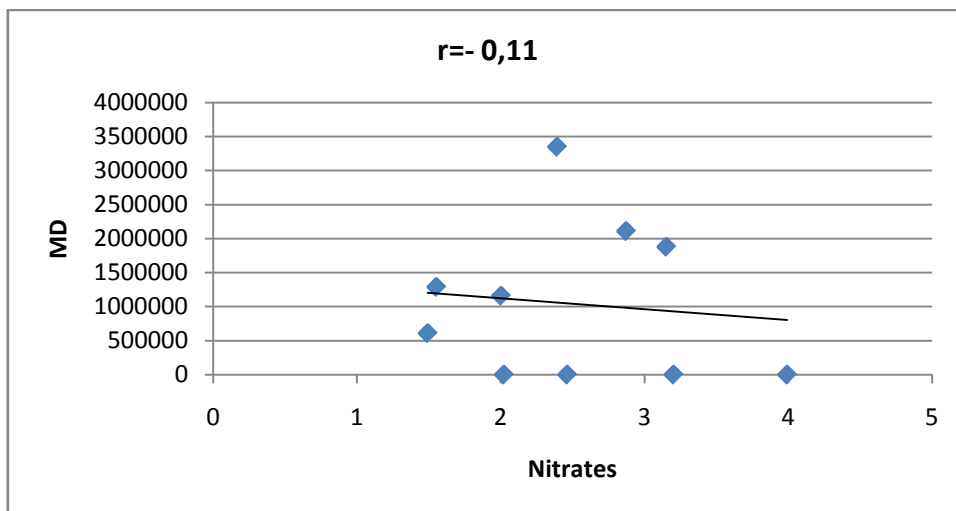
Le coefficient de corrélation  $r=-0,62$ , négative alors il n'y a une corrélation entre l'orthophosphate et la densité moyenne des cyanobactéries.



**Fig. 23 : La corrélation entre l'Orthophosphate et la densité moyenne des Cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux.**

**e) des Nitrates :**

Le coefficient de corrélation  $r=-0,11$ , négative alors il n'y a une corrélation entre les nitrates et la densité moyenne des cyanobactéries.



**Fig. 24 : La corrélation entre le nitrate et la densité moyenne des cyanobactéries toxiques dans le Lac des oiseaux.**

**Tableau 8 : Coefficient de corrélation entre les paramètres physico-chimique de l'eau et la densité des cyanobactéries toxiques :**

| <b>paramètres</b>                 | <b>pH</b>   | <b>T°</b>   | <b>Oxygène dissout</b> | <b>nitrate</b> | <b>phosphore</b> |
|-----------------------------------|-------------|-------------|------------------------|----------------|------------------|
| <b>Densité</b>                    |             |             |                        |                |                  |
|                                   | <b>r</b>    | <b>r</b>    | <b>r</b>               | <b>r</b>       | <b>r</b>         |
| <b>Coefficient de corrélation</b> | <b>0,80</b> | <b>0,82</b> | <b>-0,64</b>           | <b>-0,11</b>   | <b>-0,62</b>     |

A travers le tableau ci dessus on remarque, qu'il ni ya pas de corrélation significative entre la densité des Cyanobactéries et les paramètres physico-chimiques de l'eau (Oxygène dissout, Nitrate et Phosphore) par contre il y a une corrélation positive avec la T° et pH.

## **DISCUSSION**

La prolifération de ces fleurs d'eau est favorisée par certains facteurs environnementaux à savoir une température élevée de l'eau (entre 15°C et 30°C), pH alcalin (entre 6 et 9) (**Carmichael et al., 1990**), le taux des nutriments, en particulier le phosphore, le nitrate et l'ammoniaque (**Chorus & Bartram, 1999; Duy et al., 2000**) et une bonne oxygénation de l'eau (**Skulberg et al., 1984**).

En ce qui concerne l'étude des paramètres physico-chimiques, biologique et leur impact sur la densité phytoplanctonique on peut dire que l'étude des paramètres physicochimiques des eaux évoluant au cours du temps, constitue une étape préliminaire indispensable pour une meilleure compréhension des variations de la distribution du phytoplancton d'une manière générale. En effet, dans les écosystèmes lacustres, les successions saisonnières phytoplanctoniques sont la réponse à la combinaison des variabilités des environnements physique, chimique et biologique, (**Amblard, 1987 ; Ben Rejeb Jenhani et al., 1991**).

La dynamique temporelle des différents genres de Cyanobactéries et du Phytoplancton dans le lac des oiseaux diffère à travers les saisons qui se distinguent par leurs conditions environnementales (température, pH, oxygène dissout et la concentration en nitrates).

L'analyse des principaux paramètres physico-chimiques de l'eau du lac des oiseaux révèle que les valeurs maximales de température des eaux sont enregistrées durant le mois de juillet (32°C).

Nos données sont confortées par les résultats de certains auteurs qui rapportent que les Cyanopocaryotes prolifèrent dans une eau dont la température est comprise entre 15 et 30°C (**Skulberg et al. 1984, Carmichael et al 1990, Nasri 1999 ,Menail 2000 , Matmed 2000 , Bensdira 2000 , Boualleg & Kouachi 2001 , Amissi & Yahiaoui, 2001 , Nasri, 2001 , Boulesnane & Chaibi 2002, Gouasmia 2003, Chaibi 2004, Bensafia 2005, Manamani 2007 Ghazali et al. 2008, Nasri et al. 2007 et Ouarts et al. 2011**).

Les valeurs du pH de l'eau du lac des oiseaux sont comprises entre 7,23 et 8,88. Par ailleurs, **Brock (1973)** rapporte qu'un pH du milieu inférieur à 5 est défavorable croissance des cyanobactéries. Nos données concordent avec celles rapportées par les divers auteurs qui ont réalisé des études dans les divers plans d'eau de l'Algérie (**Nasri 1999, Menail 2000 (lac Oubéira) et Bensdira 2000, Aissani 2003 (barrage de Hammam Dbagh), Boualleg & Kouachi 2001, Gouasmia 2003 et Manamani 2007 et Ghazali et al. 2008 (barrage de Ain El Dalia), Ouarts et al. 2011(barrage Mexa El Taref)**), ces auteurs rapportent des valeurs de pH comprises entre 6 et 9.

**Pearl en 1997; Sellner en 1997; Wasmund en 1997 et Hennion en 1999** ont constaté que les cyanobactéries se caractérisent par une croissance massive dans une eau plutôt basique à Ph compris entre 8 et 11 et à un pourcentage de saturation en oxygène dissout élevé, ainsi qu'une forte concentration en nitrates. En effet, nos résultats ont indiqué que la prolifération des différents genres de Cyanobactéries et du Phytoplancton dans le lac des oiseaux a été favorisée par un taux d'oxygène dissout assez élevé et par de fortes concentrations en nitrates, par contre la teneur en pH n'as pas influencé cette dernière, ce qui à été confirmé par l'analyse de la corrélation.

Les valeurs maximales de l'oxygène dissous sont enregistrées durant le mois de janvier. Selon **Skulberg et al. (1984), Carmichael (1990)** qu'une bonne oxygénation de l'eau favorise une prolifération des cyanobactéries.

En effet, nos résultats ont montré que la prolifération la plus importante de ces genres était observée pendant l'automne suivi par l'été où les conditions ont été favorables à leur développement. Ceci concorde avec les résultats de **Bouaïcha en 2002** qui a affirmé que la période de développement massif des Cyanobactéries est souvent l'été et le début d'automne. Cependant on remarque que la densité des Cyanobactéries a diminué pendant l'hiver et le printemps. ce qui ne peut être expliqué que par des conditions environnementales défavorables à savoir les faibles températures (7 – 10 °C), ce qui a été d'ailleurs confirmé par **Chevalier et al., en 2001**, qui a estimé qu'il y a eu une chute de température en hiver, ce qui semble provoquer la mort des cyanobactéries dont la température optimale de croissance est plutôt comprise entre 20°C et 25°C.

Les variations temporelles des concentrations des Orthophosphates durant notre période d'étude sont marquées par une forte augmentation de la concentration au mois de Décembre 4,26 mg/l et Février, et une faible concentration pendant le mois d'octobre 0,36 mg/l .

Les teneurs maximales, en nitrates, relevées dans le lac des oiseaux sont nettement inférieures à la valeur guide fixée à 5 mg/l pour une eau de qualité excellente par l'agence algérienne des bassins versants (1999); ceci atteste donc de la bonne qualité de l'eau du lac.

**Selon Karr en 1991**, la connaissance de la composition taxonomique des peuplements constitue une source d'informations nécessaire. En effet, la composition taxonomique des communautés phytoplanctoniques permet d'établir de véritables outils de diagnose et d'évaluation de pollution, comme les indices diatomiques (**Descy & Coste, 1990**)

L'identification générique des Cyanobactéries au niveau du Lac des oiseaux à décelé l'existence de 05 genres parmi lesquels *Microcystis* et *limnothrix* représentent la quasi-totalité, et selon **Nasri en 2001**, cela est dû essentiellement à la capacité de chaque genre à s'adapter aux différentes conditions environnementales. Ce qui explique les différences qui peuvent apparaître dans la dynamique temporelle des Cyanobactéries sous différentes latitudes et régions du monde.

Ce qui suggère l'intervention d'autres facteurs encore mal cernés comme, l'ensoleillement de l'eau et la quantité de nutriment sont reconnus pour avoir une influence sur la diversité des espèces rencontrées et leur prolifération. En revanche, les changements climatiques responsables du réchauffement planétaires pourraient également favoriser la croissance des cyanobactéries observées sur tous les continents, bien que ce lien reste pour le moment hypothétique.

## CONCLUSION

La prolifération des cyanobactéries est un phénomène naturel qui existe depuis des milliards d'années. Notre étude, réalisée sur ce site de choix « lac des oiseaux », a le mérite de cerner la présence des espèces de cyanobactéries, potentiellement toxiques et de déterminer les principaux facteurs abiotiques responsables de leur répartition

Il ressort de cette étude :

- L'inventaire de 5 genres de Cyanophycées toxiques.
- Que le calcul des densités globales des genres recensés fait apparaître la dominance du genre *Microcystis* ce dernier est suivi *Limnothrix*.
- Que la plupart des genres prolifèrent durant l'été et l'automne, parmi ces genres toxiques *Microcystis* est omniprésent toutes les saisons.

Les teneurs élevées en phosphates déversées dans les plans d'eau accélèrent l'eutrophisation et il est communément acquis que le phosphore est le facteur limitant le développement des cyanobactéries. Mais ce ne sont pas les seules cibles responsables de ce fléau. Il est probable que les fleurs d'eau deviennent plus fréquentes sous un climat plus chaud (**John et al., 2008; Hunter, 2003**). Des espèces produisant des microcystines telles que *Microcystis aeruginosa* kütz ont une croissance optimale à des températures élevées (entre 30 et 35 °c) et une plus grande dominance dans l'environnement aquatique en période estivale et automnale.

Les blooms de cyanobactéries toxiques sont devenus actuellement un problème d'environnement et de santé publique. La production des toxines et l'exposition des individus pour une longue durée peuvent provoquer des effets sévères pour la santé et surtout hépatiques et cancéreuses (**Carmichael, 1994; Zegura et al., 2003**). Les effets de ces proliférations quand elles sont massives sont multiples et affectent l'environnement et le cadre de vie et rend la gestion de l'eau de plus en plus difficile.



Des études ultérieures devraient permettre une approche plus précise des interactions existantes entre les cyanobactéries et l'impact des paramètres physicochimiques. L'évolution saisonnière rapide des communautés planctoniques en réponse aux changements environnementaux renforce l'intérêt de leur suivi écologique en raison de l'importance de la gestion des ressources hydriques pour le pays.

## LES REFIRANCES

- Allen, M.M. and Hutchison, F.** (1980) Nitrogen limitation and recovery in the cyanobacterium *Aphanocapsa* 6308. *Archives of Microbiology* **128**: p: 1–7 ; **Kolodny, N.H., Bauer, D., Bryce, K., Klucevsek, K., Lane, A., Medeiros, L., Mercer, W., Moin, S., Park, D., Petersen, J., Wright, J., Yuen, C., Wolfson, A.J. and Allen, M.M.** (2006) Effect of nitrogen source on cyanophycin synthesis in *Synechocystis* sp. Strain PCC 6308. *Journal of Bacteriology* **188**: p: 934-940.
- Anagnostidis, K. and Komarek, J.** (1985) Modern approach to the classification system of cyanophytes 1-Introduction. *Algological Studies* **38/39**: p: 291-302 ; **Anagnostidis, K. and Komarek, J.** (1988) Modern approach to the classification system of cyanophytes 3-Oscillatoriales. *Algological Studies* **50/53**: p: 327-472 ; **Anagnostidis, K. and Komarek, J.** (1990) Modern approach to the classification system of cyanophytes 5-Stigonematales. *Algological Studies* **59**: p: 1-73 ; **Komarek, J. and Anagnostidis, K.** (1986) Modern approach to the classification system of cyanophytes 2-Chroococcales. *Algological Studies* **43**: p: 157-226 ; **Komarek, J. and Anagnostidis, K.** (1989) Modern approach to the classification system of cyanophytes 2-Nostocales. *Algological Studies* **56**: p: 247-345 ; **Komarek, J. and Anagnostidis, K.** (1998) Cyanoprokaryota. 1. Teil Chroococcales. In G., Gärtner, H., Heynig and D. Mollenhauer (ed.), Süßwasserflora von Milleleuropa, 19/1. Fisher, Stuttgart-Jena, Germany, p: 548 ; **Komarek, J. and Anagnostidis, K.** (2005) Cyanoprokaryota. 2. Teil Oscillatoriales. In G., Gärtner, H., Heynig and D. Mollenhauer (ed.), Süßwasserflora von Milleleuropa, 19/2. Fisher, Stuttgart-Jena, Germany, p: 759 ; **Komarek, J., Komarkova, J. and Kling, H.** (2003) Filamentous cyanobacteria, p: 117-196. In *Freshwater algae of North America*. Elsevier (ed.), USA.
- Anagnostidis & Komarek, 1988** p: 51
- Amblard C.,1987** – Les successions phytoplanctoniques en milieu lacustre. – Ann bio. XXVI: 1- 34.and ecological implications. Science, vol : 179, p : 480-483.
- MC Barron E.J. & May V., 1966.** Poisoning of sheep in New South Wales by the blue-green alga *Anacystic cyanea* (Kuetz) Dr. and Dail. Aust. Vet. J., 42, p: 449-153.
- Blondel, 1967** : Situation in the wetlands of Algeria. Proc. On wildfowl conservation 2en Noordwnijk aan zee, Netherlands 9-14 may 1962, 24.7 Slimbridge, IWRB

-**Brock, T. (1967)** Microorganisms adapted to high temperatures. *Nature* **214**: p: 882-885.

**Brient et al., 2000**

-**Botes D.P., Tuinman A. A., Wessels P.L., Viljoen C. C., Kruger, H., Williams D. H., Santikarn S., Smith R. J., & Hammond S. J., 1984.**

-**Bourrelly, P. (1985)** Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. III. Les algues bleues et rouges, les Eugléniens, Peridiniens et Cryptogmonadines. 2ème éd. Soc Nouv Ed Boubée, Paris, France, p: 606.

**3Komarek, J., Komarkova, J. and Kling, H. (2003)** Filamentous cyanobacteria, p: 117-196. *In* Freshwater algae of North America. Elsevier (ed.), USA.

-**Boumezbeura, 1993** : Ecologie et Biologie de la reproduction de l'Erismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*) et du Fuligule nyroca (*Aythya nyroca*) sur le lac Tonga et le lac des oiseaux. Doctorat EPHE Montpellier.

-**Blomqvist P., Pettersson A. & Hyenstrand P., 1994.** Ammonium-nitrogen: A key regulatory factor causing dominance of non-nitrogen-fixing cyanobacteria in aquatic systems. *Arch. Hydrobiol.*, 132 : p: 141-164

-**Best J.H., Eddy F.B. et Codd G.A., 2001** – Effects of purified Microcystin-LR and cell extracts of *Microcystis* strains PCC 7813 and CAY 43 on cardiac function in brown trout alevins. *Fish Physiology and Biochemistry*, 24 : p : 171-178.

-**Briand J.F., 2001.** Cyanobactéries toxiques : prolifération et production toxinique de deux espèces de la région parisienne, *Cylindrospermopsis raciborskii* et *Planktotrix agardhii*. Développement d'un bio-essai sur neuroblastomes pour la détection des toxines de type PSP. Thèse doctorat MNHN.

-**Brookes, J.D. et G.G. Ganf, 2001.** "Variations in the buoyancy response of *Microcystis aeruginosa* to nitrogen, phosphorus and light", *Journal of Plankton Research*, vol. 23, p: 1399- 1411.

-**Brunberg, A.K. and Blomqvist, P. (2002)** Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions. *Journal of Plankton Research* **24**:

p: 1247-1252 ; **Brunberg, A.K. and Blomqvist, P. (2003)** Recruitment of

*Microcystis* (cyanophyceae) from lake sediments: the importance of littoral inocula.

*Journal of Phycology* **39**: p : 58-63 ; **Latour, D. (2002)** Vie planctonique et vie

benthique de la Cyanobactérie *Microcystis aeruginosa* sur la retenue de Grangent (Loire). PhD thesis, Université de Saint Etienne.

- Briand J.-F., Jacquet S., Bernard C. & Humbert J.F., 2003.** Health hazards for terrestrial vertebrates from toxic cyanobacteria in surface water ecosystems. *Vet. Res.* 34, p: 361-377.
- Babica, P., Blaha, L. and Marsalek, B. (2006)** Exploring the natural role of microcystins – A review of effects on photoautotrophic organisms. *Journal of Phycology* 42: p: 9-20.
- Bouaïcha N, 2002.** La ruée vers l'eau en Algérie, Maroc et Tunisie. Université Paris - Sud, UFR de Pharmacie / Laboratoire Santé Publique-Environnement. P : 1- 2.
- Brock T.D. 1973.** Lower pH limit for the existence of blue green algae : evolutionary
- Bensafia L. 2005.** Les peuplements des cyanobacteries de deux plans d'eau douce (Lac Oubeire, Tanga). Inventaire et dynamique spatio-temporelle. *Mémoire de magister en science de la mer, option : Aquaculture. Université d'Annaba. P : 31*
- Codd G.A., Bell S.G., Brooks W.P 1989.** Cyanobacterial toxins in water. *Water Science and Technology*, 4 : p: 499- 511 ; **Henriksen P., Carmichael W. W., An J. et Moestrup O., 1997** – Detection of an anatoxin a(s)– like anticholinesterase in natural blooms and cultures of Cyanobacteria / blue green algae from danish lakes and in the stomach contents of poisoned birds. *Toxicon*, 35 : p: 901-913 ; **Zimba P.V, Khoo L., Gaunt P., Carmichael W.W. et Brittain S., 2001** – Confirmation of catfish mortality from Microcystis toxins. *J. Fish. Dis.*, 24 : p: 41-47.
- Codd G.A., Bell S.G., Brooks W.P 1989.** Cyanobacterial toxins in water. *Water Science and Technology*, 4 : p: 499- 511.
- Carmichael W. W, Mahmood N. A, Hyde E. G, 1990.** Natural toxins from cyanobacteria (blue-dreen algae) In marine toxins:origin, structure and molecular pharmacology. Sherwood hall and gary Strichagtz. Eds: acs symposium, série 418, american chemical society. Washington. P: 87-106.
- Carmichael W. W, Mahmood N. A, Hyde E. G, 1990.** Natural toxins from cyanobacteria (blue-dreen algae) In marine toxins:origin, structure and molecular pharmacology. Sherwood hall and gary Strichagtz. Eds: acs symposium, série 418, american chemical society. Washington. P: 87-106 ; **Mur L.R., Skumberg O.M. & Utkilen H., 1999.** Cyanobacteria in the Environment. In : Chorus, I. et Bartram, J 1999. (Eds.). *Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public Health consequences, monitoring and management.* WHO Ed. E & FN SPON, p: 41-111 ;

**Kaebnick M. & Neilan B.A., 2001.** Ecological and molecular investigations of cyanotoxin production. *FEMS Microbiol Ecol*, 35, p: 1-9.

**-Carmichael W. W, Mahmood N. A, Hyde E. G, 1990.** Natural toxins from cyanobacteria (blue-green algae) In marine toxins:origin, structure and molecular pharmacology. Sherwood hall and gary Strichartz. Eds: ACS symposium, série 418, American chemical society. Washington. P: 87-106 ; **Mur L.R., Skumberg O.M. &**

**Utkilen H., 1999.** Cyanobacteria in the Environment. In : Chorus, I. et Bartram, J 1999. (Eds.). Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public Health consequences, monitoring and management. WHO Ed. E & FN SPON, p: 41-111.

**-Carmichael W. W. & Falconer I. R., 1993.** Diseases related to freshwater blue-green algal toxins and control measures, Dans : Falconer, I. algal toxins in seafood and drinking water, Academic Press, London. P: 187-209.

**Carmichael W.W., 1994.** The toxins of cyanobacteria. *Sci. Am.* 270, p: 78-86

**-Craig M., McCready T.L., Luu H.A., Smillie M.A., Dubord P. & Holmes C.F.B., 1993.** Identification and characterization of hydrophobic microcystins in Canadian freshwater cyanobacteria. *Toxicon* 31 (12), p: 1541-1549 ; **Gupta N., Pant S.C.,**

**Vijayaraghavan R., Rao P.V., (2003).** Comparative toxicity evaluation of cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin variants (LR, RR, YR) in mice, *Toxicology* 188, p: 285-296.

**-Carmichael W.W., 1994.** The toxins of cyanobacteria. *Sci. Am.* 270, p: 78-86 ;

**Chorus I. & Bartram J., 1999.** Toxic cyanobacteria in water : a guide to public health significance, monitoring and management. Spon, London, p: 416 ; **Pitoy, S, Jackson, MH et BJB Wood, 2000.** Problems associated with the presence of Cyanobacteria in recreational and drinking waters. *International journal of Environmental Health Research*, 10: p: 203- 218.

**-Chorus, I. and Mur, L. (1999)** Preventative measures, p: 235-273. In I. Chorus and J. Bartram (ed.), Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. E & FN Spon, London, United Kingdom.

**-Coote & Gregorich, 2000. In: Chevalier P, Pilote R, Leclerc J.M, 2001. In:** Risques à la santé publique découlant de la présence de cyanobactéries et de microcystines dans trois bassins versants du sud-ouest québécois tributaires du fleuve Saint-Laurent. Unité de recherche en santé publique (centre hospitalier de l'université Laval) et institut national de santé publique. P : 151 ; **Duy TN, Lam PKS, Shaw GR et Connell DW, 2000.** Toxicology and risk assessment of freshwater cyanobacterial

(blue-green algal) toxins in water. *Rev. Environ. Contam. Toxicology*. 163:p : 113-186.

**-Couté, A. et Bernard, C. (2001)** Les cyanobactéries toxiques, p : 21-37. *In* J.M. Frémy et P. Lassus (ed.), *Toxines d'algues dans l'alimentation*. Editions Ifremer, Plouzané, France.

**-Chevalier P., Pilote R. & Leclerc J.-M., 2001.** Risque à la santé publique découlant de la présence de cyanobactéries (algues bleues) TOXIQUES et de microcystines dans trois bassins versants du Sud-Ouest québécois tributaires du fleuve Saint-Laurent, Unité de recherche en santé publique (centre hospitalier de l'Université Laval) et Institut national de santé publique, p : 151.

**-Carmichael, W.W., 2001.** "Human fatalities from cyanobacteria: Chemical and biological evidence for cyanotoxins", *Environ. Health Perspect.*, vol. 109, p: 663-668.

**-Christiansen, G., Fastner, J., Erhard, M., Börner, T. and Dittmann, E. (2003)** Microcystin biosynthesis in *Planktothrix*: genes, evolution, and manipulation. *Journal of Bacteriology* **185**: p: 564-572.

**-Codd G.A., Lindsay J., Young F.M., Morrison L.F., Metcalf J.S., 2005.** Harmful cyanobacteria from mass mortalities to management measures. In: Huisman J., Matthijs H.C.P., Visser P.M. (eds.) *Harmful Cyanobacteria*, Springer, Netherlands. p p : 1-23.

**Crouzet & Betru. 1987.** Phosphore et processus d'eutrophisation, In : *Point sur l'épuration et le traitement des effluents* (Martin G. , coordon), Tec et Doc lavoisier . Ed., Paris, France, Vol 3, 3 .

**-Cronberg, G. et H. Annadotter, 2006.** Manual on aquatic cyanobacteria. A photo guide and a synopsis of their toxicology, International Society for the Study of Harmful Algae and the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, p: 106.

**Chevalier P., Pilote R. & Leclerc J.-M., 2001.** Risque à la santé publique découlant de la présence de cyanobactéries (algues bleues) TOXIQUES et de microcystines dans trois bassins versants du Sud-Ouest québécois tributaires du fleuve Saint-Laurent, Unité de recherche en santé publique (centre hospitalier de l'Université Laval) et Institut national de santé publique, p : 151.

**Chaibi R. 2004.** Caractéristiques physico-chimiques et évaluation du milieu trophique d'un écosystème lagunaire : Lagune El-Mallah. *Mémoire de magister en écologie animale. Université d'Annaba.*

- Dia, A. & Reynaud, P. A., 1982.** Le phytoplancton du lac de Guiers : approche qualitative et quantitative. Cah. O.R.S.T.O.M., sér., Biol., n°45, 1982 : p : 35-47.
- Dawson R.M., 1998.** The toxicology of microcystins, *Toxicon* 36: p: 953-962 ;
- Bouaïcha N., 2001.** Impact sanitaire des toxines de Cyanobactéries en milieu d'eau douce. *Revue française des laboratoires*, N° 836. P : 39-46.
- Dawson R.M., 1998.** The toxicology of microcystins, *Toxicon* 36: p : 953-962.
- Duy TN, Lam PKS, Shaw GR et Connell DW, 2000.** Toxicology and risk assessment of freshwater cyanobacterial (blue-green algal) toxins in water. *Rev. Environ. Contam. Toxicology*. 163:p : 113-186.
- Dietrich, D.R. et S.J. Hoeger, 2005.** "Guidance values for microcystin in water and cyanobacterial supplement products (blue-green algae supplements): a reasonable or misguided approach?" *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 203, p: 273-289.
- Eriksson J.E., Toivela D., Meriluto J.A.O., Karaki H., Han Y.G. & Harstshorne D., 1990 ; Eriksson J.E., Brautigam D.L., Vallee R., Olmsted J., Fujiki H. & Goldman R.D., 1992.** Cytoskeletal integrity in interphase cells requires protein phosphatase activity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89 (22), p: 11093 – 11097 ; **Khan S.A., Wickstrom M.L., Haschek W.M., Schaeffer D.J., Ghosh S. & Beasley V.R., 1996.** Microcystin-LR and kinetics of cytoskeletal reorganization in hepatocytes, kidney cells, and fibroblasts. *Nat. Toxins* 4 (5), p: 206-214 ; **Mc Dermott C.M., Nho C.W., Hoaward W. & Holton B., 1998.** The cyanobacterial toxin, Microcystin-LR, can induce apoptosis in a variety of cell types, *Toxicon* 36. p. 1981-1996.
- Me barron E. J & May V, 1966.** Poisoning of sheep in New South Wales by the blue-green algae. *Anacystis cyanea (Kutz). Aust. V et J*; 42, p: 449-456; **Fisher W.J. & Dietrich D.R., (2000).** Pathological and biochemical characterization of microcystin-induced hepatopancreas and kidney damage in carp (*Cyprinus carpio*). *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 164, p: 73–81 ; **Fischer W.J., Hitzfeld B.C., Tencalla F., Eriksson J.E., Mikhailov A. & Dietrich D.R., 2000.** Microcystin-LR toxicodynamics, induced pathology, and immunohistochemical localization in livers of blue-green algae exposed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Toxicol. Sci.* 54 (2), p: 365- 373 ;
- Hooser S.B., 2000.** Fulminant hepatocyte apoptosis in vivo following microcystin-LR

administration to rats. *Toxicol. Pathol.* 28 (5), p: 726-733 ; **Lankoff A., Banasik A., Obe G., Deperas M., Kuzminski K., Tarczynska M., Jurczak T. & Wojcik A., 2003.** Effect of microcystin-LR and cyanobacterial extract from Polish reservoir of drinking water on cell cycle progression, mitotic spindle, and apoptosis in CHO-K1 cells. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 189 (3), p : 204-213.

**Descy J.P. & Coste M., 1990.** Utilisation des diatomées benthiques pour l'évaluation de la qualité des eaux courantes. Rapport final. UNECD-NAMUR, CEMAGREF, Bordeaux CEEB. P: 112.

**-Fugiki, H., Suganuma, M., Hakii, H., Bartoloni, G., Moore, R.E., Takayama, S. and Sugimura, T. (1984)** A two-stage mouse skin carcinogenesis study of lyngbiatoxin A. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology* **108**: p: 174-176.

**-Fugiki, H., Suganuma, M., Suguri, H., Yoshizawa, S., Takagi, K., Nakayasu, M., Ojika, M., Yamada, K., Yasumoto, T., Moore, R.E. and Sugimura, T. (1990)** New tumour promoters from marine natural products, p: 232-240. *In* S., Hall and G., Strichartz (ed.), *Marine toxins, origin, structure and molecular pharmacology.*

American Chemical Society, Washington, USA ; **Mynderse, J.S., Moore, R.E., Kashiwagi, M. and Norton, T.R. (1977)** Antileukemia activity in the Oscillatoriaceae: isolation of debromoaplysiatoxin from *Lyngbya*. *Science* **196**: p: 538-540.

**-Falconer, I.R. (1998)** Algal toxins and human health, p: 53-82. *In* J., Hrubec (ed.), *The handbook of environmental chemistry, Part C: Quality and treatment of drinking water II.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.

**Falconer IR, Beresford AM & Runnegar MTC.1983.** Evidence of liver-damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa*. *Med. J. Aust.*

**-Geitler L., 1932.** Cyanophyceae. *In* Kryptogamen-Flora von Deutschland, Oesterreich und der Schweiz, ed. L. Rabenhorst, Volume 14. Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H Leipzig.

**-Gayral P., 1975.** Les algues : Morphologies, Cytologie, Reproduction, Ecologie-ed : DOIN, Paris, p : 12, 49, 52.

**-Ganf, G.G. et R.L. Oliver, 1982.** "Vertical separation of light and available nutrients as a factor causing replacement of green algae by blue-green algae in the plankton of a stratified.



- Greuter W., Barrie F.R., Burdet H.M., Chaloner W.G., Demoulin V., Hawksworth D. L., Jorgensen P.M., Nicholson D.H., Silva P.C., Trehane P. & McNeill J., 1994.** International Code of Botanical Nomenclature. Koeltz Scientific Books, Koenigstein. Regnum Vegetabile, p: 131, 389.
- Goldberg J., Huang H.B., Kwon Y.G., Greengard P., Nairn A.C. & Kuriyan J., 1995.** Threedimensional structure of the catalytic subunit of protein serine/threonine phosphatase-1. Nature 376 (6543), p: 745-753 ; **Bagu J.R., Sykes B.D., Craig M.M. & Holmes C.F., 1997.** A molecular basis for different interactions of marine toxins with protein phosphatase-1. Molecular models for bound motuporin, microcystins, okadaic acid, and calyculin A. J. Biol. Chem. 272 (8), p : 5087-5097.
- Gherouana.N, 1996:** Contribution à la cartographie et à l'écologie de la végétation aquatique du lac des oiseaux. Ingégnorat.
- Garrity, G.M., Boone, D.R. and Castenholz, R.W. (eds) (2001)** Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. 2nd. ed. Vol. 1: The Archea and the deeply branching and phototrophic bacteria. Springer Verlag.
- Grossman, A.R., D. Bhaya et Q. HE, 2001.** "Tracking the Light Environment by Cyanobacteria and the Dynamic Nature of Light Harvesting", The journal of biological chemistry, vol. 276, p. 11449-11452. Lake'', Journal of Ecology, vol. 70, p: 829-844.
- Hunter, 2003**
- Holmes R.W., 1966.** Light microscope observations on cytological manifestations of nitrate, phosphate and silicate deficiency in four marine centric diatoms. J. Phycol., 2: p : 136-140 ; **Devaux J., Lair N. & Amblard C., 1982.** Un écosystème lacustre profond : le lac Pavin. In : Problèmes d'écologie « Structure et fonctionnement des écosystèmes limniques », Lamotte & Bourliere, F. Ed. Masson Paris : p: 1-49.
- Hawkins P.R., Runnegar M.T.C., Jackson A.R.B. & Falconer I., 1985.** Severe hepatotoxicity caused by the tropical cyanobacterium (blue-green alga) *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya and Subba Raju isolated from a domestic supply reservoir. Appl. Environ. Microbiol. 50: p: 1292-1295.
- Haider S., Naithani V., Viswanathan P. N. & Kakkar P., 2003.** Cyanobacterial toxins: a growing environmental concern. Chemosphere, 52, p : 1-21.
- Hense et Beckmann 2006** Lutte aux cyanobactéries: Une armée de cellules de *résistance* dans mon lac?

**-Hennion M. C, 1999.** La chimie au service de l'environnement. Pour la Science, n° 266, décembre 1999. P : 83-84.

**-Havens K.E., James R.T., East T.L., Smith V.H., 2003.** N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution* p: 122, 379et 390.

**-John et al., 2008;**

**-Kutzing & Lemmermann, 1907** p: 48

**-Kulberg O.M., Codd G.A. & Carmichael W.W., 1984.** Toxic blue-green algal blooms in Europe : a growing problem. *Ambio* , 13: p: 244-247 ; **Carmichael W. W, Mahmood N. A, Hyde E. G, 1990.** Natural toxins from cyanobacteria (blue-green algae) In marine toxins:origin, structure and molecular pharmacology. Sherwood hall and Gary Strickland. Eds: ACS symposium, série 418, American chemical society. Washington. P: 87-106 ; **Mur L.R., Skumberg O.M. & Utkilen H., 1999.**

Cyanobacteria in the Environment. In : Chorus, I. et Bartram, J 1999. (Eds.). Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public Health consequences, monitoring and management. WHO Ed. E & FN SPON, p: 41-111.

**-Kromkamp, J. (1987)** Formation and functional significance of storage products in cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **21**: p: 457-465.

**-Komarek, J., and K. Anagnostidis. 2005.** Cyanoprokaryota 2. Oscillatoriales, p: 1-760. In B. Busch, G. Gartner, L. Krienitz, and M. Schagerl [eds.], Süßwasserflora von Mitteleuropa. Elsevier. [Freshwater Flora from Central Europe.]. Spektrum Akademischer Verlag (Germany).

**-Komarek, J., and K. Anagnostidis. 2008.** Cyanoprokaryota. 1. Teil: Chroococcales, Cyanoprokaryota. In L. Busch, L. Krienitz, G. Gartner, and M. Schagerl [eds.], Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 19/1. Gustav Fischer Verlag Jene. [Freshwater flora of Middle Europe.]. Spektrum Akademischer Verlag (Germany)

**-Komarek Jiri. 2013.** Cyanoprokaryota 3. Teil / 3rd part: Heterocytous Genera. Spektrum Akademischer Verlag (Germany).

**-Karr J.R., 1991.** Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management. *Ecol. Appl.*, 1 (1): p: 66-84.

**-Lampert W., 1987.** Laboratory studies on zooplankton-cyanobacteria interactions. *New Zeal. J. Mar. Fresh. Res.* 21 : p: 483-490 ; **Bouvy M., Pagano M. &**

- Troussellier M., 2001.** Effects of a cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) on bacteria and zooplankton communities in Ingazeira reservoir (northeast Brazil). *Aquat. Microb. Ecol.* 25 (3) : p: 215-227.
- Latour, D. and Giraudet, H. (2004)** Factors influencing the spatio-temporal distribution of benthic *Microcystis aeruginosa* colonies (Cyanobacteria) in the hypertrophic Grangent reservoir (Loire, France). *Comptes Rendus Biologies* **327**: p: 753-761 ; **Kim, B.H., Lee, W.S., Kim, Y.O., Lee, H.O. and Han, M.S. (2005)** Relationship between akinete germination and vegetative population of *Anabaena flos-aquae* (Nostocales, Cyanobacteria) in Seokchon reservoir (Seoul, Korea). *Archiv für Hydrobiologie* **163**: p: 49-64.
- Leflaive, J. and Ten-Hage, L. (2007)** Algal and cyanobacterial secondary metabolites in freshwaters: a comparison of allelopathic compounds and toxins. *Freshwater Biology* **52**: p: 199-214.
- Mynderse, J.S., Moore, R.E., Kashiwagi, M. and Norton, T.R. (1977)** Antileukemia activity in the Oscillatoriaceae: isolation of debromoaplysiatoxin from *Lyngbya*. *Science* **196**: p: 538-540.
- Morgan, 1982** : An ecological survey of standing waters in North west Africa II : Site descriptions for Tunisai and Algeria. *Biol.Cons.* p : 24.83.113.
- Mckintosh et al., 1990; Runnegar et al., 1995; Bagu et al., 1997**
- MC Maazi, 1991** : Contribution à l'estimation quantitative et qualitative des anatidés et foulques hivernants et nicheurs au niveau du lac des oiseaux (Wilaya d'El Tarf). Ingéniorat. (INA) Alger.
- Mezrioui N., Oudra B., Oufdou K., Hassani L., Loudiki M. et Darley J., 1994** – Effect of microalgae growing on wastewater batch culture on *E. coli* et *V. cholerae*. *Survival. Wat. Sci. Tech.*, 30(8) : p: 295-302.
- Mez, K., Beattie, K.A., Codd, G.A., Hanselmann, K., Hauser, B., Naegeli, H. and Preisig, H.R. (1997)** Identification of a microcystin in benthic cyanobacteria linked to cattle deaths on alpine pastures in Switzerland. *European Journal of Phycology* **32**: p: 111-117.
- Mur, L.R., Skulberg, O.M. and Utkilen, H. (1999)** Cyanobacteria in the environment, p: 15-40. *In* I. Chorus and J. Bartram (ed.), *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. E & FN Spon, London, United Kingdom.

**-Mur L.R., Skumberg O.M. & Utkilen H., 1999.** Cyanobacteria in the Environment. In : Chorus, I. et Bartram, J 1999. (Eds.). Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public Health consequences, monitoring and management. WHO Ed. E & FN SPON, p: 41-111 ; **Haider S., Naithani V., Viswanathan P. N. & Kakkar P., 2003.**

Cyanobacterial toxins: a growing environmental concern. *Chemosphere*, 52, p: 1-21.

**-Mur L.R., Skumberg O.M. & Utkilen H., 1999.** Cyanobacteria in the Environment. In : Chorus, I. et Bartram, J 1999. (Eds.). Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public Health consequences, monitoring and management. WHO Ed. E & FN SPON, p: 41-111.

**-Moffitt, C. and Neilan, B.A. (2004)** Characterization of the nodularin synthetase gene cluster and proposed theory of the evolution of cyanobacterial hepatotoxins. *Applied and Environmental Microbiology* **70**: p: 6353-6362.

**-Mihali, T.K., Kellmann, R., Muenchhoff, J., Barrow, K.D. and Neilan, B.A. (2008)** Characterization of the gene cluster responsible for cylindrospermopsin biosynthesis. *Applied and Environmental Microbiology* **74**: p : 716-722.

**-Manamani R. 2007.** Niveau trophique et efflorescences des cyanobacteries dans le barrage d'Ain Dalia (Souk Ahras). Mémoire de magister en science de la mer, option : biologie et physiologie des organismes marins.

**Mackenzie et al., 2000**

**-Nageli, 1849** p : 39

**-Nürnberg, G. K., 1984.** "The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia", *Limnology and Oceanography*, vol. 29, no 1, p: 111-124 ;

**Carpenter, S.R., D. Ludwig et W.A. Brock, 1999.** "Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change", *Ecol. Appl.*, vol. 9, p: 751-771.

**-Nishiwaki-Matsushima, R., Ohta, T., Nishiwaki, S., Suganuman, M., Kohyama, K., Ishikawa, T., Carmichael, W.W. and Fujiki, H. (1992)** Liver tumor promotion by the cyanobacterial cyclic peptid toxin microcystin-LR. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology* **118**: p: 420-424 ;

**Humpage, A.R., Hardy, S.J.,**

**Moore, E.J., Froscio, S.M. and Falconer, I.R. (2000)** Microcystins (cyanobacterial toxins) in drinking water enhance the growth of aberrant crypt

foci in the mouse colon. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* **61**: p: 155- 165.

- Nishizawa, T., Asayama, M., Fujii, K., Harada, K.I. and Shirai, M. (1999)** Genetic analysis of the peptide synthetase genes for a cyclic heptapeptide microcystin in *Microcystis* spp. *Journal of Biochemistry* **126**: p: 520-529 ; **Tillett, D., Dittmann, E., Erhard, M., von Döhren, H., Börner, T. and Neilan, B.A. (2000)** Structural organization of microcystin biosynthesis in *Microcystis aeruginosa* PCC7806: an integrated peptide-polyketide synthetase system. *Chemistry and Biology* **7**: p: 753-764.
- Ngansoumana B.A., 2006.** La Communauté Phytoplanctonique du Lac de Guiers (SENEGAL) : Types d'associations fonctionnelles et approches expérimentales des facteurs de regulation. Thèse de Doctorat de 3e Cycle de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). P : 144.
- Nasri A.B. 1999.** Etude de la biodiversité des Cyanoprocaryotes et leurs toxines dans un milieu d'eau douce: Lac Oubéira. *Mémoire de Magister. Université d'Annaba.*
- Nasri H. 2001.** Etude de la dynamique spatio- temporelle et des paramètres de croissance de Cyanoprocaryotes toxiques dans un milieu d'eau douce. Cas du barrage Chaffia. *Mémoire de magister. Université d'Annaba.*
- Nasri H., Bouaïcha, N. & Kaid Harche, M. 2007.** A New Morphospecies of *Microcystis* sp. Forming Bloom in the Cheffia Dam (Algeria): Seasonal Variation of Microcystin Concentrations in Raw Water and Their Removal in a Full-Scale Treatment Plant. *Environ Toxicol* **22**: p: 347–356.
- Oliver R.L. & Ganf G.G., 2000.** Freshwater blooms, p: 149-194. In Whitton B. A. & Potts M. [eds.], *The Ecology of Cyanobacteria - Their Diversity in Time and Space.* Kluwer Academic Publishers.
- Oliver, R.L. and Gant, G.G. (2000)** Freshwater blooms, p: 149-194. In B.A., Whitton and M., Potts (ed.), *The Ecology of Cyanobacteria. Their diversity in time and space.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Germany.
- Ouattara A., Podoor N. & Gouréne G., 2001.** Etudes préliminaires de la distribution spatiotemporelle du phytoplancton dans un système fluvio-lacustre africain (Bassin Bia ; Côte d'Ivoire). *Hydroécol. Appl.* Tome 13 Vol. 1, p: 113-132.
- Oberhaus, L., Briand, J.F., Leboulanger, C., Jacquet, S. and Humbert, J.F. (2007)** Comparative effects of the quality and quantity of light and temperature on the

growth of *Planktothrix agardhii* and *P. rubescens*. *Journal of Phycology* **43**: p: 1191-1199.

**-Oberhaus, L., Gelinas, M., Pinel-Alloul, B., Gadhouani, A. and Humbert, J.F.**

(2007) Grazing of two *Planktothrix* species by *Daphnia pulicaria*: potential for bloom control and transfer of microcystins. *Journal of Plankton Research* **29**: p: 827–838.

**-Ouarts A., Saoudi, A. . & Chekireb, D. 2011.** Etude des efflorescences toxiques a cyanobactéries dans le barrage Mexa, Algerie. *Rev. Microbiol. Ind. San et Environn. Vol 5, N°1*, p : 81-100.

**-Park H.-D., Watanabe M.F., Harada K.-I., Nagai H., Suzuki M., Watanabe M.**

**& Hayashi H., 1993.** Hepatotoxin (microcystin) and neurotoxin (anatoxin-a) contained in natural blooms and strains of cyanobacteria from Japanese freshwaters.

*Nat. Toxins*, 1: p : 353–360 ; **Thébault L. & Lesne J.P., 1995.** Les toxines des cyanobactéries : quels risques pour la santé. *TSM*, 12 : p: 937-940.

**-Piersen D.C. & Weyhenmeyer G.A., (1994).** High resolution measurements of sediment resuspension above an accumulation bottom in a stratified lake.

*Hydrobiologia*. 284: p : 43-57 ; **Derraz M., 1995.** Étude de l'autorisation de dollars une de barrage El Kensera (Maroc). Caractéristique physico-chimiques, biodisponibilité du phosphate segmentaire ecophysiologie de *Microcystis* est relation des Blue de avec les paramètres environnementaux. Thèse d'état esscience à la faculté de Meknés : p : 120.

**-Prairie & Soucisse, 1999 in: Chevalier P; Pilote R; Leclerc J.M (2001) in:**

Risques à la santé publique découlant de la présence de cyanobactéries (algues bleues) et de microcystines dans trois bassins versants du sud-ouest québécois. P : 151.

**Paerl H.W., Fulton III R.S., Moisander P.H., Dyble J., 2001.** Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *The Scientific World Journal* 1, 76e113.

**-Rodier J. (1978).** L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 6<sup>ème</sup> édition)

**-Richardson K., Beardall J. & Raven J.A., 1983.** Adaptation of unicellular algae to irradiance: An analysis of strategies. *New Phytologist*, 93 : p: 157-191.

**-Robarts R.D. & Zohary T., 1987.** Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zeal. J. Mar. Fresh. Res.*, 21 : p: 391-399.

**-Rowell, P. and Kerby, N.W. (1991)** Cyanobacteria and their symbionts, p: 373-406. *In* M.J., Dilworth and A.R., Glenn (ed.), *Biology and biochemistry of nitrogen fixation*. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, The Netherlands.

**-Rippka, R. and Herdman, M. (1992)** Pasteur Culture Collection of Cyanobacterial Strains. *In* *Axenic Culture, Catalogue and Taxonomic Handbook*. Institut Pasteur, Paris, p: 103.

**-Reviere, 2003**

**-Rouhiainen, L., Vakkilainen, T., Siemer, B.L., Buikema, W.J., Haselkorn, R. and Sivonen, K. (2004)** Genes coding for hepatotoxic heptapeptides (microcystins) in the cyanobacterium *Anabaena* strain 90. *Applied and Environmental Microbiology* 70:p: 686-692.

**-Stanier et al., 1971; Rippka et al., 1979**

**-Seenayya & Subba Raju, 1972** p: 45

**-Stanier R.Y., Sistrom W.R., Hansen T.A., Whitton B.A., Castenholz R.W., Pfennig N., Gorlenko V.N., Kondratieva E.N., Eimhjellen K.E., Whittenburg R., Gherna R.L. & Trüper H.G., 1978.** Proposal to place the nomenclature of the cyanobacteria (blue-green algae) under the rules of the international Code of Nomenclature of Bacteria. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 28, p: 335-336.

**-Smith H., 1982.** *Annu. Rev. Plant Physiol.* P: 33, 481, 518, J.T.O. Kirk (1983). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge University Press, Cambridge.

**-Skulberg O.M., Codd G.A. & Carmichael W.W., 1984.** Toxic blue-green algal blooms in Europe : a growing problem. *Ambio* , 13: p: 244-247 ; **Carmichael W. W., Mahmood N. A, Hyde E. G, 1990.** Natural toxins from cyanobacteria (blue-green algae) *In* *Marine Toxins: Origin, Structure and Molecular Pharmacology*. Sherwood Hall and Gary Strickland. Eds: ACS Symposium, série 418, American Chemical Society. Washington. P: 87-106.

**-Spencer, P.S., Ludolph, A.C., Dwivedi, M.P., Roy, D.N., Hugon, J. and Schambure, H.H. (1986)** Lathyrism: evidence for a role of the neuroexcitatory amino acid BOAA. *Lancet* 2: p: 1066-1067.

**Spencer, P.S., Nunn, P.B., Hugon, J., Ludolph, A.C., Ross, S.M., Roy, D.N. and**

- Robertson, R.C.** (1987) Guam amyotrophic lateral sclerosis-parkinsonism-dementia linked to a plant excitant neurotoxin. *Science* **237**: p: 517–522.
- Sneath P.H.A. (ed) 1992.** International Code of Nomenclature of Bacteria, 1990 Revision. Washington D.C., American Society for Microbiology p.
- Samraouib B., de Belair et Benyacoub S, 1992 :** A much thretened lake : le lac des oiseaux, in North Eastern Algeria. *Env.Cons.* p: 264-276.
- Silva et al., 1992**
- Sellner K G, 1997.** Physiology, ecology; and toxic properties of marins cyanobacteria blooms. *Limnol . oceanogr* ; 42: p: 1089-1104.
- Skulberg, O.M. (1996)** Terrestrial and limnic algae and cyanobacteria, p: 383-395. *In* A., Elvebakk and P., Prestrud (ed.), A catalogue of Svalbard Plants, Fungi, Algae and Cyanobacteria. Norsk Polarinstituttt Skrifer, Tromsø, Norway.
- Shapiro J., 1997.** The role of carbon dioxide in the initiation and maintenance of blue-green dominance in lakes. *Freshw. Biol.* 37 : p: 307-323.
- Sivonen K. & Jones G., 1999.** Cyanobacterial toxins. In *Toxic Cyanobacteria in water : A guide to their public health consequences, monitoring and management.* E & FN Spon, London.p: 416.
- Sivonen, K. and Jones, G. (1999)** Cyanobacterial toxins, p: 41-111. *In* I. Chorus and J. Bartram (ed.), *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management.* E & FN Spon, London, United Kingdom.
- Suttle, C. A., 2000.** Cyanophages and their role in the ecology of cyanobacteria, p: 563-589, dans B. A. Whitton et M. Potts (éd.), *The ecology of cyanobacteria : their diversity in time and space,* Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Shimizu Y., 2000.** Paralytic shellfish poisoning: Chemistry and mechanism of action. In *Seafood and freshwater toxins : pharmacology, physiology and detection.* Botana L. D.,NY (ed). P: 151- 172.
- Tiffany L. M., 1951.** Ecology of fresh water algae. In: G. M. Smith, ed. *Manual of phycology* Chronocia Botanica. Waltham, Massachussets: p : 293-311.
- Testard P., 1983.** Le lac de Créteil : un lac de sablière peu profond. In « *Problèmes d'écologie, Ecosystèmes limniques* » Lamotte, M. & Bourlière, F.
- Vincent, W.F., 1989.** "Cyanobacterial growth and dominance in two eutrophic lakes: Review and synthesis", *Archiv für Hydrobiologie*, vol. 32, p: 239-254.



**-Terao K., Ohmori S., Igarashi K., Ohtani I., Watanabe M.F., Harada K.I., Ito E. & Watanabe M., 1994.** Electron microscopic studies on experimental poisoning in mice induced by cylindrospermopsin isolated from blue-green alga *Umezakia natans*. *Toxicon* 32: p: 833-843 ; **Hawkins P.R., Chandrasena N.R., Jones G.J., Humpage A.R. & Falconer I.R., 1997.** Isolation and toxicology of cylindrospermopsis raciborskii from an ornamental lake, *Toxicon* 35, p: 341-346.

**-Thébault L. & Lesne J.P., 1995.** Les toxines des cyanobactéries : quels risques pour la santé. *TSM*, 12 : p: 937-940.

**-Visser, P.M., Ibelings, B., Van der Veer, B., Koedood, J. and Mur, R. (1996)** Artificial mixing prevents nuisance blooms of the cyanobacterium *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, the Netherlands. *Freshwater Biology* 36: p: 435-450.

**-Vansconcelos V.M., 1999** – Cyanobacterial toxins in Portugal : Effects on aquatic animals and risk for human health. *Braz. J. Med. Biol. Res. Mar.*, 32(3) : p: 249-254.

**-Whitton, B.A. et M. Potts, 2000.** Introduction to the Cyanobacteria, p: 1-11, dans **Whitton, B.A. et M. Potts (éd.)**, *The ecology of cyanobacteria : their diversity in time and space*, Boston, Kluwer Academic Publishers.

**40Wetzel R. G. & Likens G.E., 2000.** *Limnological Analyses* 3rd edition Springer-Verlag.429.

**-Wasmund N., 1997.** Occurrence of cyanobacterial blooms in baltic sea in relation to environmental conditions. *Int. Revue ges. Hydrobiol*; 82,2. P: 169-184.

**-Yoshizawa S.,Matsushima R.,Watanabe M.F.,Harada K., Ichihara A.,Carmichael W.W. & Fujiki H.,1990.** Inhibition of protein phosphatases by microcystins and nodularin associated with hepatotoxicity. *J.Cancer Res. Clin.Oncol.* 116 (6), p: 609-614.

**Zegura et al., 2003**

## ANNEXE

### Annexe 1 : Réactifs de l'orthophosphate

- Solution d'acide sulfurique ( $d = 1,84$ ) à 15 % environ en volume.
- Solution de molybdate d'ammonium .....40 g/l.
  - Molybdate d'ammonium tétra hydraté .....20 g
  - Eau distillée .....500 ml

Filtrer si nécessaire, à conserver en flacon de polyéthylène à 4 °C.

- Solution d'acide ascorbique .....20 g/l :
  - Acide ascorbique..... 2 g
  - Eau distillée.....100 ml

À préparer chaque jour.

- Solution de tartrate double d'antimoine et de potassium à... 2,8 g/L :
  - Tartrate double d'antimoine et de potassium.....0,28 g
  - Eau distillée..... 100 ml
- Réactif combiné :
  - Solution d'acide sulfurique .....50 ml
  - Solution de tartrate double d'antimoine et de potassium ...5 ml
  - Solution de molybdate d'ammonium .....15 ml
  - Eau distillée .....100 ml

Conserver le réactif au réfrigérateur à .....4 °C.

- Solution mère étalon à 50 mg/l de phosphore :
  - dihydrogénophosphate de potassium desséché au préalable à l'étuve à 100 °...219,7 mg
  - Eau distillée .....100 ml

Acidifier la solution par 1 ml d'acide sulfurique à 15 % avant d'ajuster le volume.

- Solution fille étalon à 1 mg/L de phosphore.

Diluer au 1/50 la solution précédente avec de l'eau distillée au moment de l'emploi.

### Annexe 2 : Réactifs de nitrate

- Solution de salicylate de sodium à 0,5% à renouveler toutes les 24 heures.
- Acide sulfurique concentré ( $d = 1,84$ ).
- Solution d'hydroxyde de sodium et de tartrate double de sodium et de potassium :
  - Hydroxyde de sodium 400g
  - Tartrate double de sodium et de potassium 60g
  - Eau distillée 1000ml

Faire dissoudre les sels dans de l'eau. Laisser refroidir et compléter à 1000ml.

A conserver dans un flacon en polyéthylène.

- Solution étalon mère d'azote nitrique à 0,1g/l :
  - Nitrate de potassium anhydre 0,722g
  - Eau distillée 1000ml
  - Chloroforme pour conserver 1ml
  - Solution fille étalon d'azote nitrique à 0,005g/l.

Amener 50 ml de la solution mère à 1 000 ml avec de l'eau distillée.

### **Annexe 3 :**

Inventaire des genres identifiés dans le lac des oiseaux

#### ***Microcystis :***

***Règne : Bacteria***

***Sous-règne : Eubacteria***

***Division : Cyanobacteria***

***Classe : Cyanophyceae***

***Ordre : Chroococcales***

***Famille : Microcystaceae***

***Genre : Microcystis***

***Kutzing, 1833***

#### ***Limnothrix :***

***Règne : Eubacteria***

***Sous-règne : Negibacteria***

***Division : Cyanobacteria***

***Classe : Cyanophyceae***

***Ordre : Synechococcales***

***Famille : Pseudanabaenaceae***

***Genre : Limnothrix***

#### ***Anabaenopsis :***

***Règne : Eubacteria***

***Sous-règne : Negibacteria***

***Division : Cyanobacteria***

***Classe : Cyanophyceae***

***Ordre : Nostocales***

***Famille : Aphanizomenonaceae***

***Genre : Anabaenopsis***

#### ***Anabaena :***

***Règne : Bacteria***

***Division : Cyanobacteria***

***Classe : Cyanophyceae***

***Ordre : Nostocales***

***Famille : Nostocaceae***

***Genre : Anabaena***

#### ***Pseudanabaena :***

***Règne : Bacteria***

***Division : Cyanobacteria***

***Classe : Cyanophyceae***

***Ordre : Nostocales***

***Famille : Nostocaceae***

***Genre : Pseudanabaena***

## RESUME

Notre travail a été effectué au niveau du lac des oiseaux situé dans la wilaya d'El Tarf. Cependant, des prélèvements mensuels ont été effectués depuis juillet 2015 jusqu'à Avril 2016 afin d'évaluer la dynamique spatiotemporelle des différents genres de Cyanobactéries au niveau du site d'étude en fonction des paramètres physico- chimiques du milieu (température, pH, oxygène dissout, Nitrates et Orthophosphates) et à l'identification et dénombrement des cyanobactéries récoltées. L'observation des caractères morphoanatomiques des cyanobactéries récoltées nous a permis d'identifier 05 genres (*Microcystis*, *Anabaena*, *Pseudoanabaena*, *Anabaenopsis*, *Limnothrix*), dont la majorité est potentiellement toxique. Parmi ces genres toxiques *Microcystis* est omniprésent.

Les résultats des mesures des paramètres physicochimiques de l'eau montrent des variations temporelles. L'évaluation des densités mensuelles globales des cyanobactéries récoltées montrent que les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant les mois de Juillet et Aout (été), ensuite , Septembre et octobre (automne) et à un moindre degré en mois de février, mars et avril.

**Mots clés :** Cyanobactéries ; dynamique spatio-temporelle ; toxicité ; lac des oiseaux.

## ABSTRACT

Monthly withdrawals were made at the Lake of Birds (north eastern Algeria) since July 2015 until April 2016 to assess the spatiotemporal dynamics of different kinds of Cyanobacteria at the study site based on physicochemical parameters (temperature, pH, dissolved oxygen, nitrates and phosphates) and the identification and enumeration of the harvested Cyanobacteria.

Watching morphoanatomical characters harvested Cyanobacteria has allowed us to identify 05 kinds (*Microcystis*, *Anabaena*, *Pseudoanabaena*, *Anabaenopsis*, *Limnothrix*), most of which is potentially toxic. These toxic genera *Microcystis* is omnipresent.

The result of measurements of physicochemical parameters of water shows temporel variations. The evaluation of overall monthly densities of cyanobacteria collected show that the highest values are recorded in the months of July and August (summer), then in September and October (autumn) and to a lesser extent in February, March and April.

**Keywords:** Cyanobacteria; spatiotemporal dynamics; toxicity ; Lake of Birds.

## ملخص

تم تنفيذ عملنا في بحيرة الطيور التي تقع في ولاية الطارف. حيث جمعنا عينات شهرية من يوليو 2015 حتى أبريل 2016 لتقييم الديناميكية المكانية والزمانية من أنواع مختلفة من الطحالب الزرقاء السامة في موقع الدراسة بناء على المعايير الفيزيوكيميائية (درجة الحرارة، ودرجة الحموضة، والأكسجين المذاب و النترات الذائبة والفوسفاتية) وتحديد وتعداد البكتيريا الزرقاء التي تم جمعها. وقد سمح مشاهدة الخصائص التشريحية للطحالب الزرقاء المتحصل عليها في البحيرة مكنتنا من التعرف على 05 انواع : (*Microcystis*، *Anabaena*، *Pseudoanabaena*، *Anabaenopsis*، *Limnothrix*)، و معظم هذه المجمعات الطحلبية المجهرية تعرف بشدة سميتها.

وتشير النتائج الفيزيوكيميائية للمياه التغيرات لقيم الكثافة الشهرية للطحالب الزرقاء التي تم جمعها، التي سجلت أعلى القيم في شهري جويلية وأوت (الصيف)، ثم في سبتمبر وأكتوبر (الخريف) وإلى حد أقل في فيفري ومارس و أفريل.

**كلمات المفتاح:** البكتيريا الزرقاء. الديناميكية المكانية و الزمانية. السمية. بحيرة الطيور.