

Republique Algerienne Democratique Et Population
Ministere De L'enseignement Superieur Et De La
Recherche Scientifique
Universite Abbes Laghrour Khenchela
Faculté Des Sciences De La Nature Et De La Vie
Département De Biologie Moléculaire et Cellulaire



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم البيولوجيا الجزيئية والخلوية

Mémoire MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : **Sciences de la Nature et de la Vie**

Filière : **Sciences Biologiques**

Spécialité : **Microbiologie Appliquée**

Présenté par : **BOUHADDA Hassen**
BALOULI Nassima
ALLAOUI Imene

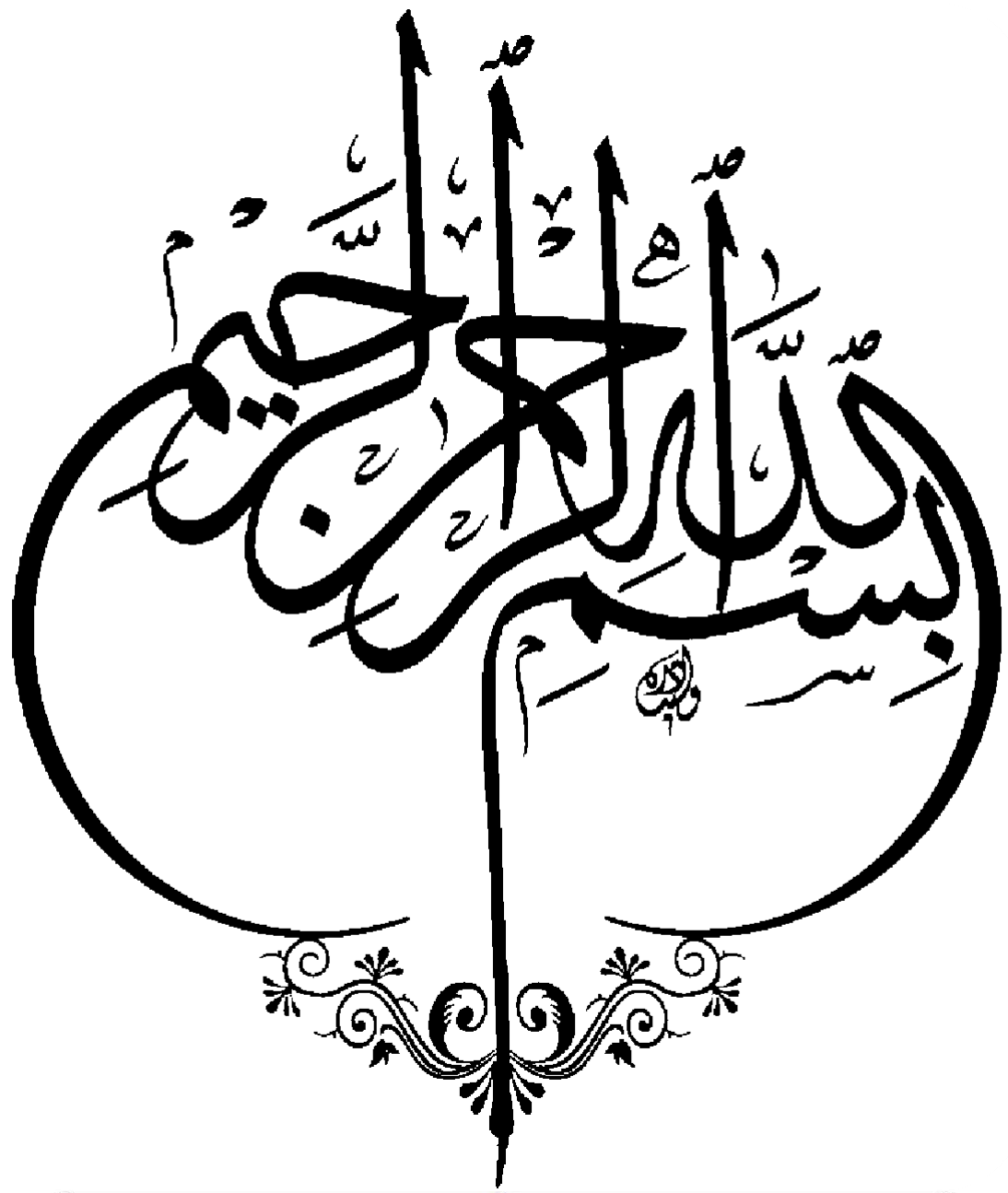
Thème

Les Cyanobactéries Toxiques

Soutenu le : 27/06/2022

Devant le jury :

Présidente :	DEROUICHE Fouzia	M.C.B.	Université de Khenchela
Directrice :	BENREDJEM Lamia	M.A.A.	Université de Khenchela
Examinatrice :	HANOUN Saida	M.C.B.	Université de Khenchela





Remerciements :

Tout d'abord, nous remercions Allah qui nous a doté une grande volonté et qui nous a aidé et nous a donné le courage, la force et la patience d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre directrice de mémoire Dr. BENREDJEM Lamia pour le partage de ses connaissances, ses conseils, son support et sa générosité sans lesquels ce travail n'aurait vu le jour. Par sa confiance et soutien, elle nous a guidé et nous a dirigé afin de mener à terme ce travail.

Nous exprimons toute notre gratitude aux membres du jury Dr. DEROUICHE Fouzia et Dr. HANOUN Saïda qui ont accepté avec joie d'examiner notre travail.

Nous réservons une pensée spéciale à tous nos enseignants de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie qui ont su nous donner une formation didactique et appréciable durant notre cursus.

Par la même occasion, Nous tenons également à remercier Radouan Sari, qui nous a apporté aide et soutien à chaque instant pendant deux ans.





Dédicace :

A nos chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études,

A nos chère NAZITA pour son aide et ses encouragements, nous vous remercions pour votre soutien moral dans tous les moments de doute et de difficulté.

A nos chers enfants qui ont été obéissants et patients:
Rahma, Rahim, Takwa et Youcef,

A nos chères sœurs et frères pour leurs encouragements constants et leur soutien moral,

À nos collègues de travail pour nous les remercions pour leurs encouragements et leur soutien

A toute nos familles pour leur soutien tout au long de notre parcours universitaire,

Nous espérons que ce travail répondra à vos souhaits et attentes Merci d'être toujours à nos côtés

Aux étudiants de Master Microbiologie Appliquée promotion 2022, avec lesquels nous avons passé deux ans, qui nous ont apporté leur soutien sans exception, en particulier Radouan Sari, Atheer Al-Din Hamidani et Rima.

اهداء

أهدي ثمرة جهدي الى ملاكي في الحياة، الى الحب الثابت الذي لا يتغير، الى التي
حرصت على تعليمي بصبرها وتضحياتها واحاطتني

بحنانها أمي الغالية

إلى فقيد قلبي الذي انقطع حبل الوصال به، الى القلب الكبير الذي علمني العطاء
دون انتظار الرد، من احمل اسمه بافتخار، ألف رحمة

تنزل على قبره، جنة يا الله لأبي الذي ترك الحياة فأظلمت، واماتنا شوقا له، اللهم
اجعل الجنة داره ومستقره

إلى زوجي الغالي وسندي في الحياة إسحاق
إلى اميرتي الصغيرة وقطعة من روعي ماريا
إلى اختي وتوأم روعي فاطمة
إلى إخوتي برهان، عبد السلام، عبد الرحمن
إلى المعنى الاصيل لكلمة (صديق) والعزيزة على قلبي منى

إلى الاستاذة الغنية عن التعريف التي لم تبخل علينا بنصائحها وتوجيهاتها الأستاذة
بن رجم
إلى من جمعتني به الايام في مشواري الدراسي من قريب او بعيد

اهدي مذكرتي

ايمان



Résumé



Résumé

Les cyanobactéries sont largement répandues dans la nature et les floraisons cyanobactériennes constituent depuis plusieurs années un phénomène fréquent. Les populations cyanobactériennes composant ces floraisons produisent une grande variété de métabolites secondaires hautement toxiques pour de nombreux organismes eucaryotes.

L'objectif de notre travail porte sur la détermination des concentrations des orthophosphates, l'identification morphologique des cyanobactéries, le dosage de la Chlorophylle a ainsi que le dosage des microcystines de la retenue du barrage de Tagharist situé dans la wilaya de Khenchela.

Le résultat du dosage de la concentration des orthophosphates a montré une valeur de 0.20 mg/l. L'étude microscopique a révélé la présence d'une espèce de cyanobactérie : *Planktothrix* sp. et trois (3) genres de micro-algues eucaryotes : *Spirogyra*, *Closterium* et *Mougeotia* avec une concentration totale de chlorophylle a de 1.445 $\mu\text{g L}^{-1}$. Cependant le dosage des microcystines a montré une valeur inférieure aux niveaux de détection par la technique ELISA. Ainsi, un plan de gestion doit être appliqué dans cet écosystème pour prévenir le développement de blooms de cyanobactéries toxiques.

Mots-clés : Barrage Tagharist, Cyanobactéries, Cyanotoxines, Khenchela, Microcystines

Title : Toxic cyanobacteria

Abstract

Cyanobacteria are widely distributed in nature and cyanobacterial blooms have been a frequent phenomenon for several years. The cyanobacterial populations composing these blooms produce a wide variety of secondary metabolites that are highly toxic to many eukaryotic organisms.

The objective of our work concerns the determination of the concentrations of orthophosphates, the morphological identification of cyanobacteria, the dosage of chlorophyll a as well as the dosage of microcystins of the Tagharist dam located in the wilaya of Khenchela.

The result of the dosage of the concentration of orthophosphates showed a value of 0.20 mg/l. The microscopic study revealed the presence of a cyanobacteria species: *Planktothrix* sp. and three (3) genera of eukaryotic microalgae: *Spirogyra*, *Closterium* and *Mougeotia* with a total chlorophyll a concentration of 1.445 $\mu\text{g L}^{-1}$. However, the microcystin assay rose below the levels detected by the ELISA technique. Thus, a management plan must be applied in this ecosystem to prevent the development of toxic cyanobacteria blooms.

Key Words: Cyanobacteria, Cyanotoxins, Khenchela, Microcystins, Tagharist Dam

العنوان : البكتيريا الزرقاء السامة

ملخص :

تتوزع البكتيريا الزرقاء على نطاق واسع في الطبيعة ويشكل تكاثر البكتيريا الزرقاء ظاهرة متكررة لعدة سنوات. تنتج مجموعات البكتيريا الزرقاء المكونة لهذه الأزهار مجموعة متنوعة من المستقلبات الثانوية شديدة السمية للعديد من الكائنات حقيقية النواة.

يتعلق الهدف من عملنا بتحديد تركيزات الفوسفات ، والتعريف المورفولوجي للبكتيريا الزرقاء ، وجرعة الكلوروفيل (أ) وكذلك جرعة الميكروسيستين لخزان السد تغاريسيت الواقع في ولاية خنشلة.

أظهرت نتيجة جرعة تركيز أورثوفوسفات قيمة 0.20 ملغم / لتر. كشفت الدراسة المجهرية عن وجود نوع من البكتيريا الزرقاء: *Planktothrix sp.* : وثلاثة (3) أجناس من الطحالب الدقيقة حقيقية النواة :

Mougeotia و *Closterium* ، *Spirogyra* بتركيز إجمالي الكلوروفيل 1.445 ميكروغرام / لتر . ومع ذلك مقايسة ميكروسيستين بينت كمية اقل من المستويات التي يتم الكشف عنها بواسطة تقنية ELISA. وبالتالي ، يجب تطبيق خطة إدارة في هذا النظام البيئي لمنع تطور أزهار البكتيريا الزرقاء السامة .

الكلمات المفتاحية : سد تغاريسيت ، البكتيريا الزرقاء ، سموم البكتيريا الزرقاء ، خنشلة ،

ميكروسيستين

Liste des abréviations

BMAA :	β -N-méthylamino-L-alanine
CYNS :	cylindrospermopsineS
ELISA :	Enzyme-linked Immunosorbent Assay
EM :	microscope électronique
IPFM :	Intoxication Paralysante par les Fruits de Mer
LC/MS/MS :	Chromatographie en phase liquide avec spectrométrie e masse en tandem
LPS :	tandem
MC-LR :	lipopolysaccharides
MCs :	Microcystine LR
NODs :	microcystines
NRPS :	nodulaires
PHA :	Peptides Synthétases Non Ribosomales
PKS :	polyhydroxyalcanoates
PNEK :	peptides polyketide synthétases
PS :	Parc National d'El Kala
PSP :	Photosystème
RUBISCO :	Paralytic Shellfish Poisoning
S :	Ribulose Bisphosphate Carboxy/Oxygénase
SAX :	Svedberg Saxitoxines

Liste des figures

N° Figure	Titre	Page
Figure 1.	La diversité morphologique des cyanobactéries.	4
Figure 2.	Trichome de cyanobactérie du genre <i>Anabaena</i> présentant un hétérocyste (H) et un akinète (A).	5
Figure 3.	Différents types morphologiques de cyanobactéries.	12
Figure 4.	Arbre phylogénétique basé sur 21 protéines conservées comprenant les plus récents changements dans la classification des cyanobactéries.	13
Figure 5.	Structure chimique des microcystines. Les résidus stables et variables sont indiqués par des ellipses grises et roses respectivement.	17
Figure 6.	Représentation schématique du cluster de gènes <i>mcy</i> des genres <i>Microcystis</i> , <i>Planktothrix</i> et <i>Anabaena</i> . Les NRPS, PKS et les gènes impliqués dans la synthèse des enzymes de finalisation des queues peptidiques sont indiqués en vert clair, orange et autres couleurs, respectivement.	18
Figure 7.	Structure chimique des nodularines.	19
Figure 8.	Structures de CYNs.	20
Figure 9.	Situation géographique du barrage de Tagharist (Google, Earth).	26
Figure 10	Site de prélèvement.	28
Figure 11.	Microscope optique avec caméra ZEISS.	30
Figure 12.	Filtre Whatman après filtration de l'eau brute.	31
Figure 13.	Extrait cétonique de la chlorophylle a.	31
Figure 14.	Photographies des microalgues observées dans le barrage Taghrist. (a) : <i>Planktothrix</i> sp., (b) : <i>Spirogyra daedaleoides</i> , (c) : <i>Spirogyra</i>	

	sp., (d) : <i>Spirogyra tenuissima</i> , (e) : <i>Spirogyra porticalis</i> , (f) : <i>Spirogyra</i> sp., (g) : <i>Closterium macilentum</i> , (h) : <i>Mougeotia</i> sp.	37
--	---	-----------

Liste des tableaux

N° Tableau	Titre	Page
Tableau 1.	Caractéristiques morphologiques des taxons de micro-algues observés dans le barrage Taghrist.	36



Table des matières



TABLE DES MATIÈRES

	Page
Remerciements	
Dédicace	
Résumés	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	1
Chapitre 1. Synthèse bibliographique	
1. Généralités sur les cyanobactéries	3
1.1. Apparition des cyanobactéries	3
1.2. Description générale des cyanobactéries	3
1.2.1. Morphologie des cyanobactéries	3
1.2.2. Cytologie	5
1.2.3. Division cellulaire et reproduction	8
1.2.4. Pigments photosynthétiques	9
1.3. Ecologie	10
1.3.1. Une bactérie ubiquitaire	10
1.3.2. Symbiose	11
2. Classification des cyanobactéries	11
2.1. Classification morphologique	11
2.2. Classification moderne des cyanobactéries	12
3. Conditions de développement	14
3.1. Dynamique temporelle de prolifération des cyanobactéries	14
3.2. Facteurs environnementaux et caractéristiques physiologiques des cyanobactéries favorisant leur dominance	14
3.2.1. Mobilité verticale et horizontale	14
3.2.2. Nutriments	15
3.2.3. Température	15
3.2.4. pH et sources de carbone	15

3.2.5. Prédation	16
4. Toxines et cyanobactéries toxiques	16
4.1. Toxines des cyanobactéries	17
4.1.1. Les hépatotoxines	17
a. Les microcystines	17
b. Nodularine	18
c. La cylindrospermopsine	19
4.1.2. Les neurotoxines	20
a. Les anatoxines	20
b. Les aphantoxines	21
4.1.3. Autres composés toxiques	22
a. Les cytotoxines	22
b. Les dermatotoxines	22
4.2. Facteurs influençant la production des cyanotoxines	22
4.2.1. Facteurs physico-chimiques	22
4.2.2. Facteurs biologiques	24
5. Travaux sur les cyanobactéries en Algérie	24
5.1. Les cyanobactéries dans les lacs Oubeira, Tonga et de El Mellah	24
5.2. Les cyanobactéries dans le barrage de Cheffia	25
5.3. Cyanobactéries toxiques dans barrage d'Ain Zada	25
Chapitre 2. Matériel et méthodes	55
1. Description du site d'étude	26
1.1. Situation géographique	26
2. Échantillonnage	28
3. Dosage des orthophosphates (PO₄³⁻)	29
3.1. Principe	29
3.2. Protocole	29
4. Etude des cyanobactéries	29
5. Dosage de la chlorophylle a	30
5.1. Principe	30
5.2. Protocole	30

2.6. Dosage des Toxines	31
2.6.1. Extraction des toxines intracellulaires	31
2.6.2. Dosage des microcystines par le test ELISA (Enzyme-linked Immunosorbent Assay)	32
Chapitre 3. Résultats et discussion	
1. Evaluation de l'état trophique	34
2. Estimation de la biomasse globale du phytoplancton par le dosage de la chlorophylle a	34
3. Etude morphologique des cyanobactéries	35
4. Dosage des microcystines	37
Conclusion et perspectives	39
Références bibliographiques	40



Introduction



Le maintien de la qualité de l'eau est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants, et ce, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Pour atteindre cet objectif essentiel, il est nécessaire de doter les organismes de surveillance d'outils appropriés leur permettant de comprendre et de gérer, dans son ensemble complexe, le milieu aquatique. Cependant, il est difficile de définir ce qu'est une eau de qualité. En effet, cette qualité peut s'exprimer non seulement par une combinaison de substances inorganiques ou organiques à diverses concentrations, mais aussi par la composition et l'état des organismes aquatiques animaux et végétaux qui vivent dans ce milieu (Sladeczek 1969, Wachington 1984).

L'eutrophisation qui est définie comme au passage artificiel, par pollution d'origine humaine, à l'état eutrophe (Crouzet, 1987) 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 ». Ces efflorescences sont responsables des phénomènes catastrophiques pour la vie aquatique connus chez les animaux par ingestion simultanée d'eau et des algues qu'elle contient ; et également les intoxications des humains, par consommation d'eau de distribution publique (Falconer *et al.*, 1983).

Les cyanobactéries, cyanophycées, ou algues bleues, constituent le tournant le plus important de l'évolution du vivant : l'invention de la photosynthèse oxygénique, qui a permis l'utilisation de l'eau comme source des électrons nécessaires à la construction du vivant. Les cyanobactéries sont capables de proliférer rapidement et de former des efflorescences ou blooms. La prolifération des cyanobactéries est très fréquente dans les eaux calmes comme les eaux des barrages qui sont caractérisées par une grande stabilité de leurs colonnes d'eau. Ces cyanobactéries synthétisent une très grande variété de molécules toxiques appelées cyanotoxines. Ces toxines sont responsables d'intoxications humaines et animales, parfois mortelles. Plusieurs études révèlent le potentiel cancérigène des cyanotoxines dans le cas d'une exposition à long terme (Zhou *et al.*, 2002).

En Algérie, plusieurs retenues de barrages et de lacs naturels évoluent rapidement vers l'eutrophisation suite à une productivité accrue stimulée continuellement par les apports de fertilisants et un changement de climat de plus en plus sec (Bouaïcha, 2002) et des cyanobactéries toxiques ont été également identifiées dans plusieurs plans d'intérêt socio-

économique (Branes *et al.*, 2007 ; Nasri *et al.*, 2007 ; Guellati *et al.*, 2017 ; Saoudi *et al.*, 2017 ; Touati *et al.*, 2019).

Ce travail consiste à l'étude de l'état trophique, des cyanobactéries et des toxines dans du barrage Taghrist situé dans la wilaya de Khenchela.

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres :

- le premier chapitre comprend une étude bibliographique sur les caractéristiques les plus importantes des cyanobactéries en général et des cyanobactéries toxiques et de leurs toxines en particulier ainsi que des résultats des études antérieurs des cyanobactéries en Algérie ;
- la deuxième chapitre représente le matériel utilisé et les méthodes suivies dans les différentes manipulations ;
- le troisième chapitre illustre des résultats obtenus et leur discussion ;

et enfin une conclusion et des perspectives.



Chapitre 1.
Synthèse bibliographique



1. Généralités sur les cyanobactéries

1.1. Apparition des cyanobactéries

Les cyanobactéries, ou algues bleu-vert, font partie des plus vieux organismes apparus sur terre. Cependant, la datation des premiers fossiles cyanobactériens est sujette à controverse. Selon les premières datations, les cyanobactéries seraient apparues il y a plus de 3 milliards d'années (Fay, 1983), tandis que des publications plus récentes indiquent que leur apparition s'est faite il y a 2,7 milliards d'années (Lee, 2008). On peut cependant affirmer que l'apparition massive d'oxygène (O₂) dans l'atmosphère a eu lieu il y a 2,4 milliards d'années, grâce à l'activité photosynthétique de cyanobactéries primitives (Falkowski et Knoll, 2007).

Les plus anciennes preuves fossiles de cyanobactéries remontent donc à 1,78–1,68 Gyr et ~2,15 Gyr (Knoll *et al.*, 2006 ; Hofmann, 1976), respectivement. Ces résultats éliminent les preuves de la photosynthèse oxygénée il y a ~2,7 Gyr et excluent les preuves antérieures de biomarqueurs pour un long délai (~300 millions d'années) entre l'apparition de cyanobactéries productrices d'oxygène et l'augmentation de l'oxygène atmosphérique il y a 2,45–2,32 Gyr grâce à l'activité photosynthétique de cyanobactéries primitives (Falkowski et Knoll, 2007).

1.2. Description générale des cyanobactéries

1.2.1. Morphologie des cyanobactéries

Les cyanobactéries sont considérées comme les groupes les plus primitifs de procaryotes photosynthétiques (Bullerjahn et Post, 2014). Elles sont communément appelées algues bleu-vert, considérées comme les algues les plus simples, mais ce ne sont pas de vraies algues. Elles diffèrent des autres bactéries Gram négatives par l'absence de molécules de détection de quorum, telles que l'autoinducteur-2 et acyl-homosérine lactones. Ils contiennent des ribosomes 70 S plutôt que 80 S.

Les cellules cyanobactériennes varient en taille de 0,5-1 µm à 40 µm de diamètre. Morphologiquement, elles présentent une diversité morphologique importante (Figure 1). En effet on les retrouve :

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

- ✓ soit sous forme unicellulaire isolée ou en colonies;
- ✓ soit sous forme de trichome qui correspond à un enchaînement de cellules (thalle) sans gaine (Afssa, 2006) ;
- ✓ soit sous forme de filament qui est un thalle avec gaine (Carmichael, 1994).

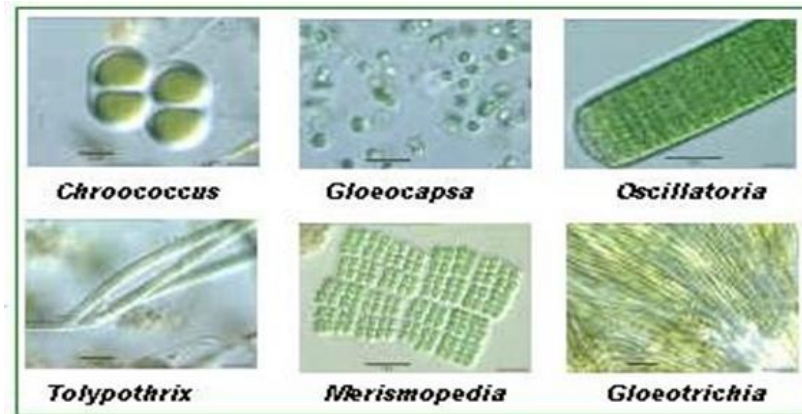


Figure 1. La diversité morphologique des cyanobactéries.

Les cyanobactéries sont généralement distinguées en fonction de leurs caractéristiques morphologiques (taille des cellules, présence de gaine, couleur). Cependant, ces caractéristiques peuvent varier en fonction des conditions environnementales, ce qui peut rendre l'identification des espèces difficile. Celle-ci peut cependant être aidée par la présence ou non d'hétérocystes (Figure 2), cellules permettant la fixation de l'azote atmosphérique et donc conférant aux cyanobactéries la possibilité de se développer dans des milieux appauvris en azote inorganique.

Un autre type de cellule peut être observé, il s'agit d'akinètes. Ce sont des cellules de grande taille, à paroi épaisse et riche en réserves nutritionnelles. Les akinètes sont des formes de résistance qui permettent la survie des cyanobactéries sur les sédiments lorsque les conditions environnementales sont défavorables à leur maintien dans la colonne d'eau (Figure 2).

Les cyanobactéries possèdent également des vacuoles de gaz qui leur permettent d'ajuster leur position dans la colonne d'eau en régulant leur flottaison. Ainsi dans la journée les cellules migrent en surface pour profiter au mieux de l'énergie lumineuse, alors que le soir elles vont plutôt avoir tendance à migrer en profondeur afin d'exploiter les nutriments qui s'y trouvent souvent en plus grande concentration. Cette variation de répartition est à prendre en compte lors de prélèvements (Afssa 2006 ; Lavoie *et al.*, 2007 ; Chorus et Bartram, 1999).



Figure 2. Trichome de cyanobactérie du genre *Anabaena* présentant un hétérocyste (H) et un akinète (A).

1.2.2. Cytologie

La taille des cellules varie de moins de 1 μm de diamètre (picoplancton) au de plus de 20 μm de longueur. Les cellules sont sous forme solitaire et/ou cellules spécialisées en grappe où la colonie peut atteindre un diamètre allant jusqu'à 100 μm (Geitler, 1932 ; Komárek, 1976). Certaines formes coloniales (par exemple, les espèces de *Microcystis*) produisent des accumulations massives dans les blooms de surface qui sont reconnaissables à l'œil nu.

L'étude d'une cyanobactérie au microscope électronique à transmission donne la structure cellulaire suivante :

Le cytoplasme contient :

- des ribosomes 70S
- des fibrilles d'ADN au centre de la cellule (centroplasma)
- des lamelles photosynthétiques (thylacoïdes) à la périphérie (chromatoplasme)
- des inclusions globulaires (glycogène, globules lipidiques), sphéroïdes (cyanophycine), polyédriques (polyphosphates) ou vésiculeuses (vacuoles gazeuses)

La cellule est entourée d'une paroi de peptidoglycane plus ou moins perforée, entourée dans certains cas d'une gaine supplémentaire.

Des expansions cytoplasmiques appelées pili peuvent exister (Jérémy, 2005).

- **Les inclusions**

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

Le cytoplasme renferme différents types d'inclusions :

- Carboxysomes : aussi appelés corps poly hydriques (Codd, 1988). Elles renferment principalement la ribulose-biphosphate carboxylase, enzyme responsable de la fixation du dioxyde carbone ;
- Glycogène : produit grâce à une activité photosynthétique importante (Stanier, 1978) et manque d'azote, le glycogène est stocké sous forme de granules (Castenholz et Waterbury, 1989) ;
- Cyanophycine : granule composée essentiellement d'arginine et d'acide aspartique (Kromkamp, 1987). Elle peut constituer jusqu'à 10% de la masse cellulaire ;
- Polyphosphate : les phosphates sont stockés sous forme de polyphosphate aussi appelés granules de volutine. Baxter et Jensen (1980) pensent que les granules des polyphosphates pourraient jouer un rôle important dans le stockage de métaux lourds ;
- Globules lipidiques : les globules lipidiques ou granules P sont composées de polymères d'acides gras du type PHA (polyhydroxyalcanoates). Ces granules correspondent à des réserves de carbone et d'énergie (Stal, 1992).

- **Les vacuoles gazeuses**

Appelée aussi airosome, une vacuole gazeuse est composée de vésicules gazeuses ou de tubes cylindriques creux à bouts coniques. Elle permet à l'algue bleue de flotter et elle peut se rencontrer dans le cytoplasme de toutes les cyanobactéries à l'exception des espèces de la famille des Chamaesiphonacées, algues bleues exclusivement benthiques. La membrane délimitant ces vacuoles gazeuses est assez rigide et n'est pas de nature lipoprotéique : elle n'est constituée que de protéines disposées en spirale autour de la vésicule. Elle est imperméable à l'eau et perméable aux gaz. Son contenu est gazeux à la pression d'une atmosphère et doit rester toujours en équilibre avec le milieu environnant (Jérémy, 2005).

- **Paroi**

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

La paroi comprend quatre assises appelées L1, L2, L3, L4 de l'intérieur vers l'extérieur de la cellule à partir de la membrane plasmique. L2 est une couche de muréine (peptidoglycane) et L4 est une membrane semblable à la membrane plasmique, similitude avec la paroi d'une bactérie à coloration Gram négative. Les deux assises les plus internes, L1 et L2, sont les mêmes chez toutes les algues bleues. La présence de pores ou de perforations dans la couche peptidoglycanique de la paroi des cyanobactéries filamenteuses fut mise en évidence en 1955. Leur rôle est de faciliter les échanges entre cellules du filament (perforations transversales) et avec le milieu extérieur (pores de jonction, pores intercalaires). D'autre part, la disposition et le nombre de ces pores ou perforations est un bon critère pour la détection systématique (Jérémy, 2005).

- **Gaine**

La gaine est située à l'extérieur de la paroi. Elle est fibrillaire. Son rôle est de protéger les cellules de la dessiccation mais aussi de favoriser la mobilité des trichomes par glissement à l'intérieur de la gaine (Jérémy, 2005).

- **Les cellules particulières**

Trois modèles de cellules peuvent être rencontrés chez les cyanobactéries.

- ✓ **Les cellules végétatives**

Les cellules végétatives renferment des vacuoles à gaz (aérotopes) très réfringentes (responsables de la flottabilité des thalles qui en possèdent) et de couleur très diverse, conséquence des teneurs respectives en pigments photosynthétiques tels que, la chlorophylle a (vert), la phycocyanine (bleu), la phycoérythrine (rouge) (Frémy et Lassus, 2001).

- ✓ **Les hétérocytes (H)**

Cellules différentes des autres, faciles à reconnaître grâce à leur paroi épaisse et à leur contenu semblant vide (Leitão et Couté, 2005). Leur forme est cylindrique, sphérique, voire conique (Frémy et Lassus, 2001).

Les hétérocytes peuvent également se présenter solitaires ou en série. Le principale

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

rôle des hétérocytes est d'assurer la fixation de l'azote atmosphérique, grâce à une enzyme (nitrogénase) (Leitão et Couté, 2005) pour le transformer en azote assimilable par la cellule (Frémy et Lassus, 2001).

✓ **Les akinètes (A)**

Les akinètes sont des cellules généralement plus grandes. Leur paroi est très épaisse et peut être colorée et ornementée (Frémy et Lassus, 2001) et leur contenu très riche en granules de réserves, les rendent faciles à distinguer (Leitão et Couté, 2005).

Les akinètes sont résistantes à la chaleur et à la sécheresse, et elles permettent donc à la cyanobactérie de survivre pendant les périodes défavorables.

1.2.3. Division cellulaire et reproduction

Le seul moyen de reproduction chez les cyanobactéries est asexué. Les moyens importants de la reproduction asexuée comprennent la formation d'hormogonies, la fragmentation des trichomes, les endospores ou formation d'akinètes et formation d'exospores. Les formes filamenteuses se reproduisent par le trichome fragmentation, ou par formation d'hormogonies spéciales.

Les cellules se divisent principalement par une simple fission binaire, dans laquelle la paroi cellulaire se projette dans le protoplaste et la cellule se divise en deux cellules filles isomorphes ou (moins fréquemment) asymétriques. Ce processus procède par l'une des deux méthodes (Drews et Weckesser, 1982). En général, la division cellulaire peut se produire dans un, deux ou trois plans plus ou moins perpendiculaires les uns aux autres au cours des générations successives. Ce processus est régulièrement répété et caractéristique des différents génotypes (genres et familles). Un type particulier de cette division cellulaire est une fission binaire asymétrique facultative dans des genres simples, parfois dans des conditions sous-optimales, comme on le voit chez certains membres des Synechococcaceae et des Chamaesiphonaceae (Waterbury et Stanier, 1977 ; Rippka *et al.*, 1979) ; ou régulièrement asymétrique dans la partie supérieure des cellules polarisées (par exemple, *Stichosiphon* ; Montejano *et al.*, 1997).

La division cellulaire chez les cyanobactéries filamenteuses se déroule de la même manière que chez les formes coccoïdes, généralement perpendiculaires à l'axe des trichomes.

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

Parmi les membres des ordres à véritable ramification, la division peut se dérouler sur plusieurs plans. La reproduction peut se faire par des cellules solitaires, qui sont libérées par plusieurs types d'espèces filamenteuses (par exemple, *Rexia*, *Aetokthonos*) ou par fragmentation d'un filament et d'un thalle. Cependant, le mode de reproduction le plus fréquent est la fragmentation, formant des segments distincts de trichomes, appelés hormogonies. La fragmentation en hormogonie est simple dans les genres plus primitifs des Synechococcales filamenteux (classés auparavant comme Pseudanabaenaceae), où les trichomes se désintègrent entre les cellules voisines via la formation de fines lamelles sans cellules nécridiqes. Dans les taxons filamenteux plus complexes, les hormogonies se séparent au site de production des cellules nécridiqes (Microcoleaceae et Oscillatoriaceae). L'hormogonie peut être de longueur variable, allant de courts filaments de plusieurs cellules à des fragments de cellules individuelles (Anagnostidis et Komárek 1988). Les hormogonies plus longues sont parfois mobiles et peuvent contenir des vésicules de gaz (par exemple, chez *Fischerella*). Les fragments de filaments gainés sont appelés hormocytes. Les Akinètes peuvent également servir à la reproduction (Briand, 2008).

1.2.4. Pigments Photosynthétiques

Les caractéristiques de base de la photosynthèse chez les cyanobactéries ont été bien décrites (Ormerod, 1992). Les cyanobactéries sont des phototrophes oxygéniques possédant deux types de centres de réaction, PS I et PS II, dans leur appareil photosynthétique. La capacité pour une croissance photo-synthétique continue en présence d'oxygène, ainsi que d'avoir l'eau comme donneur d'électrons pour la réduction du CO₂, permet aux cyanobactéries de coloniser un large éventail de niches écologiques (Whitton, 1992). La synthèse des phycobiliprotéines est particulièrement sensible aux influences environnementales, en particulier la qualité de la lumière. L'adaptation chromatique est largement attribuable à une modification du rapport entre la phycocyanine et la phycoérythrine dans les phycobilisomes. Ainsi, les cyanobactéries sont capables de produire le pigment accessoire nécessaires pour absorber la lumière plus efficacement dans l'habitat dans lequel ils sont présents (Mur *et al.*, 1999).

La réalisation de la photosynthèse met en jeu un ensemble de pigments photosynthétiques. Les cyanobactéries synthétisent plusieurs types de pigments qui sont : la chlorophylle a, les caroténoïdes et des phycobiliprotéines ou pigments accessoires tels que

la phycocyanine, la phycoerythrine et l'allophycoyanine.

Cette composition en pigments, spécifique des cyanobactéries, leur permet d'exploiter le rayonnement solaire disponible sur une plus grande étendue de longueurs d'ondes, comparé aux autres algues, ainsi la photosynthèse est plus efficace même à faible intensité lumineuse (Lavoie *et al.*, 2007). Les pigments photosynthétiques des cyanobactéries sont situés dans les thylakoïdes libres dans le cytoplasme près de la périphérie cellulaire. La couleur des cellules varie du bleu-vert au violet-rouge. Les pigments sont incorporés dans les phycobilisomes, que l'on trouve dans rangées sur la surface externe des thylakoïdes (Douglas, 1994). Toutes les cyanobactéries contiennent chlorophylle a et phycoyanine.

1.3. Ecologie

1.3.1. Une bactérie ubiquitaire

On retrouve les cyanobactéries dans la plupart des environnements communs: en eau douce (principalement dans les lacs), sur les littoraux, dans les mers, dans l'air, sur les sols humides et même dans les roches (p. ex. les récifs coralliens) (Reviere, 2003). Les cyanobactéries sont également capables de s'imposer au sein de milieux aux conditions plus extrêmes (Castenholz, 2001). Des espèces comme *Phormidium laminosum* tolèrent des températures de 70°C (Reviere, 2003), d'autres espèces ont été retrouvées sur des surfaces rocheuses de régions désertiques (Yeager *et al.*, 2007), ou encore dans des lacs à salinité élevée ou même hypersalins (Dillon, 2009). C'est leur capacité à résister à la dessiccation qui leur permet de croître dans ces milieux (Castenholz, 2001). Des cyanobactéries sont également présentes dans certains lacs des régions polaires, notamment en Antarctique, où les températures sont très basses (Jungblut, 2006).

1.3.2. Symbiose

Certaines cyanobactéries, du genre *Nostoc* en général, sont impliquées dans des

symbioses avec une large variété d'organismes: des champignons (formation des lichens), des plantes (p. ex. avec famille des bryophytes), des éponges, ou encore des protistes (Adams et Duggan, 2008). Les cyanobactéries fournissent à ces hôtes de l'azote et des carbones fixés (provenant réciproquement du N₂ et du CO₂) (Adams et Duggan, 2008 ; Lee, 2008).

2. Classification des cyanobactéries

2.1. Classification morphologique

Les cyanobactéries présentent la plus grande diversité morphologique chez les organismes procaryotes. Leur classification taxonomique est principalement basée sur des caractères morphologiques (Komárek, 2006). Selon la taxonomie classique, les cyanobactéries forment un taxon monophylétique qui peut être divisé en 5 groupes (ordres) comprenant environ 150 genres et approximativement 2000 espèces (Castenholz, 2001). Les deux premiers groupes, comprenant les cyanobactéries unicellulaires, se différencient par leur mode de division cellulaire: les espèces du groupe **I** se reproduisent par fission binaire alors que celles du groupe **II** se divisent par fission multiple. Les groupes **III**, **IV**, et **V** sont constitués des cyanobactéries filamenteuses. Les cyanobactéries formant des filaments simples non ramifiés et sans cellules spécialisées forment le groupe **III**. Les espèces incluses dans les groupes **IV** et **V** possèdent quant à elles des cellules spécialisées (hétérocystes et akinètes) (Figure 3) et ont le potentiel de fixer l'azote atmosphérique. Ces deux groupes sont différenciés par la présence de vraies ramifications chez les cyanobactéries du groupe **V** alors que les espèces du groupe **IV** n'ont que des fausses ramifications (Castenholz, 2001) (Figure 3). Cette classification taxonomique surtout basée sur les caractéristiques morphologiques et écologiques est la plus simple et la plus facile à utiliser pour des biologistes et des gestionnaires en environnement. Au cours des dernières décennies, la taxonomie des cyanobactéries a cependant été révisée sur la base de leur ultrastructure et leur phylogénie en tenant compte des nouvelles approches encore stabilisée et reste en évolution.

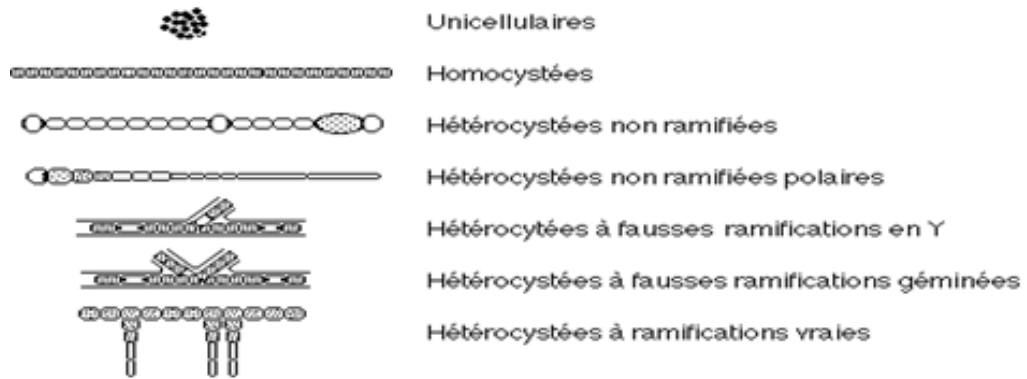


Figure 3. Différents types morphologiques de cyanobactéries

2.2. Classification moderne des cyanobactéries

Les classifications moléculaires basées sur l'ADNr 16S sont encore assez controversées et les informations ne sont pas suffisantes pour délimiter l'embranchement des cyanobactéries (Castenholz, 2001). La combinaison à la fois des approches moléculaire et morphologique pour la taxonomie moderne des cyanobactéries est donc indispensable. Récemment Komárek *et al.*, (2014) ont proposé une classification des cyanobactéries organisée en huit ordres. Cette dernière classification repose sur une approche polyphasique faisant appel à des informations moléculaires, biochimiques et microscopiques (Figure 4).

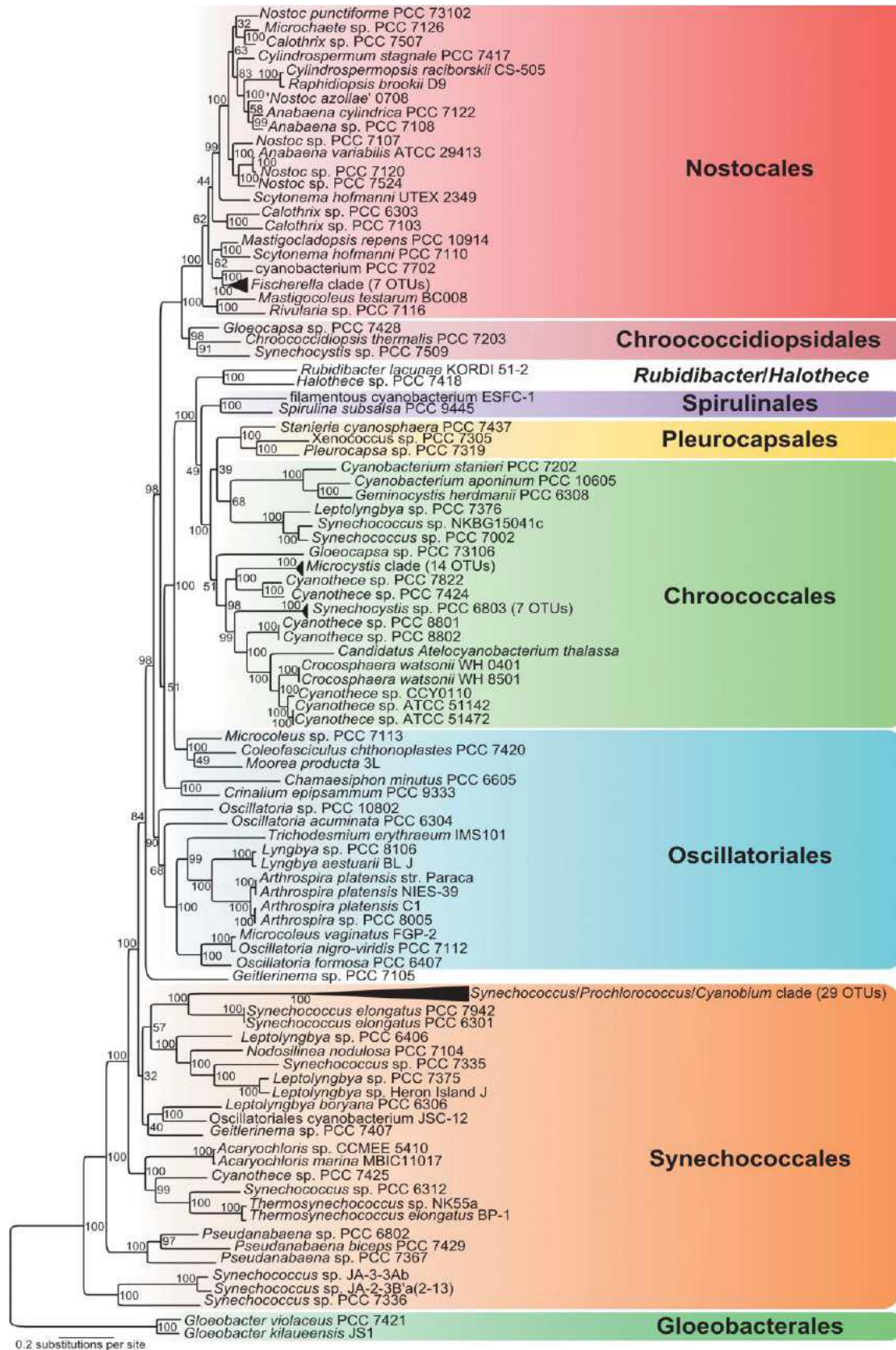


Figure 4. Arbre phylogénétique basé sur 21 protéines conservées comprenant les plus récents changements dans la classification des cyanobactéries (Komárek *et al.*, 2014).

3. Conditions de développement

3.1. Dynamique temporelle de prolifération des cyanobactéries

Les algues bleues sont présentes toute l'année dans les lacs mais ne forment habituellement de véritables blooms qu'à la fin de l'été ou au début de l'automne (Reynolds, 1975 ; Reynolds *et al.*, 1981). Toutefois, malgré la saison froide, les mois de février, mars et avril présentent une densité non négligeable et même comparable à celle de la saison chaude, ceci est dû probablement à la capacité de certains genres à s'adapter et même proliférer en cette période de l'année (Wasmund, 1997).

3.2. Facteurs environnementaux et caractéristiques physiologiques des cyanobactéries favorisant leur dominance

3.2.1. 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. 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.

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). L'étude classique de Ganf et Oliver (1982) a démontré la capacité qu'ont les cyanobactéries de traverser la barrière de densité que représente une thermocline, lors d'une expérience réalisée au lac Okaro en Nouvelle-Zélande, les colonies de grande taille de *Microcystis* pouvaient migrer à une vitesse de 50 m par jour (Walsby et McCallister, 1987).

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 (Ishikawa *et al.*, 2002).

3.2.2. Nutriments

La fixation d'azote gazeux est un atout de taille pour la croissance cellulaire lorsque le milieu est pauvre en azote. En zone anoxique, les cyanobactéries peuvent également utiliser l'ammonium (NH_4^+) produit là où la décomposition bactérienne et la dissimilation du nitrate vers l'ammonium sont actives. Contrairement à plusieurs algues, les cyanobactéries peuvent entreposer des quantités importantes d'azote lorsqu'il est en excès. Les cyanobactéries peuvent également faire des réserves de phosphore sous forme de granules de polyphosphates. Il semble plutôt que l'avantage compétitif des cyanobactéries à l'égard du phosphore soit associé (1) à leur capacité de migration leur permettant de profiter des sources de phosphore dans les couches profondes de la colonne d'eau, et (2) à leur capacité d'entreposage des nutriments.

3.2.3. 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 et Zohary, 1987), bien qu'elles soient capables de tolérer et de survivre à des températures bien plus basses (Briand, 2001).

3.2.4. pH et sources de carbone

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 (Bote, 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).

3.2.5. Prédation

Les cyanobactéries ne sont pas la source de nourriture préférée du zooplancton. En effet, en plus de la production de toxines, les cyanobactéries peuvent sécréter 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 (Smayda, 1997). Les substances allélopathiques se distinguent des cyanotoxines puisqu'elles sont des métabolites secondaires. Les cyanobactéries évitent également la prédation par le zooplancton en se groupant en colonies trop volumineuses pour être ingérées (qui dépend de la longueur des filaments ; Chan *et al.*, 2004).

4. Toxines et cyanobactéries toxiques

Les cyanobactéries peuvent produire une grande variété de métabolites secondaires, dont des toxines (cyanotoxines) (Funari et Testai, 2008). On évalue à 40 le nombre de genres cyanobactériens producteurs de cyanotoxines (Van Apeldoorn *et al.*, 2007).

Ces molécules de diverses natures chimiques (petits peptides, alcaloïdes, ou lipopolysaccharides) sont classées habituellement selon leur mode d'action en trois catégories : les hépatotoxines (i.e. microcystines, nodularines, cylindrospermopsines), les neurotoxines (e.g. anatoxines, saxitoxines et la β -N-méthylamino-L-alanine ou BMAA) et les dermatotoxines (e.g. lyngbyatoxine A, aplysiatoxines) (Chorus et Bartram, 1999 ; Merel *et al.*, 2013).

Les toxines de cyanobactéries sont essentiellement des endotoxines, qui peuvent être libérées dans le milieu à la suite d'une lyse cellulaire (Codd *et al.*, 1989), lorsque les cellules vieillissent ou à la suite d'un traitement algicide qui les fait éclater (Kenefick *et al.*, 1993).

4.1. Toxines des cyanobactéries

4.1.1. Les hépatotoxines

Les hépatotoxines des cyanobactéries sont plus abondantes et plus fréquemment impliquées dans les intoxications (Sivonen et Jones, 1999) et peuvent être divisées en deux groupes : des peptides cycliques de faible poids moléculaire, microcystines et la nodularine, et un composé de structure alcaloïdique, la cylindrospermopsine. Les hépatotoxines de structure peptidique sont les toxines les plus fréquemment impliquées dans les intoxications. Elles sont synthétisées entre autre par certaines espèces de *Microcystis*, *Nodularia*, *Anabaena*, *Nostoc*, *Oscillatoria* et *Planktothrix* (Carmichael, 1994 ; Falconer, 1996 ; Sivonen et Jones, 1999).

a. Les microcystines

Au sein des hépatotoxines, les microcystines (MCs) sont les toxines les plus fréquemment rencontrées lors des blooms de cyanobactéries (Carmichael, 1992 ; Sivonen et Jones, 1999 ; Neilan *et al.*, 2013).

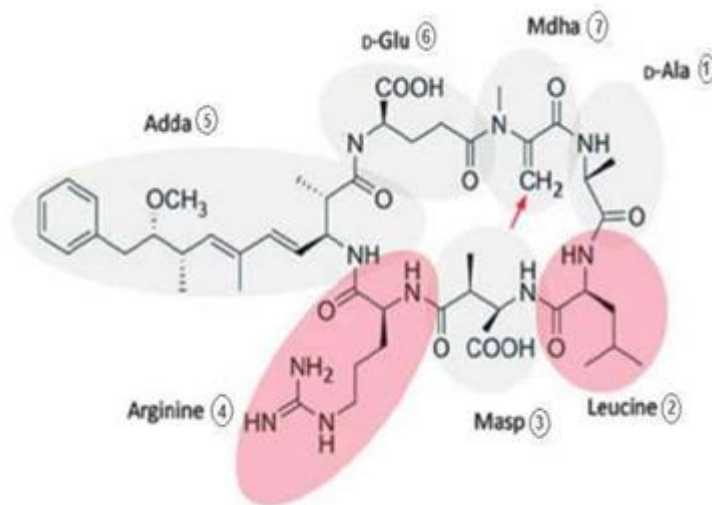


Figure 5. Structure chimique des microcystines. Les résidus stables et variables sont indiqués par des ellipses grises et roses respectivement (Pereira *et al.*, 2013).

Les MCs sont des heptapeptides cycliques dont la structure chimique est très variable. Ces variations touchent principalement les acides aminés (AA) Leucine et Arginine en position 2 et 4 respectivement (Figure 5) (Van Apeldoorn, 2007). Puddick *et al.*, (2014) et Niedermeyer *et al.*, (2015) ont rapporté qu'il existerait plus de 200 variantes des MCs. Par

ailleurs, la microcystine-LR est la variante la plus toxique, c'est la raison pour laquelle l'OMS a établi une valeur guide maximale de 1 µg L⁻¹ de MC-LR dans l'eau potable (WHO, 2003). Les MCs agissent comme des inhibiteurs spécifiques des protéines phosphatases 1 (PP1) et 2A (PP2a) (MacKintosh *et al.*, 1990). Ces molécules sont promotrices de tumeurs, des perturbateurs endocriniens et immunotoxiques avec des niveaux de toxicité variables (Messineo *et al.*, 2006).

La biosynthèse de ces métabolites secondaires se fait par voie non ribosomale avec l'implication d'un complexe enzymatique multifonctionnel codés par le cluster de gènes *mcy* constitué de gènes qui codent pour des peptides synthétases non ribosomales (NRPS), des peptides polyketide synthétases (PKS) et des enzymes de finalisation des queues peptidiques (Figure 6) (Tillett *et al.*, 2000).

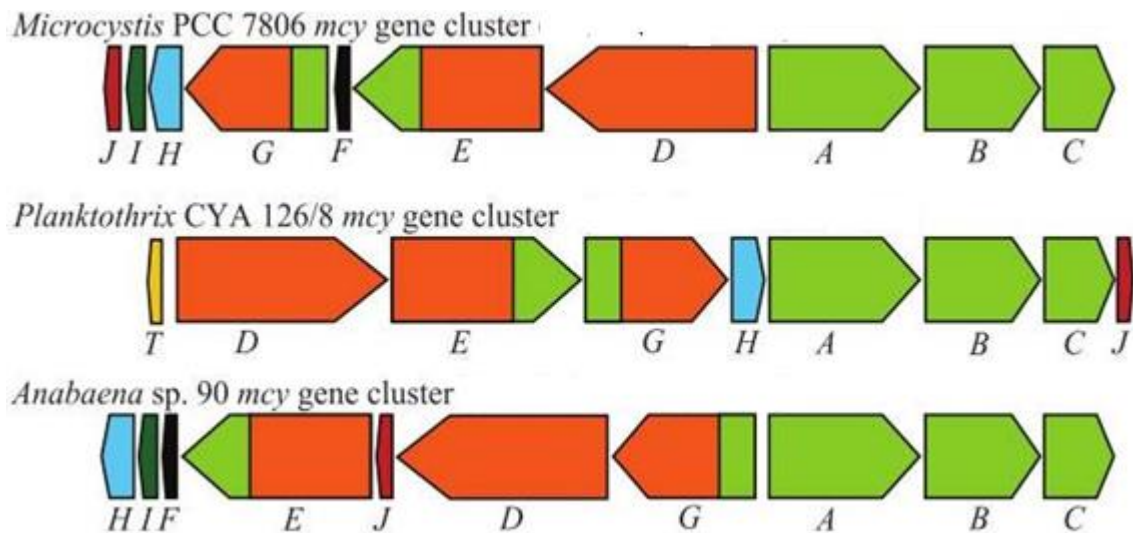


Figure 6. Représentation schématique du cluster de gènes *mcy* des genres *Microcystis*, *Planktothrix* et *Anabaena*. Les NRPS, PKS et les gènes impliqués dans la synthèse des enzymes de finalisation des queues peptidiques sont indiqués en vert clair, orange et autres couleurs, respectivement.

b. Nodularine

La nodularine, produite essentiellement par *Nodularia spumigena*, est un pentapeptide cyclique de structure D-MeAsp¹-L-Arg²-Adda³-D-Glu⁴-Mdhb⁵ (Figure 7). Sa structure contient la N-méthyldéhydrobutyrine (Mdhb) et l'acide aminé Adda caractéristique des MCs. La DL50 de cette toxine varie entre 50 et 70 mg/kg (Runnegar *et*

al., 1988) L'action de la nodularine est identique à celle des MCs par inhibition des PP1, PP2A et PP3. Elle inhibe préférentiellement la PP2A, puis à un même niveau la PP1 et la PP3 (Carmichael et Falconer, 1993). La nodularine a montré des capacités à la fois d'initiateur et de promoteur de tumeurs, alors que la MC-LR est considérée seulement en tant que promoteur tumoral (Ohta *et al.*, 1992).

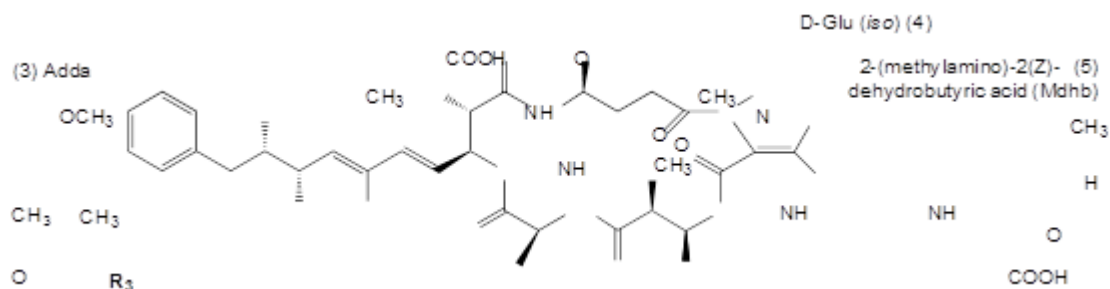


Figure 7. Structure chimique des nodularines.

c. Les cylindrospermopsines

Les cylindrospermopsines (CYNs) sont des hépatotoxines alcaloïdes guanidiques, produites par un certain genre de cyanobactéries (Metcalf et Codd, 2012). Actuellement, cinq analogues de CYNs sont connus, à savoir CYN, 7-epi-CYN et 7-deoxy-CYN (Figure 8) et les deux congénères récemment caractérisés, 7-désoxydesulfo-CYN et 7-désoxydesulfo-12-acétyl-CYN (Wimmer *et al.*, 2014).

Le CYN est un puissant inhibiteur de la synthèse des protéines. Terao *et al.* (1994) ont décrit le foie comme sa cible principale, avec quatre phases consécutives de changements pathologiques : inhibition de la synthèse protéique, membrane prolifération, accumulation de gouttelettes de graisse et mort cellulaire. Globalement, la CYN apparaît comme une molécule toxique à large spectre. Elle affecte divers organes et voies métaboliques, directement ou après une modification métabolique.

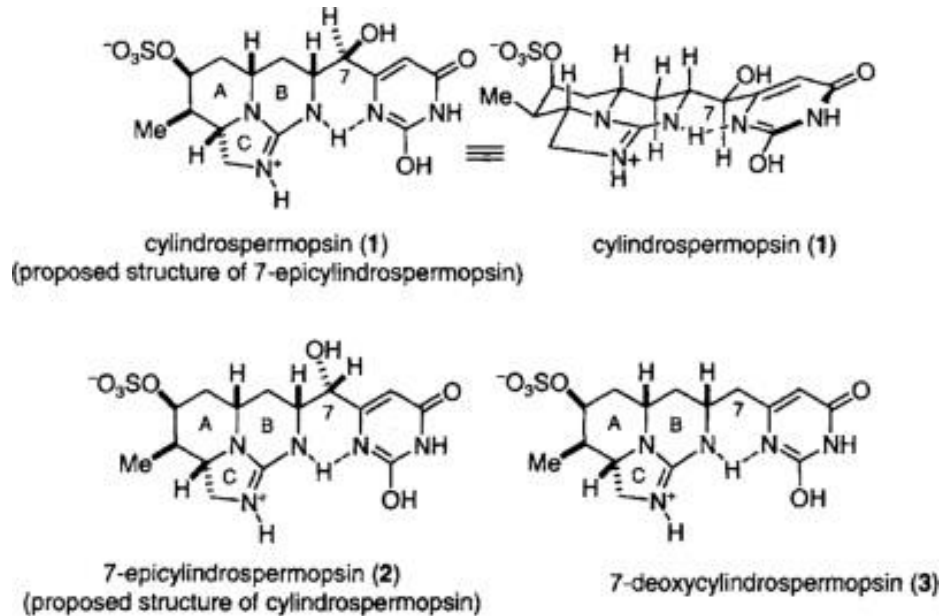


Figure 8. Structures des CYNs.

4.1.2. Les neurotoxines

Les neurotoxines, un groupe d'alcaloïdes, rassemblent deux familles : la première comprend trois anatoxines dont l'anatoxine-a, l'homoanatoxine-a et l'anatoxine-a(s) qui sont spécifiques des cyanobactéries, la seconde est celle des aphantoxines (saxitoxine et néosaxitoxine) produites surtout par les genres *Anabaena* et *Aphanizomenon*. Elles sont aussi biosynthétisées par les Dinoflagellés en milieu marin et qui sont responsables de l'intoxication Paralytique par les Fruits de mer (IPFM) ou Paralytic Shellfish Poisoning des Anglo-Saxons (PSP) (Carmichael, 1994 ; Falconer, 1996 ; Falconer, 1999 ; Kaebernick et Neilan, 2001).

a. Les anatoxines

Les anatoxines déclenchent une stimulation excessive des muscles squelettiques et respiratoires puis une paralysie progressive. La mort intervient en quelques minutes à quelques heures par arrêt respiratoire. Leur toxicité est assez importante, puisque leur DL50 chez la souris (par voie intra-péritonéale) est de 20 pg/kg pour l'anatoxine-a(s) et de 200 mg/kg pour l'anatoxine-a (Falconer, 1996 ; James *et al.*, 1997).

L'anatoxine-a est essentiellement synthétisée par *Anabaena flos-aquae*, *A. spiroides*, *A. circinalis* (Bruno *et al.*, 1994 ; James *et al.*, 1997) et moins fréquemment par d'espèces des

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

genres *Oscillatoria* (Edwards *et al.*, 1992), *Aphanizomenon* (Rapala *et al.*, 1993), *Cylindrospermopsis* et *Trichodesmium* (Carmichael *et al.*, 1997), *Arthrospira* (Ballot *et al.*, 2017), *Raphidiopsis* (Namikoshi *et al.*, 2003), *Planktothrix* (Viaggiu *et al.*, 2004) et *Phormidium* (Gugger *et al.*, 2005).

L'homoanatoxine-a produite par *Oscillatoria formosa* (Skulberg *et al.*, 1992). Des études électro-physiologiques ont mis en évidence l'action inhibitrice de cet alcaloïde sur la transmission neuromusculaire au niveau des muscles respiratoires chez les mammifères (Lilleheil *et al.*, 1997). A la suite d'une activation des canaux voltage dépendant de type L- Ca^{2+} , l'homoanatoxine-a stimule la libération de l'acétylcholine au niveau de la terminaison nerveuse (Holte *et al.*, 1998).

L'anatoxine-a(s) est produite principalement par *Anabaena flos-aquae* et *Anabaena lemmermanii* (Henriksen *et al.*, 1997 ; Onodera *et al.*, 1997) et se distingue de l'anatoxine-a par un profil d'activité plus muscarinique. Elle agit indirectement par inhibition de la dégradation de l'acétylcholine par l'acétylcholinestérase. Le neuromédiateur reste attaché à ces récepteurs et stimule les muscles respiratoires qui finissent par cesser de fonctionner (Carmichael, 1994 ; Onodera *et al.*, 1997).

b. Les aphantoxines

Les aphantoxines sont des neurotoxines paralytiques (IPFM ou PSP) tels que la saxitoxine et la néosaxitoxine. Elles ont été identifiées pour la première fois en milieu d'eau douce dans une souche d'*Aphanizomenon flos-aquae* (Mahmood et Carmichael, 1986 ; Haney *et al.*, 1995 ; Pereira *et al.*, 2000). Elles sont aussi synthétisées par d'autres espèces : *Anabaena circinalis* (Humpage *et al.*, 1994), *Lyngbya wollei* (Onodera *et al.*, 1997), *Cylindrospermopsis raciborskii* (Lagos *et al.*, 1999) et *Planktothrix* sp. (Pomati *et al.*, 2000).

Leur poids moléculaire varie de 258 à 491 Da. La saxitoxine et la néosaxitoxine inhibent également la transmission de l'influx nerveux au niveau des jonctions neuromusculaires par blocage des canaux sodiques. Elles inhibent ainsi la transmission de l'activité électrique et empêchent la libération de l'acétylcholine (Carmichael, 1994). Leur toxicité est plus importante que celle des anatoxines avec une DL50 dans les mêmes conditions de 10 µg/kg (Henriksen *et al.*, 1997).

4.1.3. Autres composés toxiques

a. Les cytotoxines

Une cytotoxicité a été démontrée pour un certain nombre de substances extraites de cyanobactéries : la scytophycine, les hapalindoles, l'acutiphycine et la 20, 21-dihydroacutiphycine (Gleason et Wood, 1987).

b. Les dermatotoxines

Les dermatotoxines sont des molécules qui ont des effets irritants. Elles sont des lipopolysaccharides (LPS) et des alcaloïdes dermatotoxiques (Sivonen et Jones, 1999). Il existe plusieurs variantes de LPS. Ceux-ci provoquent des irritations, des réactions allergiques et même des problèmes gastro-intestinaux. Ces effets n'ont jamais été reproduits expérimentalement et le mécanisme d'action précis des LPS des cyanobactéries n'est pas connu (Funari et Testai, 2008).

Les alcaloïdes dermatotoxiques comprennent trois toxines : l'aplysiatoxine, la débromoaplysiatoxine et la lyngbyatoxine. Jusqu'à présent, ce groupe de toxines n'a été détecté que dans des milieux marins. L'aplysiatoxine et la débromoaplysiatoxine sont des phénols bilactones. Elles sont de puissants agents inflammatoires et s'avèrent des activateurs de la protéine kinase C et des promoteurs de tumeurs (Sivonen et Jones, 1999). L'aplysiatoxine a une DL50 i.p. 24h de 100-120 µg/kg p.c. chez des souris (Funari et Testai, 2008).

4.2. Facteurs influençant la production des cyanotoxines

Des paramètres environnementaux physicochimiques ou biologiques influencent la synthèse et la libération des cyanotoxines.

4.2.1. Facteurs physicochimiques

Différents facteurs physicochimiques ont des effets sur la synthèse et la libération des cyanotoxines. Ces facteurs abordés dans la littérature sont les suivants : phosphore, azote, fer, pH, température et luminosité.

a. Phosphore

Le phosphore est un facteur important à considérer pour la synthèse des cyanotoxines, car il s'agit du facteur qui contribue le plus à la prolifération des cyanobactéries. En milieu naturel, le phosphore est le principal élément limitant (Van Coillie, 2011).

b. Azote

L'effet de l'azote sur la synthèse des cyanotoxines diffère selon qu'il s'agisse de souches de cyanobactéries fixatrices d'azote ou de souches non fixatrices d'azote (Pattanaik *et al.*, 2010).

c. pH

Selon Van der Westhuizen et Eloff (1985), la synthèse de MCs par *M. aeruginosa* est plus importante à des pH élevés ou faibles. Par contre, les travaux de Jaiswal *et al.* (2008) soutiennent que le pH n'a pas d'effet significatif sur la synthèse de toxines par *M. aeruginosa*. Les études qui ont traité à l'effet du pH sur la synthèse et l'excrétion des cyanotoxines sont très peu nombreuses dans la littérature scientifique et ne permettent pas de conclure sur l'effet du pH.

d. Température

La synthèse de toxines est plus élevée à des températures entre 18°C et 25°C alors que des températures basses (10°C) ou très élevées (30°C) diminuent la quantité de toxines produites (Sivonen et Jones, 1999).

e. Luminosité

Les résultats des études sur la relation entre l'intensité de la lumière et la production de cyanotoxines sont variables. Utkilen et Gjørlme (1992) ont aussi rapporté qu'au-delà d'un seuil maximal d'intensité lumineuse, variable selon les souches de cyanobactéries, une diminution de la synthèse des cyanotoxines a lieu.

4.2.2. Facteurs biologiques

a. Phase de croissance cellulaire

La majorité des études indiquent que les cyanobactéries synthétisent le maximum de toxines lorsqu'elles sont dans leurs conditions optimales de croissance (Kaebernick et Neilan, 2001).

b. Présence de compétiteurs et de prédateurs

La présence de prédateur comme le zooplancton induit une augmentation de la synthèse de MCs par *Microcystis* sp. selon l'étude réalisée par Jang *et al.* (2003). Ceci mène à une hypothèse, à savoir que les toxines sont synthétisées comme mécanisme de défense.

c. Facteurs génétiques

La variation de la quantité de MC synthétisée résulte de changements au niveau de la transcription des gènes qui codent pour cette toxine et subséquentement au niveau du nombre de copies d'ARN_m (Tillet *et al.*, 2001; Nishizawa *et al.*, 1999). Leurs travaux montrent que le nombre de transcriptions augmente sous des intensités lumineuses élevées et sous la lumière rouge tandis que la lumière bleue cause une diminution des transcriptions de ces gènes.

5. Travaux sur les cyanobactéries en Algérie

Des études menées dans les barrages et les lacs naturels, notamment dans le lac Oubeira et le barrage Cheffia (Est de l'Algérie), ont montré que ces milieux évoluent rapidement vers l'eutrophisation, suite à une productivité accrue stimulée en permanence par les apports d'engrais et un changement de climat de plus en plus sec.

5.1. Les cyanobactéries dans les lacs Oubeira, Tonga et de El Mellah

La dynamique des populations cyanobactériennes et les paramètres physico chimiques de l'eau de deux plans d'eau douce (les lacs Oubeira et Tonga) et un plan d'eau saumâtre (la lagune El Mellah) du Parc National d'El Kala (PNEK) a été étudié par Boussadia (2017) durant la période 2009 et 2010. Les teneurs maximales en chlorophylle (a)

Chapitre 1. Synthèse bibliographique

obtenues ont permis de considérer le lac Oubeira comme hypereutrophe, le lac Tonga mésotrophe et la lagune El Mellah eutrophe. La diversité en cyanobactéries est plus importante dans le lac Oubeira (25 espèces) que dans le Tonga (8 espèces) et la lagune El Mellah (5 espèces) ; parmi les cyanobactéries récoltées la majorité est susceptible de produire des toxines. Les espèces communes aux trois plans d'eau sont : *M. aeruginosa*, *Phormidium* sp. et *Chroococcus minutus*. Des corrélations significatives entre la densité des cyanobactéries, la température, le pH et la teneur en sels minéraux principalement l'azote ammoniacal et les orthophosphates ont été notées.

5.2. Les cyanobactéries dans le barrage de Cheffia

Une étude réalisée en 2004 par Nasri *et al.* (2007) a montré la dominance de l'espèce *M. novacekii*. La concentration des MCs dans l'eau brute, mesurée à l'aide du test d'inhibition de la protéine phosphatase de type 2A (PP2A), variait entre 50,8 et 28 886 µg/L et trois variantes de MCs ont été identifiées par Chromatographie en phase liquide avec spectrométrie de masse en tandem (LC/MS/MS) : MCYST-YR, la MCYST-LR et le stéréoisomère 6Z-Adda de MCYST-LR.

5.3. Cyanobactéries toxiques dans barrage d'Ain Zada

Selon Charifi *et al.* (2019), le réservoir d'Ain Zada abrite 5 genres. L'estimation de la fréquence des genres identifiés a montré la constance de *Planktothrix*, la régularité d'*Aphanizomenon*, *Pseudanabaena* et *Cylindrospermopsis* et la rareté du genre *Oscillatoria*. Le genre dominant *Planktothrix* est représenté exclusivement par *P. agardhii*. Les résultats de la caractérisation des cyanotoxines ont révélé la présence des MCs.



Chapitre 2. Matériel et méthodes



1. Site d'étude

1.1. Situation géographique

Le barrage de Tagharist est situé à environ 63 Km à l'Ouest du chef-lieu de la Wilaya de Khenchela. Il est localisé au piedmont Nord du Djebel Chélia et en amont immédiat, à environ 2 km au Sud du village de Yabous. La localité de Yabous est limitée comme suit :

- Au Nord : commune d'Oulad Fadel (wilaya de Batna) ;
- Au Sud : communes de Bouhmama et Inoughissene ;
- A l'EST : communes de Taouzianet et Chelia ;

- A l'Ouest : communes de Fom El Toub et Ichemoul (wilaya de Batna). Le barrage de Tagharist peut être repéré selon les coordonnées géographiques UTM suivantes : X = 286 303 m, Y = 3 918 672 m (Figure 9).



Figure 9. Situation géographique du barrage de Tagharist(Google Earth).

1.2. Climat

Les cinq (05) facteurs climatologiques pris en considération au niveau du barrage sont : la température, les précipitations, l'humidité relative, l'évaporation et le vent.

- **Température**

Le climat de la région est un climat semi-aride, caractérisé par des Etés chauds, secs et des Hivers froids, pluvieux, accompagnés de chutes de neiges sur les montagnes. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 14,80°C. La température moyenne du mois de Janvier varie le plus souvent entre 3°C et 10°C, alors qu'en Juillet elle est située entre 20°C et 32,5°C.

- **Précipitations**

Les précipitations constituent un facteur écologique très important dans l'alternance de la saison sèche qui joue un rôle régulateur des activités biologiques (Ramade, 1984). La station de Yabous montre que la région se caractérise par deux périodes pluviales ; la première s'étend du mois de Septembre au mois de Novembre, alors que la seconde va du mois de Mars au mois de Mai (maximum de plus de 50 mm).

- **Humidité relative**

Dans la région de Yabous, l'humidité relative mensuelle moyenne varie de 70 à 80 % et de 48 à 65 %, respectivement pour les périodes allant du mois de Novembre au mois de Février et du mois de Mars au mois d'Octobre.

- **Evaporation**

L'évaporation mensuelle de la localité de Yabous varie de 105 à 240 mm entre Avril et Septembre. Sa répartition mensuelle montre une croissance régulière d'Avril à Juillet. La période d'Octobre à mars totalise 26% de la moyenne annuelle. L'évaporation moyenne annuelle varie entre 1300 et 1400 mm (Agence Nationale des Barrages et Transferts, 2005).

- **Vent**

Les vents dominants dans cette région sont chargés d'humidité, ils soufflent dans une direction Ouest-Nord Ouest entre les mois d'Octobre et Mai et Est-Sud Est entre les mois de Juin et Septembre.

2. Échantillonnage

Les échantillons ont été collectés au niveau de la berge (Figure 10) le 27/03/2022. Une volume de 1.5 L d'eau a été prélevé de la surface avec une bouteille en polyéthylène à une profondeur d'environ 30 cm et conservé à 4°C pour le dosage du phosphore. Pour une analyse qualitative des cyanobactéries, 100 ml sont prélevés dans un flacon en verre et additionnés de lugol afin d'obtenir une concentration finale d'environ 0.5 % dans l'échantillon, soit environ 8 gouttes pour 100 ml et conservés à 4°C. Pour le dosage la chlorophylle a et des toxines, 1.5 L d'eau de surface ont été prélevés avec une bouteille en plastique. Au laboratoire, une quantité de 500 ml a été filtrée à travers un filtre en microfibrilles de verre Whatman GF/C (0.45 µm) sous vide (Rampe à filtration 3 postes) pour l'extraction des toxines (Chorus et Bartram, 1999 ; Brient, 2001 ; Cummings, 2002) et pour le dosage de la chlorophylle, un volume de 250 ml d'eau brute ont été filtrés sous vide sur filtre Whatman GF/C (0.45 µm) (Brient, 2001). Les différents échantillons ont été transportés dans une glacière au frais et à l'obscurité.



Figure 10. Site de prélèvement.

3. Dosage des orthophosphates (PO_4^{3-})

3.1. Principe

Le principe du dosage est basé sur la réaction des ions orthophosphates avec une solution acide des ions de molybdate et d'antimoine pour former un complexe d'antimonyl-phosphomolybdate. L'ajout de l'acide ascorbique donne un complexe de molybdène coloré en bleu.

3.2. Protocole

Dans une éprouvette, 40 ml de l'échantillon ont été additionnés à 1 ml d'acide ascorbique et 2 ml Molybdate acide, ce mélange a été complété à 50 ml avec l'eau distillée. Après un temps d'incubation de 20 minutes, la lecture de l'absorbance a été réalisée à 880 nm. En présence des orthophosphates dans l'échantillon la couleur vire vers le bleu.

4. Etude des cyanobactéries

Dans un premier temps les échantillons destinés à la détermination des espèces sont analysés comme suit : une goutte d'eau a été prélevée à l'aide d'une pipette Pasteur est déposée entre lame et lamelle et observée au microscope optique, équipé d'une caméra ZEISS, à l'objectif $\times 10$ et $\times 40$ (Figure 11).

L'identification est basée sur l'observation des caractères morpho-anatomique (Couleur, taille, forme). Les principaux critères retenus sont :

- La structure de la micro-algue (unicellulaire ou filamenteuse) ;
- La présence ou non: d'une gaine gélatineuse et cellules particulières.

Les dimensions des cellules (longueur et largeur) ont été mesurées avec le programme ZEN sur une moyenne de dix cellules par filament.

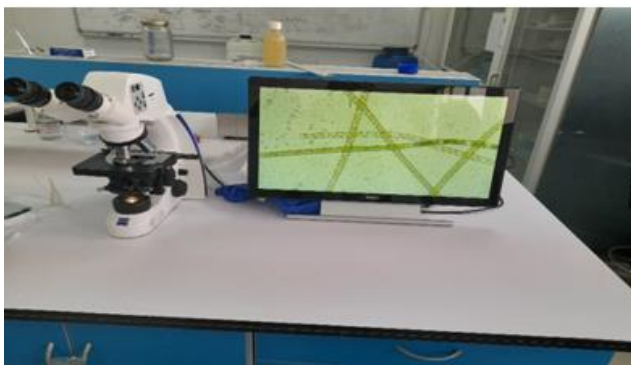


Figure 11. Microscope optique avec caméra ZEISS.

5. Dosage de la chlorophylle a

Le protocole du dosage de la chlorophylle a est celui préconisé par Brient (2001).

5.1. Principe

Cette technique est basée sur l'extraction et la dissolution du pigment photosynthétique représenté par la chlorophylle a dans un solvant approprié (acétone à 90%). La lecture se fait à trois longueurs d'ondes différentes (663, 645 et 630 nm). La concentration en $\mu\text{g/l}$ de la chlorophylle a est estimée par l'équation trichromatique de SCOR UNESCO (1966).

5.2. Protocole

La biomasse récupérée sur le filtre (Figure 12) a été dissoute dans 15 ml d'acétone 90 % et maintenir à 4°C à l'obscurité pendant une nuit. La solution dépourvue de particules (Figure 13) a été récupérée par centrifuger à 3000 tours/minutes pendant 20 min (centrifugeuse SIGMA 2-16K).

La concentration de chlorophylle a est déterminée par mesure de d'absorbance par spectrophotométrie (Spectrum SP-UV 2005) à trois longueurs d'onde : 663, 645 et 630 nm. L'estimation de la concentration en $\mu\text{g/l}$ de la chlorophylle a est calculée par l'équation trichromatique de SCOR UNESCO.

$$\text{Chlorophylle a } (\mu\text{g/l}) = \frac{[(11.64 \times \text{DO à } 663 \text{ nm}) - (2.16 \times \text{DO à } 645 \text{ nm}) - (0.1 \times \text{DO à } 630) \times v]}{V \times l}$$

DO = densité optique

v = volume de l'extrait cétonique en ml

l = trajet optique en cm

V = volume de l'échantillon filtré en litre

6. Dosage des toxines

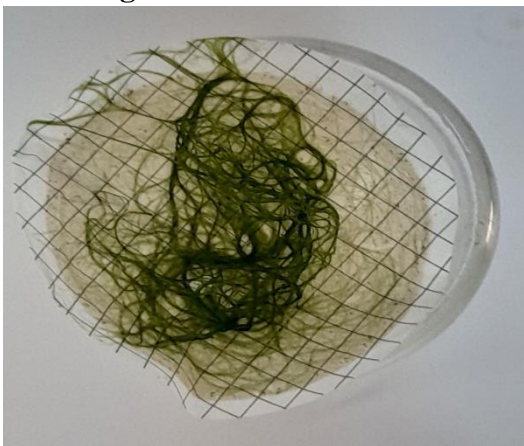


Figure 12. Filtre Whatman après filtration de l'eau brute.



Figure 13. Extrait cétonique de la chlorophylle a.

6.1. Extraction des toxines intracellulaires

L'extraction a été faite selon la méthode décrite par Chorus et Bartram (1999) ; Cummings (2002) et Brient (2001). Un volume de 500 ml a été filtré sur membrane en fibre de verre GF/C (Glass Microfiber) pour séparer les toxines dissoutes dans l'eau brute (filtrat), des toxines contenues dans les cyanobactéries et/ou adsorbées sur les particules solides (filtre).

Le filtre sur lequel sont retenues les particules solides et les microorganismes est extrait dans un bécher contenant 15 ml de méthanol à 90%, pendant 1 heure. Une centrifugation à 4995 g a été réalisée pendant 5 minutes (centrifugeuse SIGMA 2-16K), le surnageant a été récupéré et conservé à 4°C et le culot a subi une deuxième extraction dans 15 ml de méthanol. Les deux surnageants récupérés ont été conservés à -20°C.

6.2. Dosage des microcystines par le test ELISA (Enzyme-linked Immunosorbent Assay)

Le kit « Envirologix Quantiplate kit for microcystins » a été utilisé pour le dosage des MCs. La gamme de quantification de ce kit est comprise entre 0,16 et 2,5 µg/l. Le kit contient : une plaque à 96 puits sur lesquels sont fixés les anticorps anti-microcystines ; un diluant de l'échantillon ; un contrôle négatif (NC) ; 3 standards (C1-C3) à trois concentrations différentes soit : 0.16, 0.6, 2.5µg/l de MCs –LR respectivement; l'enzyme conjuguée de MC ; solution de lavage ; substrat et une solution stop.

a. Principe

Le principe de la technique est basé sur la compétition d'un anticorps fixé sur une phase solide, entre l'antigène recherché dans l'échantillon et un conjugué fourni par le kit. Ce conjugué est constitué d'antigène de même spécificité que l'antigène recherché dans l'échantillon.

Cette technique a été adaptée pour le dosage des microcystines en utilisant des anticorps polyclonaux anti- MC-LR à partir de la structure ADDA. La nature du complexe Ag-Ac formé, révélée par l'addition du substrat de l'enzyme, va se traduire par une coloration d'intensité inversement proportionnelle à la quantité d'antigène présente dans l'échantillon (Cummings, 2002).

b. Protocole

Le dosage des MCs a été réalisé selon les instructions du fabricant. Les concentrations sont calculées à partir d'une courbe d'étalonnage semi-logarithmique établie selon les valeurs des standards du kit, exprimé en µg de MCs par litre (µg/l).

Le kit a été incubé à température ambiante 30min. Après ce temps 125µL de diluant de l'échantillon ont été déposés dans tous les puits de la plaque. En même temps, 20 µL du contrôle négatif (NC), 20 µL de chaque standard (C1-C3) et 20 µL de l'échantillon ont été additionnés. Le contenu de la plaque a été mélangé pendant 20 à 30 secondes ensuite incubé à 25°C pendant 30 minutes à 200 rpm. Après incubation, 100 µL du substrat ont été ajoutés dans tous les puits et un lavage a été réalisé avec la solution du kit. Cette opération a été répétée Répéter l'opération 4 fois suivie d'une dernière incubation à

Chapitre 2. Matériel et méthodes

température ambiante pendant 30 minutes à 200 rpm. Enfin, 100 μ L de solution stop ont été déposés dans tous les puits et la lecture a été réalisée à une longueur d'onde de 450 nm.



Chapitre 3. Résultats et discussion



1. Evaluation de l'état trophique

Le résultat du dosage des concentrations des orthophosphates a montré une valeur de 0.20 mg/l. Des valeurs plus faibles ; 0.1 mg/l et 0.13 mg/l ont été observé dans le barrage Mexa et le barrage Cheffia, respectivement dans la même période de notre étude (Saoudi, 2015 ; Nasri *et al.*, 2007). Les faibles teneurs pendant cette période peuvent être expliquer par la tendance à la précipitation du phosphore à travers l'adsorption sur les oxydes et les hydroxydes ferriques et sur les particules d'argile (Giordani *et al.*, 1996).

Le phosphore est un élément très important pour la croissance des cyanobactéries (Chorus et Bartram, 1999) et il est essentiellement absorbé sous forme d'ions orthophosphates (Haslay et Leclerc, 1993). Les blooms de cyanobactéries sont observés dans les milieux eutrophes dont les charges en phosphore élevées, sont principalement sous forme orthophosphates (25 µg/l) (Piersen et Weyhenmeyer, 1994 ; Derraz, 1995). Des valeurs maximales d'orthohosphates, 0.45 mg/l, dans le barrage Mexa ont été enregistrées au mois d'Août. Cette augmentation est due au relargage de cet élément par les sédiments, car ce relargage est gouverné par la température élevée de l'eau pendant l'été.

2. Estimation de la biomasse globale du phytoplancton par le dosage de la chlorophylle

a

La biomasse phytoplanctonique globale a été estimée par un dosage de la chlorophylle a par méthode spectrophotométrique à des longueurs d'ondes de 663, 645 et 630 (correction liée à la turbidité de l'extrait acétonique) (SCOR-UNESCO, 1966). Les résultats des absorbances aux différentes longueurs d'onde et la concentration de la chlorophylle a sont les suivants :

$$DO_{663 \text{ nm}} = 0.177$$

$$DO_{645 \text{ nm}} = 0.090$$

$$DO_{630 \text{ nm}} = 0.07$$

$$\text{Concentration de la chlorophylle a } (\mu\text{g L}^{-1}) = 1.445$$

La mesure de la chlorophylle a est utilisée comme un indicateur de la biomasse phytoplanctonique dans les eaux naturelles (Limam, 2003). Selon Dauta et Feuillade (1995),

Chapitre 3. Résultats et discussion

parmi tous les pigments photosynthétiques, seule la chlorophylle a sert directement de photocatalyseur pour la photosynthèse, processus fondamental de la croissance des micro-algues. En effet, les autres pigments dits pigments accessoires comme la chlorophylle b, les carotènes, les xanthophylles ou les phycobilines, permettent d'absorber des longueurs d'onde supplémentaires et augmentent ainsi la capacité d'exploitation de l'énergie lumineuse incidente. L'énergie ainsi captée est transférée à la chlorophylle a dont la concentration est proportionnelle à la capacité photosynthétique.

Les résultats du dosage de la chlorophylle a montrent que la teneur en chlorophylle a dans le barrage Taghrist est proche des valeurs obtenues dans les eaux du barrage Lebna (Tunisie) (El Herry *et al.*, 2008). Par contre Nasri *et al.* (2007) rapporte l'absence de biomasse phytoplanctonique pendant le mois de Mars et un pic de en 444.82 µg/l le mois d'Octobre observé lors du développement d'un bloom de *Microcystis*. Egalement, une valeur élevée de l'ordre de 25 µg/l a été observé dans le barrage Mexa (Saoudi *et al.*, 2015).

La teneur en chlorophylle a est nettement influencée par plusieurs facteurs tels que la composition spécifique, l'état physiologique des algues, la densité cellulaire, la lumière, la température et l'heure de la journée (Neuveux, 1974). Cependant, le résultat obtenu dans notre étude révèle que la teneur en chlorophylle a dans le barrage Taghrist est inférieure aux recommandations de l'OMS. La relation classique « 20 000 cellules cyanobactéries/ml = 10 µg chlorophylle a / l » (Chorus et Bartram, 1999) est une valeur indicative.

3. Etude morphologique des cyanobactéries

L'examen microscopique (grossissement x10 et x40) à l'état frais des caractères morphologiques d'un échantillon d'eau du barrage Taghrist nous a permis d'identifier une espèce de cyanobactéries : *Planktothrix* sp. et trois (3) genres de micro-algues eucaryotes : *Spirogyra*, *Closterium* et *Mougeotia*. Les caractéristiques morphologiques des différents taxons sont représentées dans le tableau 1 et la figure 14.

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques des taxons de micro-algues observés dans le

Chapitre 3. Résultats et discussion

barrage Taghrist.

Taxon	Caractéristiques morphologiques
<i>Planktothrix</i> sp.	Le trichome est droit et sans d'étranglements aux parois transversales. Les cellules sont courtes, de 3-5 µm de largeur et contiennent des vésicules à gaz et les cellules apicales sont arrondies (Figure 14-a).
<i>Spirogyra daedaleoides</i>	Cellules végétatives de 65-240 µm de longueur, 29-36 µm de largeur ; un chloroplaste faisant 2.5 à 8 tours dans chaque cellule (Figure 14-b).
<i>Spirogyra</i> sp.	corps cellulaire de 26 µm de large, septum replié, un seul chloroplaste en forme de bande faisant 4.5 tours dans chaque cellule (Figure 14-c).
<i>Spirogyra tenuissima</i>	Cellules végétatives de 66-198 µm de long, 10-14 µm de diamètre ; un chloroplaste faisant 3.5 à 6 tours dans chaque cellule (Figure 14-d).
<i>Spirogyra porticalis</i>	Cellules végétatives de 66-200 µm de long, 40-50 µm de diamètre ; un chloroplaste faisant 3 à 7 tours dans chaque cellule ; scalariforme de conjugaison, tubes formés des deux côtés ; zygosporés larges ou courtes ellipsoïdales, 50-83 µm de long, 40-50 µm de large, couche interne jaunâtre, surface lisse (Figure 14-e).
<i>Spirogyra</i> sp.	Corps cellulaire de 87 à 110 µm de long, 27 µm de large, un seul chloroplaste en forme de bande faisant 5 à 7 tours (Figure 14-f).
<i>Closterium macilentum</i>	Corps cellulaire rapidement atténué vers les deux extrémités, chaque partie étendue plus longue que la partie fusiforme au milieu 150 - (252-528) - 600 µm de long, 6 -(8.6-17) µm de large, paroi cellulaire transparente ou légèrement jaunâtre, finement striée (Figure 14-g).
<i>Mougeotia</i> sp.	Algue filamenteuse sans ramification; un seul chloroplaste en forme de plaque dans chaque cellule corps cellulaire 38-62 µm de long, 13 µm de large (Figure 14-h).

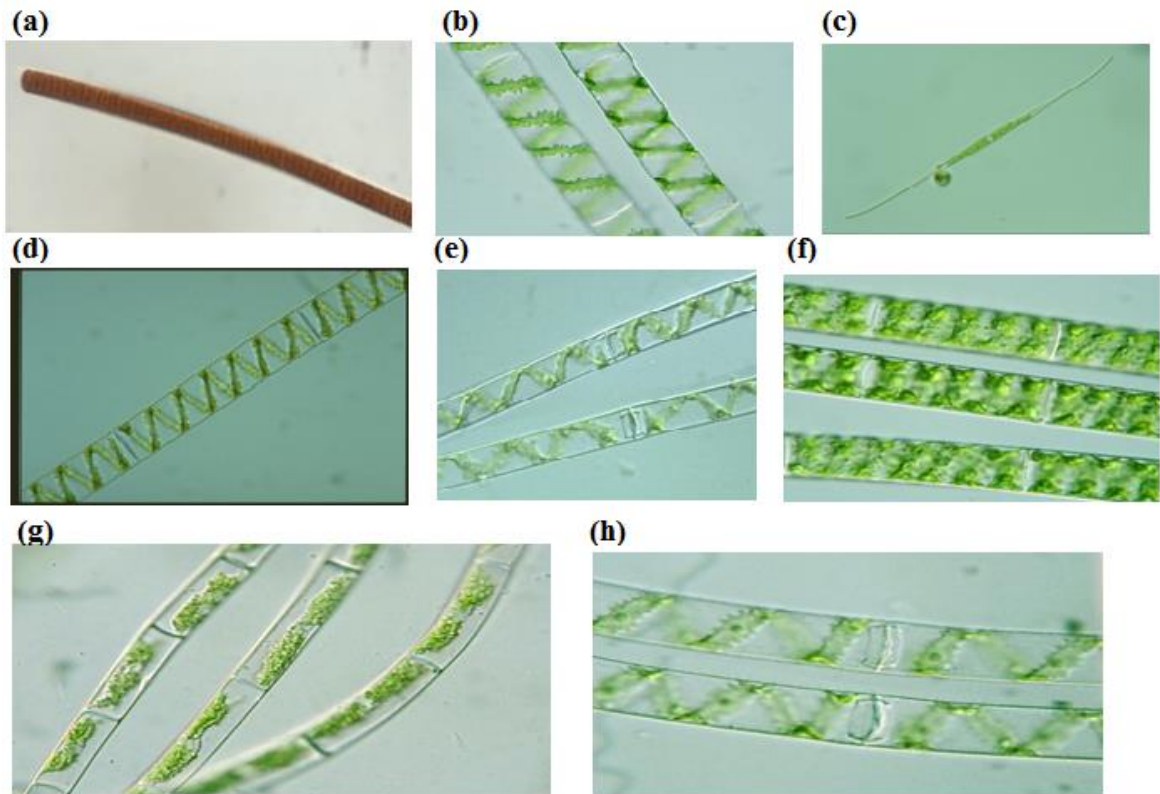


Figure 14. Photographies des microalgues observées dans le barrage Taghrist. (a) : *Planktothrix* sp., (b) : *Spirogyra daedaleoides*, (c) : *Spirogyra* sp., (d) : *Spirogyra tenuissima*, (e) : *Spirogyra porticalis*, (f) : *Spirogyra* sp., (g) : *Closterium macilentum*, (h) : *Mougeotia* sp.

Le genre *Planktothrix* a été identifié dans plusieurs réservoir d'eau potable en Algérie : barrage Mexa (Saoudi *et al.*, 2015), barrage Ain Zada (Saoudi *et al.*, 2017), Hammam Debagh (Guellati *et al.*, 2017) et barrage et Zit Emba (Touati *et al.*, 2019) situés au Nord-Est de l'Algérie. Plus particulièrement, des blooms de *Planktothrix* ont été observés dans les barrages Mexa et Ain Zada en période printanière (Saoudi *et al.*, 2017 ; Guellati *et al.*, 2017). Le développement de ce genre au cours de cette saison s'explique par son adaptation à des températures basses et à la déstabilisation de la colonne grâce à sa possession de nombreuses vacuoles à gaz (Brient *et al.*, 2004).

4. Dosage des microcystines

Le dosage des MCs par ELISA a donné une valeur inférieure à 0.1 µg/l. Des concentrations de MCs de 0.77 µg/l et de 6.3 µg/l ont été déterminées au cours des blooms de *Planktothrix* sp. et de *P. agardhii* aux barrages Maxa et Ain Zada, respectivement (Saoudi

Chapitre 3. Résultats et discussion

et al., 2015 ; Saoudi *et al.*, 2017). En effet, le genre *Planktothrix* est connu parmi les genres producteurs de MCs (Bernard *et al.*, 2017).



Conclusion et perspectives



Conclusion et perspectives

Dans le but d'étudier les cyanobactéries dans le Barrage Taghrist, wilaya de Khenchela, un dosage des orthophosphates et de la chlorophylle a, une identification morphologique des cyanobactéries et un dosage des microcystines ont été réalisés. Les résultats ont montré des concentrations en orthophosphates et en chlorophylle a de 0.20 mg/l et 1.445 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectivement. L'identification morphologique a révélée la présence d'une espèce de cyanobactéries, *Planktothrix* sp. et trois genres de microalgues eucaryotes : *Spirogyra*, *Closterium* et *Mougeotia*. Le dosage des microcystines par ELISA a donné un résultat inférieur aux limites de dosage par cette technique. En conséquence, un plan de gestion des déchets doit être mis en place dans cet écosystème.

En perspectives,

- des prélèvements sur des périodes plus longues couvrant toute l'année doivent être réalisés pour l'étude de la variation spatio-temporelle des cyanobactéries et la détermination des facteurs liés à la diversité des microalgues dans cet écosystème ;
- un isolement de l'espèce de *Planktothrix* sp. et une étape très importante pour la détermination de sa toxicité.



Références bibliographiques

Adams DG., Duggan PS. (2008). Cyanobacteria-bryophyte symbioses. *J Exp Bot*, 59(5): 1047–58.

AFSSA (2006). Rapport sur l'évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et de leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives.

Agence Nationale des Barrages et Transferts (2005). Rapport d'Etude Hydrologique. Etude d'avant - projet détaillé du barrage de Tagharist (willaya de Khenchela). Dar Al-Handasah.

Anagnostidis K., Komárek J. (1988). Modern approach to the classification system of cyanophytes. 3. Oscillatoriales. *Algol Stud*, 50 (53):327–472.

Ballot A., Bernard C., Fastner J. (2017). Chapter 14: Saxitoxin and analogues. In: Meriluoto J., Spoof L., Codd G.A. (Eds.), *Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis*. John Wiley & Sons Kapittel 14. ISBN 9781119068686. s148–154.

Baxter M., Jensen T. (1980). A study of methods for in situ X-ray energy dispersive analysis of polyphosphate bodies in *Plectonema boryanum*. *Arch Microbiol*, 126:213–215.

Bernard C., Ballot A., Thomazeau S., Maloufi S., Furey A., Mankiewicz-Boczek J., Pawlik-Skowronska B., Capelli C., Salmaso N. (2017). Appendix 2. Cyanobacteria associated with the production of cyanotoxins. In: Meriluoto J., Spoof L., Codd G.A. (Eds.), *Handbook on cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 503–527.

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). The structure of cyanoginosin-LA, a cyclic heptapeptide toxin from the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *J Chem Soc Perkin Trans*, 1:2311–2318.

Bouaïcha N. (2002). La ruée vers l'eau en Algérie, Maroc et Tunisie. Université Paris -Sud, UFR de Pharmacie / Laboratoire Santé Publique-Environnement pp 1–2.

Branes Z., Ounissi M., Sargos D., Amblard C. (2007). Density and biomass of

Références bibliographiques

phytoplankton in the Oubeira Lake (North-East Algeria). *J Fish Int*, 2: 200–206.

Briand E. (2008). Contribution à la compréhension du déterminisme de la mise en place des proliférations de cyanobactéries et de leur production de toxines. Thèse de Doctorat, Discipline : Ecologie Microbienne. Muséum National d'Histoire Naturelle, 270 pages.

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 Museum National d'Histoire Naturel, Paris, France.

Brient L., Legeas M., Leitao M., Peigner P. (2004). Etude interrégionale grand Ouest sur les cyanobactéries en eau douce. Université de Rennes 1. pp.82.

Brient L., Vézic C., Bertru G. (2001). Evaluation des efflorescences à cyanobactéries dans des eaux de cours d'eau et plans d'eau breton. Université de Rennes 1. pp 80.

Bruno M., Barbini D. A., Pierdominici E., Serse A.P., Ioppolo A. (1994). Anatoxin a and previously unknown toxin in *Anabaena planctonica* from blooms found in Lake Mulargia (Italy). *Toxicon*, 32:369–373.

Bullerjahn G.S., Post A.F. (2014). Physiology and molecular biology of aquatic cyanobacteria. *Front Microbiol*, 5:359.

Carmichael W.W. (1992). A status report on planktonic cyanobacteria (blue-green algae) and their toxins. EPA/600/R-92-079, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 141.

Carmichael W.W. (1994). The toxins of cyanobacteria. *Sci Am*, 270:78–86.

Carmichael W.W., Evans W.R., Yin Q.Q., Bell P., Moczydlowski E. (1997). Evidence for paralytic shellfish poisons in the freshwater Cyanobacterium *Lyngbya wollei* (Farlow ex Gomont) comb. Nov Appl Environ Microbiol, 63:3104–3110.

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. 187–209.

Références bibliographiques

Carmichael W.W., Mahmood N., Hyde E.G. (1990). Natural toxins from cyanobacteria (Blue-green algae). In *marin Toxins: origin, structure and molecular pharmacology* shervrood hall and gary strichagtz. Eds: ACS symposium serie: 418 American chemical societies Washington, 87–106.

Castenholz R.W. (2001). Oxygenic photosynthetic bacteria. In: Boone D.R. and Castenholz R.W. (eds), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (2nd ed.), Volume 1, Springer-Verlag, New York, 473–600.

Castenholz R.W., Waterbury J.B. (1989). Oxygenic photosynthetic bacteria (sect. 19), Group I. Cyanobacteria. In: Staley, J.T. (Ed.), *Bergey's manual of systematic bacteriology*, Vol. 3. Williams & Wilkins, Baltimore, pp. 1710–1799.

Chan F., Pace M.L., Howarth R.W., Marino R.M. (2004). Bloom formation in heterocystic nitrogen-fixing bacteria: The dependence on colony size and zooplankton grazing. *Limnol Oceanogr*, 49:2171–2178.

Charifi S., Merad T., Guellati F.Z., Touati H., Bensouilah M. (2019). Dynamic of Filamentous Cyanobacteria in the Dam Ain Zada (North of Algeria) Laboratory of Ecobiology of Marine and Coastal Environments, Department of Marine Sciences, Faculty of Sciences, Badji Mokhtar-University.

Chen Y., Qin B., Teubner K., Dokulil M. (2003). Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *J Plankton Res*, 25:445–453.

Chorus I., Bartram J. (1999). Toxic cyanobacteria in water : a guide to public health significance, monitoring and management. Spon, London, 416.

Codd G.A., Brooks W.P., Priestley T.M., Poon G.K., Bell S.G. (1989). Production, detection and quantification cyanobacterial toxins, toxicity assessment. *An Internat J*, 4:499–511.

Codd G.A., Poon G.K. (1988). Cyanobacterial toxins. In : *Proc. Phytochem. Soc. Europe*, 28. Eds. Gallon J.G., Rogers L.J., Oxford University Press, Oxford, 283–296.

Crouzet B. (1987). Phosphore et processus d'eutrophisation, In : Martin G., *Point sur*

Références bibliographiques

- l'épuration et le traitement des effluents. Tec et Doc lavoisier, Ed., Paris, France, Vol 3, 3.
- Cummings M. (2002).** Evaluation of microcystin enzyme - based analytic techniques and microcystin occurrence in the metrophoenix, Arizona water supply system, Degree Master of Science, Arizona State University. pp. 8–91.
- Dauta A., Feuillade J. (1995).** Croissance et dynamique des populations algales. in Limnologie générale, Pourriot R., Meybeck M. (Eds.) Masson, Paris, 328–350.
- Derraz M. (1995).** Étude de l'autorisation de dollars une de barrage El Kensera (Maroc). Caractéristique physico-chimiques, biodisponibilité du phosphate segmentaire écophysologie de *Microcystis* est relation des Blue de avec les paramètres environnementaux. Thèse d'état es-science à la faculté de Meknès : 120 pp.
- Dillon J.G., Miller S., Bebout B., Hullar M., Pinel N., Stahl D.A. (2009).** Spatial and temporal variability in a stratified hypersaline microbial mat community. FEMS Microbiol Ecol, 68(1):46–58.
- Douglas S.E. (1994).** Chloroplast origins and evolution. In: D.A. Bryant [Ed.] The Molecular Biology of Cyanobacteria, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 91–118.
- Drews G., Weckesser J. (1982).** Function, structure and composition of cell walls and external layers. In: Carr N.G., Whitton B.A. (Eds.), The Biology of Cyanobacteria. Blackwell, Oxford, 333–357.
- Edwards C., Beattie K.A., Scrigueur C.M., Codd G.A. (1992).** Identification of anatoxin-a in benthic cyanobacteria (blue-green algae) and in associated dog poisonings at Loch Insh, Scotland. Toxicon, 30:1165–1175.
- El Herry S., Fathalli A., Jenhani-Ben Rejeb A., Bouaïcha N. (2008).** Seasonal occurrence and toxicity of *Microcystis* spp. and *Oscillatoria tenuis* in the Lebna Dam, Tunisia. Water Res, 42:1269–1273.
- Falconer I.R. (1996).** Potential impact on human health of toxic cyanobacteria. Phycologia 35:6–11.

Références bibliographiques

- Falconer I.R. (1999).** An overview of problems caused by toxic blue-green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water. *Environ Toxicol*, 14:5–12.
- Falconer I.R., Beresford A.M., Runnegar M.T.C. (1983).** Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa*. *Med J Aust*, 28; 1(11):511–514.
- Falkowski P.G., Knoll A.H. (2007).** *Evolution of Primary Producers in the Sea*. China: Elsevier Academic Press.
- Fay P. (1983).** *The blue-greens*, London; Baltimore, Md., U.S.A.: E. Arnold.
- Frémy J.M., Lassus P. (2001).** Toxines d’algues dans l’alimentation. *Plouzané*, 481–523.
- Funari E., Testai E. (2008).** Human health risk assessment related to cyanotoxins exposure. *Crit Rev Toxicol*, 38: 97–125.
- Ganf G.G., Oliver R.L. (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 lake. *J Ecol*, 70:829–844.
- Gayral P. (1975).** *Les algues : morphologies, cytologie, reproduction, écologie*, ed. DOIN, Paris, 2, 49, 52.
- Geitler L. (1932).** Cyanophyceae. Rabenhorst's Kryptogamen-Flora. Akademisches Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1196 pp.
- Giordani G., Bartoli M., Cattadori M., Viaroli P. (1996).** Sulphide release from anoxic sediments in relation to iron availability and organic matter recalcitrance and its effects on inorganic phosphorus recycling. *Hydrobiologia*, 32(9):211–222.
- Gleason F.K., Wood J.M. (1987).** Secondary metabolism in the cyanobacteria. Dans: Fay, P. et Van Balen, C. (Eds.). *The cyanobacteria*, 437–452.
- Guellati F.Z., Touati H., Tambosco K., Quiblier C., Humbert J.F., Bensouilah B. (2017).** Unusual cohabitation and competition between *Planktothrix rubescens* and *Microcystis* sp. (cyanobacteria) in a subtropical reservoir (Hammam Debagh) located in Algeria. *PLoS ONE*, 12 (8):e0183540.

Références bibliographiques

- Gugger M., Lenoir S., Berger C., Ledreux A., Druart J.C., Humbert J.F., Guette C., Bernard C. (2005).** First report in a river in France of the benthic cyanobacterium *Phormidium favosum* producing anatoxin-a associated with dog neurotoxicosis. *Toxicon*, 45:919–928.
- Haney J.F., Sasner, J.J., Ikawa M. (1995).** Effects of products release by *Aphanizomenon flos-aquae* and purified saxitoxin on the movements of *Daphnia carinata* feeding appendages. *Limnol Oceanog*, 40:263–272.
- Haslay C., Leclerc H. (1993).** *Microbiologie des eaux d'alimentation*. Ed. Tec et Doc, Paris. pp 90–92, 193–208, 370.
- Henriksen P., Carmichael W.W., An J., 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: 901–913.
- Hofmann H. J. Precambrian microflora, Belcher Islands, Canada (1976).** Significance and systematics. *J Paleontol*, 50:1040–1073.
- Holte H.R., Eriksen S., Skulberg O., Aas P. (1998).** The effect of water soluble cyanotoxin(s) produced by two species of *Anabaena* of the release of acetylcholine from the peripheral cholinergic nervous system of the rat airway. *Environ Toxicol Pharmacol*, 5:51–59.
- Humpage A.R., Rositano J., Bretag A. H., Brown R., Baler P.D., Nicholson B.C. Steffensen D.A. (1994).** Paralytic shellfish poisons from Australian cyanobacterial blooms. *Aust J Mar Freshwater Res*, 45 (5):761–771.
- Ishikawa K., et al. (2002).** Transport and accumulation of bloom-forming cyanobacteria in a large, mid-latitude lake: The gyre-*Microcystis* hypothesis. *Limnology*, 3:87–96.
- Jaiswal P., Singh P.K., Prasanna R. (2008).** Cyanobacterial bioactive molecules - An overview of their toxic properties. *Can J Microbiol*, 54:701–717.
- James K.J., Skerlock I.R., Stack M.A. (1997).** Anatoxin-a in Irish freshwater and cyanobacteria, determined using a new fluorimetric liquid chromatographic method. *Toxicon*, 35:963–971.

Références bibliographiques

- Jang M., Ha, K., Joo G., Takamura N. (2003).** Toxin production of cyanobacteria is increased by exposure to zooplankton. *Freshw Biol*, 48:1540–1550.
- Jérémy S. (2005).** Toxicité des cyanobactéries d'eau douce vis-a-vis des animaux domestiques et sauvages P. 23–26.
- Jungblut A.D. (2006).** Molecular identification and evolution of the cyclic peptide hepatotoxins, microcystin and nodularin, synthetase genes in three orders of cyanobacteria. *Arch Microbiol*, 185:107–114.
- Kaebnick M., Neilan B.A. (2001).** Ecological and molecular investigations of cyanotoxin production. *FEMS Microbiol Ecol*, 35:1–9.
- Kenefick S.L., Hurdey S.E., Petterson H.G., Prepas E.E. (1993).** Toxin release from *Microcystis aeruginosa* after chemical treatment, *Water Sc Technol*, 24:8659875.
- Knoll A.H., Javaux E.J., Hewitt D., Cohen P. (2006).** Eukaryotic organisms in Proterozoic oceans. *Phil Trans R Soc B*, 361:1023–1038.
- Komárek J. (1976).** Taxonomic review of the genera *Synechocystis* Sauv. 1892, *Synechococcus* Näg. 1849, and *Cyanothece* gen. nov. (Cyanophyceae). *Arch Protistenkd*, 118: 119–179.
- Komárek J. (2006).** Cyanobacterial Taxonomy: Current Problems and Prospects for the Integration of Traditional and Molecular Approaches. *Algae*, 21(4):350–371.
- Komárek J. (2014).** Phenotypic and ecological diversity of freshwater coccoid cyanobacteria from maritime Antarctica and Islands of NW Weddell Sea. II. Jiří Komárek. *Czech Polar Reports*, 4 (1):17–39.
- Kromkamp J. (1987).** Formation and functional significance of storage products in cyanobacteria. *N Z J Mar Freshwater Res*, 21 (3):457–465.
- Lagos N., Onodera H., Zagatto P. A., Andrinolo D., Azevedo S.M.F.Q., Oshima Y. (1999).** The first evidence of paralytic shellfish toxins in the freshwater cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii*, isolated from Brazil. *Toxicon*, 37: 1359–1373.

Références bibliographiques

- Lavoie I., Laurion I., Warren A., Vincent W. (2007).** Les fleurs d'eau de cyanobactéries, revue de littérature. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec, rapport n° 916, 124.
- Lee Robert E. (2008).** Phycology (4th edition), Cambridge University Press.
- Leitão M., Couté A. (2005).** Guide Pratique des Cyanobactéries Planctoniques du grand Ouest de la France. Ed AESN. Honfleur. 64.
- Lilleheil G., Andersen R.A., Skulberg O.M., Alexander J. (1997).** Effects of a homoanatoxin-a- containing extract from *Oscillatoria formosa* (cyanophyceae/cyanobacteria) on neuro-muscular transmission. *Toxicon*, 35 :1275–1289.
- Limam A. (2003).** Contribution à l'étude des conditions du milieu et des peuplements phytoplanctoniques de la retenue du barrage Joumine en relation avec le Réseau de distribution. Mémoire de Diplôme D'études Approfondies. INA Tunis, Tunisie 106 p.
- Mac Kintosh C., Beattie K.A., Klumpp S., Cohen P., Codd G.A. (1990).** Cyanobacterial microcystin-LR is a potent and specific inhibitor of protein phosphatases 1 and 2 A from both mammals and higher plants. *FEBS Lett*, 264:187–192.
- MacKintosh C., Beattie K., Klumpp S., Schluter P.J., Codd G.A. (1990).** Cyanobacterial microcystin-LR is a potent and specific inhibitor of protein phosphatases 1 and 2A from both mammals and higher plants. *FEBS Letters*, 264 (2):187–192.
- Mahmood N.A., Carmichael W.W. (1986).** Paralytic shellfish poisons produced by the freshwater cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* NH-5. *Toxicon*, 24:175–186.
- Messineo V., Mattei D., Melchiorre S., Salvatore G., Bogialli S., Salzano R., et al. (2006).** Microcystin diversity in a *Planktothrix rubescens* population from Lake Albano (Central Italy). *Toxicon*, 48(2):160–174.
- Metcalf J.S., Codd G.A. (2012).** Cyanotoxins, in *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in time and space* (ed. B.A. Whitton), Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, 651–673.

Références bibliographiques

- Montejano G., Gold M., Komárek J. (1997).** Freshwater epiphytic cyanoprokaryotes from central Mexico III. The genus *Stichosiphon*. Arch Protistenkd, 148:3–16.
- Mur L.R., Skumberg O.M., Utkilen H. (1999).** Cyanobacteria in the Environment. In Chorus, I. et Bartram, J. (Eds.). Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public Health consequences, monitoring and management. WHO Ed. E & FN SPON, pp 41–111.
- Namikoshi M., Murakami T., Watanabe M.F., Oda T., Yamada J., Tsujimura S., Nagai H., Oishi S. (2003).** Simultaneous production of homoanatoxin-a, anatoxin-a, and a new non-toxic 4-hydroxyhomoanatoxin-a by the cyanobacterium *Raphidiopsis mediterranea* Skuja. Toxicon, 42:533–538.
- 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 22:347–356.
- Neilan B. A., Pearson L. A., Muenchhoff J., Moffitt M. C., Dittmann E. (2013).** Environmental conditions that influence toxin biosynthesis in cyanobacteria. Environ Microbiol, 15 (5):1239–1253.
- Neuveux J. (1974).** Recherche sur la chlorophylle a et la phéophytine a en milieu oligotrophe et en milieu eutrophe (Méditerranée). Thèse de 3ème cycle, Univ. Paris VI. 116 p.
- Niedermeyer T. H. (2015).** Anti-infective natural products from Cyanobacteria. Planta Med, 81:1309–1325.
- Nishizawa T., Asayama M., Fujii K., Harada K., Shirai M. (1999).** Genetic analysis of the peptide synthetase genes for a cyclic heptapeptide microcystin in *Microcystis* spp. J Biochem, 126(3):520–529.
- Ohta T., Sueoka E., Iida N., Komori A., Suganuma M., Nishiwaki R., Tatematsu M., Ohtani I., Moore R.E., Runnegar M.T.C. (1992).** Cylindrospermopsin: a potent hepatotoxin from the blue-green alga *Cylindrospermopsis raciborskii*. J Am Chem Soc, 114 (20):7941–7942.

Références bibliographiques

- Onodera H., Satake M., Oshima Y., Yasumoto T., Carmichael W.W. (1997).** New saxitoxin analogues from the freshwater filamentous cyanobacterium *Lyngbya wollei*. *Natural. Toxins*, 5:146–151.
- Ormerod J.G. (1992).** Physiology of the photosynthetic prokaryotes. In: N.H. Mann and N.G. Carr [Eds] *Photosynthetic Prokaryotes*. Plenum Press, New York, 93–120.
- Pattanaik B., Wulff A., Roleda M.Y., Garde K., Mohlin M. (2010).** Production of the cyanotoxin nodularin-A multifactorial approach. *Harmful Algae*, 10:30–38.
- Pereira P., Onodera H., Andrinolo D., Franca S., Araujo F., Lagos N., Oshima Y., (2000).** Paralytic shellfish toxins in the freshwater cyanobacterium *Aphanizomenon flosaquae*, isolated from Montargil, Portugal. *Toxicon*, 38: 1689–1702.
- Pereira S.R., Vasconcelos V.M., Antunes A. (2013).** Computational study of the covalent bonding of microcystins to cysteine residues--a reaction involved in the inhibition of the PPP family of protein phosphatases. *The FEBS Journal*, 280(2):674–80.
- Piersen D.C., Weyhenmeyer G.A. (1994).** High resolution measurements of sediment resuspension above an accumulation bottom in a stratified lake. *Hydrobiologia*, 284:43–57.
- Pomati F., Sacchi S., Rossetti C., Giovannardi S., Onodera H., Oshima Y., Neilan B.A. (2000).** The freshwater cyanobacterium *Planktothrix* sp. FP1: molecular identification and detection of paralytic shellfish poisoning toxins. *J Phycol* 36:553–562.
- Prescott L.M., Haley J.P., Klein D.A. (2003).** *Microbiologie*. De Boeck Université, 2ème éd. Française, traduit de la 5^{ème} édition américaine (2002).
- Puddick J., Prinsep M.R., Wood S.A., Kaufononga S.A., Cary S.C., Hamilton D.P. (2014).** High levels of structural diversity observed in microcystins from *Microcystis* CAWBG11 and characterization of six new microcystin congeners. *Mar Drugs*, 12 (11): 5372–5395.
- Rapala J., Sivonen K., Luukkainen R., Niemelä S.I. (1993).** Anatoxin-a concentration in *Anabaena* and *Aphanizomenon* at different environmental conditions and comparison of growth by toxic and non-toxic *Anabaena* strains, a laboratory study. *J App Phycol*, 5: 581–591.

Références bibliographiques

- Reviere B. (2003).** Biologie et phylogénie des algues. Tome 2, Belin (Belin Sup Sciences), Paris. ISBN 2-7011-3512-5.
- Reynolds C.S., Joworski G.H.M., Cmeich H.A., Leedale G.F. (1981).** On the annual cycle of the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* Kütz Emend, Proceedings and philosophical transactions of the royal society of London. Biol Sci, 293: 419–477.
- Reynolds C.S., Walsby A.E. (1975).** Water-blooms. Biol Rev, 50:437–481.
- Rippka R., Deruelles J.B., Waterbury J.B., Herdman M., Stanier R.Y. (1979).** Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. J Gen Microbiol, 111:1–61.
- Robarts R.D., Zohary T. (1987).** Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. N Z J Mar Freshw Res, 21:391–399.
- Runnegar M.T.C., Jackson A.R.B., Falconer I.R. (1988).** Toxicity of the cyanobacterium *Nodularia spumigena* Mertens, Toxicon, 26: 143–151.
- Saoudi A., Barour C., Briant L., Ouzrout R., Bensouilah M. (2015).** Paramètres environnementaux et dynamique spatio-temporelle des cyanobactéries dans le réservoir de Mexa (extrême Nord-Est de l'Algérie). Avancées en biologie environnementale, 9(11) : 109–121.
- Saoudi A., Briant L., Boucetta S., Ouzrout R., Bormans M., Bensouilah M. (2017).** Management of toxic cyanobacteria for drinking water production of Ain Zada Dam. Environ Monit Assess, 189:361.
- SCOR UNESCO (1966).** Etermination of photosynthetic pigments in sea water. UNESCO Monographs on Oceanographic Methology, 1. Paris, France. 69 pp.
- Shapiro J. (1997).** The role of carbon dioxide in the initiation and maintenance of blue-green dominance in lakes. Freshw Biol, 37:307–323.

Références bibliographiques

- Sivonen K., Jones G. (1999).** Cyanobacterial Toxins. In Chorus, I. and Bartram, J., Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management, London, E & FN Spon, 41–111
- Skulberg R. (1992).** Investigations of a neurotoxic Oscillatorialean strain (Cyanophyceae) and its toxin. Isolation and characterization of homoanatoxin-a. *Environ Toxicol Chem*, 11: 321–329.
- Sladeczek V. (1969).** The measures of saprobity. *SIL Proceedings, 1922-2010*: 17(1):546–555.
- Smayda T.J. (1997).** Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea, *Limnol. Oceanogr* 42 (5): 1137–1153.
- Stal L.J. (1992).** Cyanobacterial mats and stromatolites. In: Whitton, B.A., Potts, M. (Eds.), *The Ecology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 61–120
- Stanier G. (1988).** Fine structure of cyanobacteria. In: Packer, L., Glazer, A.N., *Methods in Enzymology*, (Ed), San Diego, 167:157–172.
- Stanier R.Y., Siström W.R., Hansen T.A., Whitton B.A., Castenholtz 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*, 28:335–336.
- Terao K., Ohmori S., Igarashi K., et al. (1994).** Electron microscopic studies on experimental poisoning in mice induced by cylindrospermopsin isolated from blue-green alga *Umezakia natans*. *Toxicon*, 32 (7): 833–843.
- Tiffany L.M. (1951).** Ecology of fresh water algae. In: G. M. Smith, ed. *Manual of phycology Chronocia Botanica*. Waltham, Massachusetts, 293–311.
- Tillett D., Dittmann E., Erhard M., Von Döhren H., Börner T., Neilan B.A. (2000).** Structural organization of microcystin biosynthesis in *Microcystis aeruginosa* PCC7806: an integrated peptide-polyketide synthetase system. *Chem Biol*, 7 (10):753–764.

Références bibliographiques

- Tillett D., Parker D.L., Neilan B.A. (2001).** Detection of toxigenicity by a probe for the microcystin synthetase a gene (*mcyA*) of the cyanobacterial genus *Microcystis*: comparison of toxicities with 16S rRNA and phycocyanin operon (phycocyanin intergenic spacer) Phylogenies. *App Environ Microbiol*, 67:2810–2818.
- Touati H., Guellati F.Z., Arif S., Bensouilah M. (2019).** Cyanobacteria dynamics in a mediterranean reservoir of the North East of Algeria : vertical and seasonal variability. *J Ecol Eng*, 20(1):93–107.
- Utkilen H., Gjølme N. (1992).** Toxin production by *Microcystis aeruginosa* as a function of light in continuous cultures and its ecological significance. *App Environ Microbiol*, 58:1321–1325.
- Van Apeldoorn M.E., Van Egmond H.P., Speijers G.J.A., Bakker G.J.I. (2007).** Toxins of cyanobacteria. *Mol Nutr Food Res*, 51:7–60.
- Van Coillie R. (2011).** Écotoxicologie générale et appliquée. 1ere édition, Québec, Télé Université, (Collection Sciences de l'environnement) 521.
- Van der Westhuizen A.J., Eloff J.N. (1985).** Effect of temperature and light on the toxicity and growth of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* (UV-006). *Planta*, 163:55–59.
- Viaggiu I., Melchiorre S., Volpi F., Di Corcia A., Mancini R., Garibaldi L., Crichigno G., Bruno M. (2004).** Anatoxin-a toxin in the cyanobactereium *Planktothrix rubescens* from a fishing pond in northern Italy. *Environ Toxicol*, 19:191–197.
- Walsby A.E., Mccallister G.K. (1987).** Buoyancy regulation by *Microcystis* in Lake Okaro, New Zealand. *J Mar Freshw Res*, 21:521–524.
- Wasmund N. (1997).** Occurrence of cyanobacterial blooms in baltic sea in relation to environmental conditions. *Int Revue ges Hydrobiol*, 82 (2): 169–184.
- Waterbury J.B., Stanier R.Y. (1977).** Two unicellular cyanobacteria which reproduce by budding. *Arch Microbiol*, 115: 249–257.
- Whitton B.A. (1992).** Diversity, ecology, and taxonomy of the cyanobacteria. In: Mann N.H., Carr N.G. (Eds.), *Photosynthetic Prokaryotes*. Plenum Press, New York, pp. 1–51.

Références bibliographiques

WHO (2003). Cyanobacterial toxins: Microcystin-LR in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva, World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/57).

Wimmer K.M., Strangman W.K., Wright J.L.C. (2014). 7-Deoxy-desulfo-cylindrospermopsin and 7-deoxy-desulfo-12-acetylcylindrospermopsin: Two new cylindrospermopsin analogs isolated from a Thai strain of *Cylindrospermopsis raciborskii*. *Harmful Algae*, 37: 203–206.

Yeager C.M., Kornosky J.L., Morgan R.E., Cain E.C., Garcia-Pichel F., Housman D.C., Belnap J., Kuske C.R. (2007). Three distinct clades of cultured heterocystous cyanobacteria constitute the dominant N₂-fixing members of biological soil crusts of the Colorado Plateau, USA. *FEMS Microbiol Ecol*, 60 (1): 85–97.