



REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ ABBES LAGHROUR-KKHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE MOLECULAIRE ET CELLULAIRE

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique

FILIERE : BIOLOGIE

Spécialité : MICROBIOLOGIE APPLIQUÉE

Intitulé :

Les efflorescences des cyanobactéries

Préparé par : RAHMANI Rayane

HAMMADI Amal

Jury d'évaluation :

Président : SEBIHI Fatima Zahra M.C.A Université Abbès Laghrou Khenchela

Directrice : BENREDJEM Lamia M.A.A Université Abbès Laghrou Khenchela

Examineur : BOUTARFA Soumia M.A.A Université Abbès Laghrou Khenchela

Année universitaire

2020 – 2021

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, on remercie le DIEU le tout puissant, de nous avoir donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

*Nous voudrions dans un premier temps remercier notre directrice de mémoire **Madame BENREDJEM Lamia**, pour sa patience, sa orienté et surtout à aidé et conseils.*

Nous tenons à exprimer notre grande considération et nos profonds remerciements aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail.

En particulier

Finalement, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à notre succès et qui nous ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Résumé

Les efflorescences ou blooms de cyanobactéries est la prolifération massive se produisant lorsque les conditions environnementales leur sont favorables, les Efflorescences toxiques (nuisibles) ont de nombreuses conséquences néfastes par la présence des cyanobactéries toxiques et de leurs toxines qui constituent une problématique environnementale et sanitaire émergente. Le phénomène se produit habituellement de l'eutrophisation par un excès de phosphore et l'azote dans l'eau. En Algérie, la présence des efflorescences des cyanobactéries est une menace sérieuse dans différentes sources d'eau; de ce fait des plans de gestion de ressources en eau sont nécessaires.

Mots clés : efflorescences de cyanobactéries, toxines, problématique environnementale, Algérie.

Abstract

Efflorescences or Cyanobacteria blooms or blooms is the massive proliferation occurring when environmental conditions are favorable to them, toxic (harmful) blooms have many harmful consequences through the presence of toxic cyanobacteria and their toxins which constitute an emerging environmental and health problem. The phenomenon usually occurs from eutrophication by excess phosphorus and nitrogen in the water. In Algeria, the presence of cyanobacteria blooms is a serious threat in various water sources; therefore water resources management plans are necessary.

Key words : Cyanobacteria blooms, toxins, environmental problem, Algeria.

ملخص

الإزهار أو تكاثر البكتيريا الزرقاء هو فرط النمو الهائل الذي يحدث عندما تكون ظروف بيئية مواتية، وللإزهار السام (الضار) العديد من العواقب الضارة من خلال وجود البكتيريا الزرقاء السامة وسمومها التي تشكل مشكلة بيئية وصحية ناشئة و تحدث هذه الظاهرة عادة من التخثث من بفائض الفوسفور والنيتروجين في الماء. في الجزائر، يشكل وجود البكتيريا الزرقاء تهديداً خطيراً في مصادر المياه المختلفة. لذلك خطط إدارة الموارد المائية ضرورية.

الكلمات المفتاحية: إزهار البكتيريا الزرقاء ، سموم ، مشكلة بيئية ، الجزائر.

Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

AFSSA : L'Agence française de sécurité sanitaire des aliments

AFSSET : L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

ATX-a : Autotaxine-a

BMAA : La β -N-méthylamino-L-alanine

CR : cellules de résistance

CSHPF : Conseil supérieur d'hygiène publique de France

CV : La cellule végétative

Da : Dalton, masse moléculaire en atome gramme

DL50 : Dose létale qui tue 50 % des individus exposés pendant une durée précisée

ILEC : International Lake Environment Committee

ICBN : International Plant Nomenclature

LPS : lipopolysaccharides

MC : Microcystine

MOA : Matière Organique Algale

MON : Matière Organique Naturelle

Mcy : gènes de la microcystine synthétase

NH₄⁺ : Ammonium

NO⁻³ : nitrate

NOD : Nodularine

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

pH : Potentiel hydrogène

PSP : Paralytic Shellfish Poison

STX : Saxitoxine

UV : ultraviolet

Liste des figures

Figure	Titre	Page
01	Micromorphologie de quelques ordres des <i>cyanobactéries</i> (observations faites au microscope électronique à balayage). a) Les Chroococcales; b) Les Pleurocapsales; c) Les Oscillatoriales; d) Les Stigonématales; e) Les Nostocales	5
02	Différents types morphologiques des cyanobactéries	6
03	Cellules végétative, hétérocyste et akinète chez les cyanobactéries (<i>Anabaena solitaria</i>)	8
04	Les couleurs des efflorescences des cyanobactéries. a) efflorescence rouge; b) efflorescence verte; c) efflorescence violette; d) efflorescence marrons	10
05	Les efflorescences de cyanobactéries ont parfois l'apparence d'un déversement de peinture bleu-vert ou d'une purée de pois	10
06	Exemples d'efflorescences de cyanobactéries. a) Efflorescence de <i>Blennothrix</i> ; b) Efflorescence de <i>Anabaena</i>	11
07	Efflorescence d'algues bleu-vert (une faible densité)	12
08	Efflorescence de cyanobactéries (absence d'écume)	12
09	Efflorescence de cyanobactéries (présence d'écume)	13
10	Schéma des différentes capacités d'adaptation des cyanobactéries aux facteurs biotiques et abiotiques	16
11	Structure chimique de la cylindrospermopsine	23
12	Structures chimiques des dermatotoxines: (A) lyngbyatoxine A, (B) debromoaplysiatoxine et (C) aplysiatoxine	24
13	Aspect du bloom à cyanobactéries	29
14	Mortalité des tortues dans le lac Oubeïra en Algérie suite à une efflorescence de <i>Microcystis spp</i>	36

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Pages
01	Classification des cyanobactéries	5
02	Adaptations cyanobactéries aux différents paramètres d'influence	14
03	Description des différentes catégories de cyanotoxines	20
04	Les différentes microcystines MCs	22
05	Recommandations de gestion et de surveillance en fonction du niveau de contamination par les cyanobactéries	34
06	Liste des espèces de cyanobactéries potentiellement toxiques (selon AFSSA et AFSSET, 2006) identifiées au niveau des trois stations au cours de la période d'étude (Mai-Octobre, 2007)	39

Sommaire

Résumés

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction 1

Chapitre I : les cyanobactéries

1. Définition.....	3
2. Classification.....	3
3. Caractéristiques.....	6
3.1. Morphologie.....	6
3.2. Taille des cellules.....	7
3.3. Types de cellules.....	7

Chapitre II: Les efflorescences des cyanobactéries

1. Définition.....	9
2. Caractéristiques des efflorescences.....	9
3. Les différentes cyanobactéries efflorescentes.....	10
4. Géographie du phénomène.....	11
5. Les catégories d'efflorescence.....	11
5. Les paramètres de la formation d'efflorescences des cyanobactéries.....	13
6. Les causes et les mécanismes d'une efflorescence.....	15
7. Persistance d'une fleur d'eau.....	18

Chapitre III : Les efflorescences toxiques

1. Les différents types d'efflorescences nuisibles (toxiques).....	19
2. Les différentes catégories des cyanotoxines.....	19
2.1. Les neurotoxines.....	20
2.2. Les hépatotoxines.....	22
2.3. Les cytotoxines.....	23
2.4. Les dermatotoxines.....	24
2.5. Les molécules à effets irritants.....	24
3. Facteurs qui influencent la synthèse et la libération des cyanotoxines dans l'environnement.....	25

2.1. Facteurs physicochimiques	25
3.1.1. Phosphore.....	25
3.1.2. Azote.....	25
3.1.3. L'intensité lumineuse.....	26
3.1.4. Température et pH.....	26
3.2. Facteurs biologiques	26
3.2.1. Phase de croissance cellulaire	26
3.2.2 Présence de compétiteurs et de prédateurs.....	26
3.3. Facteurs génétiques.....	26

**Chapitre IV: Evaluation de l'impact des efflorescences des cyanobactéries,
réglementation et surveillance**

1. Aspect des efflorescences dans l'environnement aquatiques.....	28
2. Impacts des efflorescences des cyanobactéries.....	29
2.1. Impacts environnementaux : biodiversité et réseau trophique.....	29
2.2. Impacts sur la santé humaine	30
2.3. Impacts sur le plan économique	30
2.4. Impacts sur les usages.....	30
2.4.1. Impacts sur les procédés de traitement de l'eau.....	31
2.4.2. Impacts sur le tourisme	31
3. Réglementation et surveillance des efflorescences des cyanobactéries.....	31
3.1. Eaux de baignade.....	31
3.2. Eau potable.....	32

Chapitre V: Efflorescence des cyanobactéries en Algérie

1. L'eutrophisation dans l'Algérie	34
2. Les efflorescences toxiques.....	35
3. Les efflorescences des cyanobactéries dans différentes sources d'eau en Algérie	36
3.1. Les efflorescences des cyanobactéries dans les barrages	36
3.1.1. Le barrage Mexa.....	36
3.1.2. Le barrage d'Ain El Dalia Souk Ahras	36
3.2. Les efflorescences des cyanobactérie dans les lacs	37
3.2.1. Lac Oubeira- El Kala	37
3.3. Les efflorescence des cyanobactéries dans les eaux de cours d'eau et plans	37
Conclusion	39
Références bibliographiques	40

INTRODUCTION

Dans un milieu aquatique, les cyanobactéries deviennent problématiques si leurs populations s'accroissent de façon démesurée. Les proliférations formées, alors généralement visibles, on appelle cela des fleurs d'eau ou efflorescences ou encore les blooms. Les efflorescences formeront une mousse épaisse, peut être particulièrement comme de la soupe de Brocoli ou purée de pois, mais Il y a aussi des éclaboussures de peinture à la surface (écume). Ce phénomène peut être naturel ou toxiques (nuisibles), il peut être affecté par une pollution terrestre (nitrates, phosphates). Dans ce dernier cas, du fait de la consommation de tout l'oxygène dissous dans l'eau la nuit ou d'émissions de toxines libérées par certaines cyanobactéries, une floraison forte et durable conduira à des zones mortes, les efflorescences de cyanobactéries pour plus de la moitié toxique. Son apparence peut varier selon les espèces de cyanobactéries qui sont présentes dans le milieu aquatique et les conditions environnementales [1], par la présence de conditions optimales à leur croissance, par leur capacité à acquérir des ressources et par leur production de cellules de résistance (par ex. akinète) qui peuvent survivre longtemps dans les sédiments.

L'autre aspect majeur lié aux efflorescences est la production massive de matière organique. En effet, le développement des organismes photosynthétiques provoque la libération dans le milieu d'exsudats organiques liés à l'activité métabolique. Lors de la sénescence de ces organismes, d'autres composés organiques vont également être relargués. L'ensemble de ces molécules est appelé Matière Organique Algale (MOA). La dynamique de cette matière organique ne suit, à priori, pas celle de la Matière Organique Naturelle (MON) initialement présente au sein des ressources en eau. Ces composés organiques d'origine algale vont alors faire partie intégrante du cycle de la MON et contribuer à la modification de ses caractéristiques, en participant à son enrichissement. Ces modifications qualitatives et quantitatives vont également affecter les procédés de traitement des eaux et nécessiter une réadaptation de ces derniers. En effet, l'efficacité des procédés de traitement et en particulier de l'étape de coagulation-floculation, est largement dépendante des propriétés de la matière organique à traiter [2]

Notre projet de fin d'étude tente principalement à évaluer les efflorescences des cyanobactéries ; à déterminer leurs caractéristiques ; et à déterminer les impacts induites par ce phénomène, et finalement présenter les efflorescences des cyanobactéries en Algérie.

Ce manuscrit se compose de cinq chapitres :

- Le premier chapitre correspond à une synthèse des connaissances sur les cyanobactéries qui sont depuis plusieurs années d'une grande importance, il comprend une définition générale et la taxonomie des cyanobactéries ainsi que leurs caractéristiques;
- Le second chapitre présente les efflorescences des cyanobactéries : qui porte sur les paramètres du phénomène, et les facteurs de la prolifération des cyanobactéries;
- Le troisième chapitre concerne les toxines des cyanobactéries et les facteurs influençant leur synthèse et libération;
- Le quatrième chapitre, parle des impacts des efflorescences des cyanobactéries et de la réglementation ainsi que des mesures préventives;
- Le cinquième chapitre est porté sur les efflorescences des cyanobactéries en Algérie.

Le mémoire se termine par une conclusion qui présente la synthèse globale des chapitres. La liste complète des références utilisées est présentée à la fin du mémoire.

CHAPITRE I
LES CYANOBACTERIES

1. Définition

Les cyanobactéries sont des organismes de taille microscopique. Elles présentent à la fois des caractéristiques de bactéries (comme l'absence de membrane intracellulaire) et d'algues (comme leurs activités photosynthétiques grâce à la chlorophylle a [1]. Elles sont donc capables de photosynthèse avec dégagement d'oxygène. Cette double appartenance les a longtemps fait appeler algues bleues, cyanophycées ou encore cyanoprocaryotes. Aujourd'hui le terme d'oxyphotobactérie permet également de les caractériser. L'originalité de ces organismes, ainsi que la grande diversité de leurs modes de vie, ont justifié la création d'un embranchement distinct des autres végétaux [3].

2. Classification

En 1995, la classification des plantes ICBN (International Plant Nomenclature) comptait 150 genres et 2000 espèces de la famille des cyanobactéries, Les noms de genres et d'espèces de cyanobactéries sont ceux empruntés à la botanique, où La classification des botanistes est basée sur des critères : la taille des cellules, la présence ou l'absence de gaine, la présence ou l'absence d'hétérocystes ou d'akinètes, la nature des organes reproducteurs (spores, homogonies). A cette classification, il est nécessaire de faire les remarques suivantes :

- les caractères morphologiques peuvent varier en fonction du milieu ;
- le diamètre des trichomes et la présence ou l'absence de gaine varient également en fonction du milieu ;
- la présence ou l'absence d'hétérocystes dépend de la concentration en azote combiné autant que du génome. En effet, en présence de nitrates, l'algue bleue ne forme pas d'hétérocystes [4].

On peut diviser la classe des Cyanobactéries en deux sous-classes :

A. Les Coccogonophycidées : qui sont des formes solitaires ou coloniales parfois filamenteuses, mais sans hormogonie et se multipliant uniquement par coccospores unicellulaires. Elles renferment 3 ordres :

- **Les Chroococcales :** sont des algues bleues unicellulaires ou coloniales, non filamenteuses, sans aucune différenciation. La reproduction de ces cyanophycées se fait uniquement par simple division cellulaire ou fragmentation de colonies. Les cellules sont rondes ou ellipsoïdales (parfois allongées). Elles ont généralement

une membrane et une couche mucilagineuse épaisse, qui peut présenter ou non des couches concentriques. Elles n'ont pas d'hétérocyste et sont donc incapables de digérer l'azote. Elles forment souvent des colonies et des revêtements gélatineux (figure 1 a) [5].

- **Les Pleurocapsales :** le protothalle, constitué de filaments rampants et parfois associés à des filaments dressés, présente des divisions végétatives et des endospores (figure 1 b) [6].
 - **Les Oscillatoriales :** comprend de nombreuses espèces de cyanobactéries, qui ont toutes des cellules en forme de pièce de monnaie ou cylindriques réunies de bout en bout pour former des filaments simples et non ramifiés. Les Oscillatoriales sont courants dans les assemblages de phytoplancton d'eau douce et certaines espèces peuvent former des fleurs denses. Bon nombre des espèces se ressemblent beaucoup, ce qui rend difficile la séparation des genres dans ce groupe de cyanobactéries. Les genres les plus courants associés aux fleurs toxiques sont *Lyngbya* (y compris les espèces déplacées au genre *Limnoraphis*), *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Planktothrix* et *Tychonema* (figure 1 c) [7].
- B. Les Hormogonophycidées :** qui sont des formes filamenteuses à trichomes souvent entourés d'une gaine, à multiplication par hormogonie pluricellulaire. Dans cette sous-classe, on rencontre souvent des espèces à hétérocystes. Elles renferment deux ordres :
- **les Stigonématales :** au protothalle parfois complexe avec hétérocystes ; leur multiplication se fait par hormogonies (figure 1 d).
 - **Les Nostocales :** dont le thalle réduit en un sporocyste filamenteux, sans ramifications véritables, est constitué par des trichomes avec ou sans hétérocystes et se multipliant par hormogonie. Dans cet ordre, on observe chez certains genres de fausses ramifications simples ou géminées (figure 1 e) [6].

Tableau 1 : Classification des cyanobactéries [6].

Sous classe	Les Coccogonophycidées			Les Hormogonophycidées	
	Ordre	Chroococcales	Pleurocapsales	Oscillatoriales	Stigonematales
Genre	<i>Chamaesiphon</i> <i>Gloeabacter</i> <i>Synechococcus</i> <i>Glocothece</i> <i>Cyanothece</i> <i>Gloccocapsa</i>	<i>Dermocarpa</i> <i>Xenococcus</i> <i>Dermocarpella</i> <i>Myxosarcina</i> <i>Pleurocapsa</i>	<i>Spirulina</i> <i>Arthrospira</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Lyngbya</i> <i>Pseudanabaena</i> <i>Starria</i>	<i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Nodularia</i> <i>Nostoc</i> <i>Scytonema</i> <i>Calothrix</i>	<i>Fisherella</i> <i>Stigonema</i> <i>Geitieria</i>

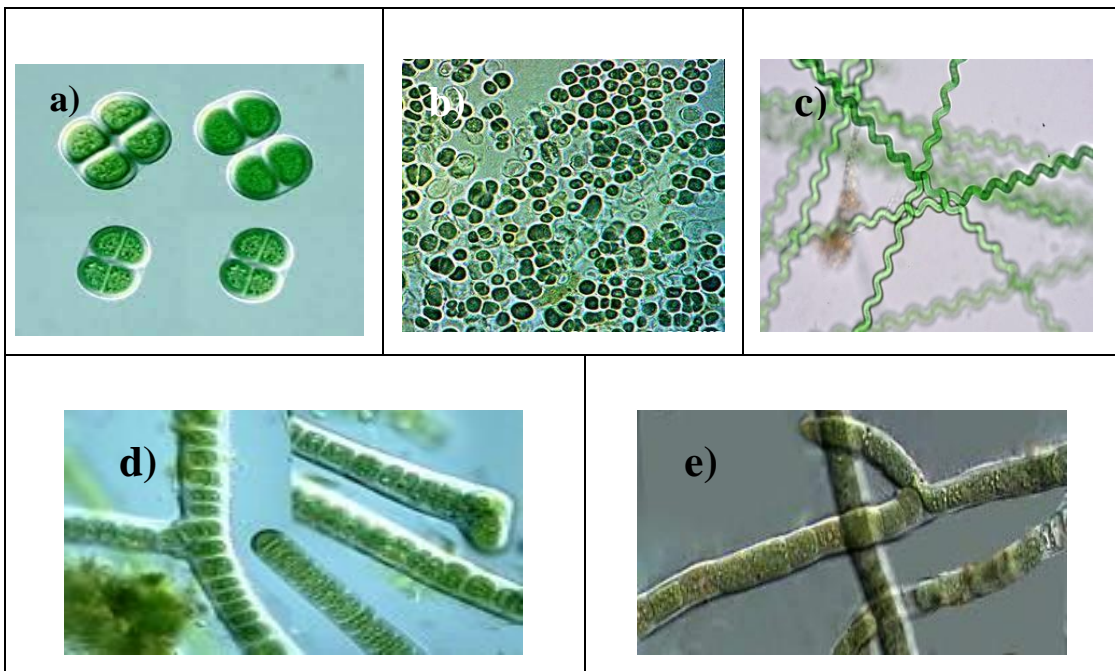


Figure 01 : Micromorphologie de quelques ordres des *cyanobactéries* (observations faites au microscope électronique à balayage). a) Les Chroococcales; b) Les Pleurocapsales; c) Les Oscillatoriales; d) Les Stigonématales; e) Les Nostocales

[8]

3. Caractéristiques

Les cyanobactéries sont des procaryotes à Gram négative. Beaucoup d'entre eux peuvent être déplacés par reptation ou grâce à des vésicules gazeuses. Elles sont nommées les algues bleues, suivant les auteurs, Cyanophycées, Schizophycées, Myxophycées ou Cyanobactéries forment avec les Bactéries l'embranchement des Schizophytes. Trois caractères donnent à cet embranchement son originalité : les cellules ne présentent ni noyau véritable, ni plaste, il n'y a pas de reproduction sexuée. Les cyanobactéries se distinguent des bactéries par la présence de chlorophylle A et de pigments accessoires hydrosolubles, les phycobilines rouge (phycoérythrine) et bleue (phycocyanine). Elles possèdent aussi des caroténoïdes : β -carotène, échinénone, zéaxanthine, myxoxanthophylle, etc. La présence simultanée de ces différents pigments – en proportion variable – leur confère toutes les gammes possibles du vert, du bleu, du rouge et du violet, le bleu « canard » restant toutefois la couleur la plus fréquente. Certaines espèces présentent une adaptation chromatique à la vie en eau profonde grâce à des variations du rapport phycoérythrine : phycocyanine [6].

3.1. Morphologie

Elles présentent une grande diversité morphologique. Certaines sont unicellulaires, sphériques ou en bâtonnets et se multiplient par divisions binaires, d'autres sont filamenteuses et se propagent par rupture du filament végétatif ou par germination des akinètes (spores). Certaines peuvent différencier des cellules spécialisées, telles que les hétérocystes, les akinètes et les hormogonies. Certaines présentant des ramifications qui peuvent être de plusieurs types (figure 2) [9].

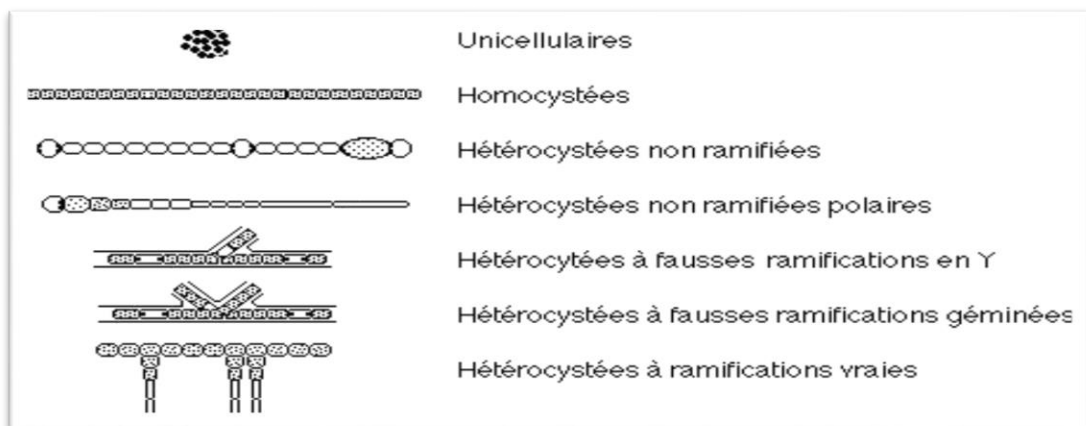


Figure 2 : Différents types morphologiques des cyanobactéries [10]

3.2. Taille des cellules

La largeur des cellules peut varier entre 0,6 μm et 10 μm . Le diamètre moyen des cellules est compris entre celui des bactéries et celui des algues sensu stricto [4].

3.3. Types de cellules

Les formes les plus complexes possèdent les trois types de cellules : des cellules végétatives, des hétérocystes et des akinètes.

- La cellule végétative (CV) : est du type procaryote. Le plasma périphérique (chloroplasme) est habituellement plus fortement pigmenté que le centroplasme et contient des pigments qui sont concentrés dans des phycobilisomes situés sur la surface de lamelles photosynthétiques (thylacoïdes) [11].
- L'hétérocyste : est une cellule transparente, à paroi épaisse, habituellement translucide, qui se rencontre chez certaines cyanobactéries (dites hétérocystées). Il est le site de la fixation d'azote et se forme à partir des cellules végétatives en conditions de manque d'azote. Il est caractérisé par la présence de nodules polaires aux points d'attache aux cellules végétatives. Suivant les espèces, on rencontre des hétérocystes intercalaires et/ou terminaux. Les hétérocystes peuvent être circulaires, ovales, triangulaires, canes ou rectangulaires.
- Les akinètes : sont des spores immobiles (absence de flagelle) produites chez les formes hétérocystées. Elles sont résistantes aux conditions défavorables et demeurent viables sur de longues périodes (passage à l'état de vie ralentie [12] ou en dormance), elles se forment lorsque les conditions de l'environnement deviennent défavorables comme par exemple : faible luminosité, températures basses, changement de pH, faible concentration d'éléments nutritifs et déshydratation. On peut les distinguer par leur grande taille, leur forme, leur pigmentation modifiée, leur paroi épaisse et la présence de nombreux granules cytoplasmiques. Les akinètes peuvent être lisses ou ornementés. Les akinètes peuvent se former n'importe où sur le filament. On observe cependant souvent une localisation préférentielle au voisinage des hétérocystes [12].

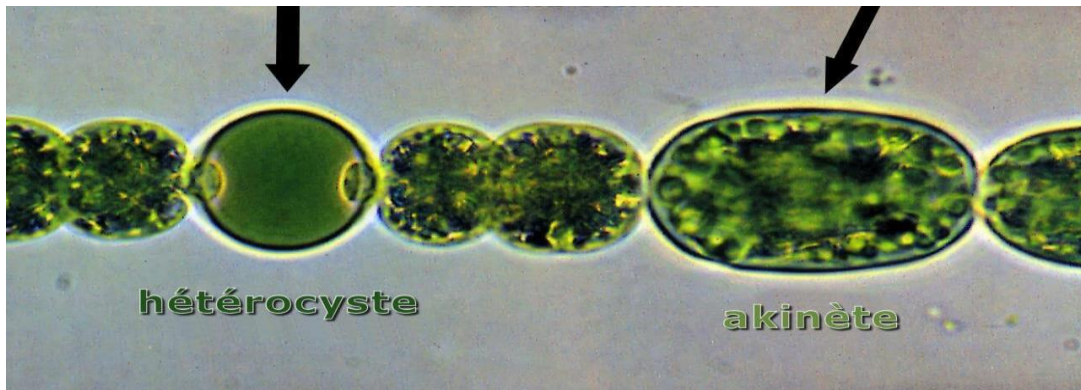


Figure 3 : Cellules végétative, hétérocyste et akinète chez les cyanobactéries
(*Anabaena solitaria*) [12]

CHAPITRE II

LES EFFLORESCENCES DES

CYANOBACTERIES

1. Définition

Les efflorescences ou blooms de cyanobactéries sont définies comme « des phases de prolifération massive se produisant lorsque les conditions environnementales leur sont favorables » [2]. Les efflorescences des cyanobactéries correspondent à une densité égale ou supérieure à 20 000 cellules de cyanobactéries par ml, que ce phénomène devient visible à l'œil nu. Lorsqu'une fleur d'eau d'algues bleu-vert s'entasse à la surface de l'eau, souvent près du rivage, elle est appelée « écume » et elle peut avoir l'aspect d'un déversement de peinture ou d'un potage au brocoli [13].

2. Caractéristiques des efflorescences

Les algues bleu-vert sont des organismes microscopiques dont le nom scientifique est « cyanobactéries ». Leur apparition ne date pas d'hier : les cyanobactéries existent depuis trois milliards d'années. Si les conditions sont favorables, elles peuvent se proliférer et former ce qu'on appelle « Les efflorescences des cyanobactéries » [14]. Ces proliférations se caractérisent notamment par la production, sur une période de temps courte (quelques jours), d'une biomasse importante, d'une forte diminution de la diversité spécifique dans le compartiment phytoplanctonique) car une ou deux espèces deviennent alors très largement dominantes [2].

Cependant, il est très difficile de définir un seuil de biomasse au delà duquel il est possible de considérer l'apparition d'une prolifération, car ce seuil devrait à la fois tenir compte du statut trophique de l'écosystème aquatique concerné, mais également de l'évolution temporelle de la biomasse ainsi que de l'espèce considérée. En effet, bien que le terme « prolifération de cyanobactéries » soit employé dans la réglementation. Les proliférations de cyanobactéries sont des phénomènes dynamiques dont le développement ainsi que la disparition peuvent être très rapides. Ainsi, en l'état actuel des connaissances scientifiques, il n'est pas possible de caractériser les phénomènes de blooms avec précision, par des valeurs seuils de nombre de cellules ou de temps de doublement. On parle d'efflorescence ou de bloom pour des concentrations supérieures à un million de cellules par litre [2].

La couleur d'efflorescence varie selon le type de cyanophycée et selon leur densité ; les couleurs varient du violet (figure 4 c) au presque rose en passant par le rouge (figure 4 a) principalement sur l'herbe à tortue ou les marrons sombres (figure 4

d) sur le sable et herbiers, aussi vert (figure 4 b), elles peuvent former un film bleu très caractéristique en surface [15, 16, 17, 18].

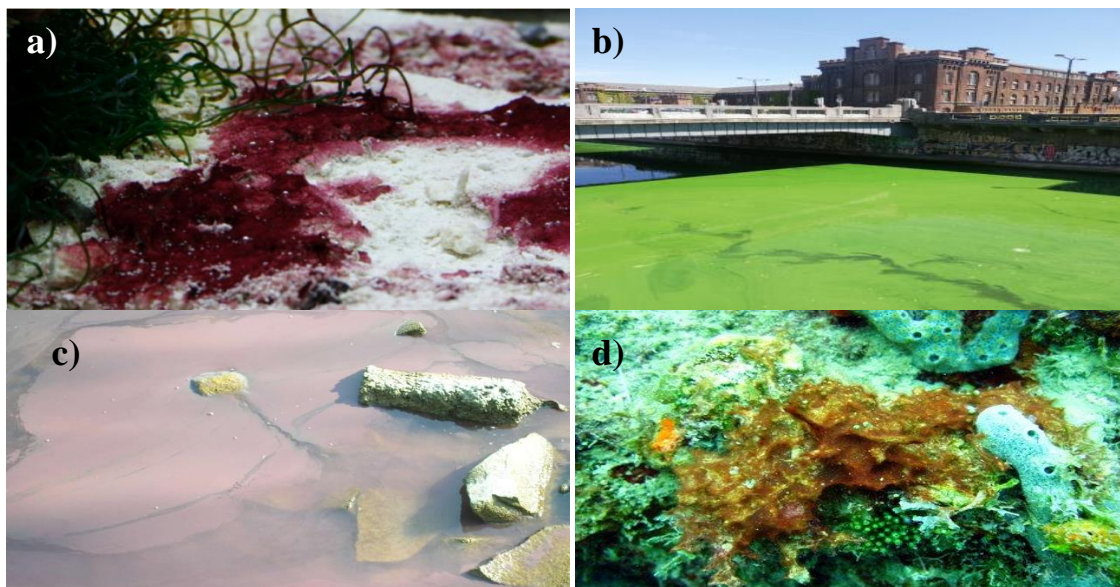


Figure 4 : Les couleurs des efflorescences des cyanobactéries. a) efflorescence rouge [15] ; b) efflorescence verte [16] ; c) efflorescence violette [17] ; d) efflorescence marrons [18]

Elle peut aussi avoir différentes textures, ressemblant tantôt à des morceaux gluants en suspension dans l'eau, tantôt à de l'écume ou de la mousse, ou encore à du colorant ou de la peinture (figure 5) [19].



Figure 5 : Les efflorescences de cyanobactéries ont parfois l'apparence d'un déversement de peinture bleu-vert ou d'une purée de pois [20]

3. Les différentes cyanobactéries efflorescentes

- Les principaux genres formants des efflorescences sont les suivants : *Microcystis*, *Planktothrix*, *Blennothrix* (figure 6 a), *Gloeotrichia*, *Anabaena* (figure 6 b), *Anacystis*, *Lyngbya*, *Symploca* et *Oscillatoria*.
- Les principaux genres de cyanobactéries toxiques incluent : *Microcystis*, *Planktothrix*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Nostoc* et *Aphanizomenon* [9].

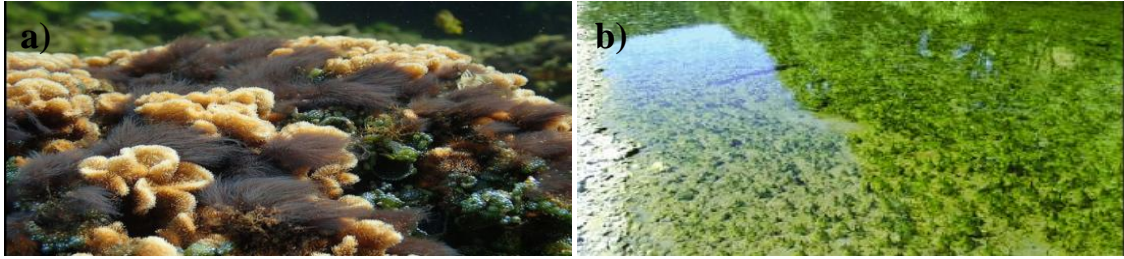


Figure 6 : Exemples d'efflorescences de cyanobactéries. a) Efflorescence de *Blennothrix* [9] ; b) Efflorescence de *Anabaena* [21]

4. Géographie du phénomène

Les efflorescences pas n'arrive tout seul. Ils sont le résultat d'une combinaison de nombreux facteurs, énumérés ci-dessous. Ils sont rares dans les eaux oligotrophes des océans tropicaux, et plus fréquents dans les régions tempérées proches des plateaux continentaux et des littoraux (en particulier en aval des embouchures de rivières hautement humanisées) [8].

5. Les catégories d'efflorescence

Catégorie 1

- Visible à l'œil nu;
- Une faible densité de particules qui sont réparties de façon clairsemée dans la colonne d'eau (figure 7).

Elle peut donner l'apparence d'une eau anormalement trouble, de particules qui semblent flotter entre deux eaux ou d'agrégats (flocons, boules ou autres) ou d'amas assez éloignés les uns des autres. La fleur d'eau peut être plus difficile à observer, puisqu'elle ne donne pas l'impression d'un changement dans la consistance de l'eau. La densité des particules peut varier grandement, allant de quelques particules à plusieurs particules clairsemées dans la colonne d'eau.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Conseil régional de l'environnement des Laurentides, Document de soutien au Protocole de suivi visuel d'une fleur d'eau d'algues bleu-vert [14].



Figure 7: Efflorescence d'algues bleu-vert (une faible densité) [14]

Catégorie 2

- Une densité moyenne à élevée de particules distribuées dans la colonne d'eau;
- Absence d'écume (Figure 8)

Les algues bleu-vert peuvent être réparties dans la colonne d'eau et ressembler notamment à une soupe au brocoli, à de la peinture, à des agrégats (boules, flocons, filaments ou autres) ou à des amas rapprochés les uns des autres ou à une purée de pois.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Conseil régional de l'environnement des Laurentides, Document de soutien au Protocole de suivi visuel d'une fleur d'eau d'algues bleu-vert [14].



Figure 8: Efflorescence de cyanobactéries (Absence d'écume) [14]

Catégorie 3

- Une densité très élevée;
- Présence d'écume (figure 9).

Des algues bleu-vert à la surface de l'eau qui forment ce que l'on appelle une écume. La fleur d'eau sous forme d'écume peut être balayée par le vent et s'entasser près du rivage. La densité d'algues bleu-vert y est alors très élevée. Une écume peut ressembler à un déversement de peinture et se présenter sous forme de traînées, d'un film à la surface de l'eau ou de dépôts près de la rive [14].



Figure 9 : Efflorescence de cyanobactéries (Présence d'écume) [14]

5. Les paramètres de la formation d'efflorescences des cyanobactéries

De nombreux facteurs interviennent dans le déclenchement et l'amplification des proliférations des cyanobactéries (tableau 2). D'après le rapport de l'AFSSA/AFSSET (2006), ces micro-algues peuvent se développer correctement lorsque les concentrations en nutriments sont supérieures à 20 $\mu\text{g/l}$ pour le phosphore (qui constitue le principal facteur limitant en eau douce) et 1 mg/l pour l'azote. Elles nécessitent aussi la présence de dioxyde de carbone et de lumière ainsi que d'une stabilité élevée de la colonne d'eau (faible débit, peu de brassage). La profondeur est, elle aussi, un facteur influençant les processus de développement des cyanobactéries. En effet, elle intervient sur la disponibilité en nutriment. La température et le pH sont des facteurs abiotiques influençant le développement des cyanobactéries et sont compris respectivement entre

15 et 30°C intervalle du pH (8-10) ainsi que l'importance du ratio N/P et en énergie lumineuse. Dans les lacs profonds ou les retenues d'eau, une zone d'anoxie se crée régulièrement à la surface des sédiments favorisant le relargage de phosphore par ces derniers. Cette situation d'anoxie est propice aux déclenchements de blooms [22].

Tableau 2 : Adaptations cyanobactéries aux différents paramètres d'influence [2].

Paramètres d'influence	Adaptation des Cyanobactéries
Température	- Optimum de température généralement plus élevés ($\approx 25^{\circ}\text{C}$)
Luminosité	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptation chromatique : changement de la sensibilité chromatique en fonction des longueurs d'onde disponibles (production de phycoérythrine ou phycocyanine), avantage en eaux troubles - Protection contre les UV : mécanismes de réparation de l'ADN - Migration verticale (régulation de la flottabilité grâce à des vésicules de gaz) : adaptation de la position dans la colonne d'eau ; meilleur accès à la lumière en surface
Nutriments	<ul style="list-style-type: none"> - Mixotrophie possible - Fixation de l'azote atmosphérique grâce à des cellules spécialisées (Hétérocystes) : l'azote n'est pas un facteur limitant - Réserves internes : C (glycogène), N (cyanophycine), P - Migration verticale (régulation de la flottabilité grâce à des vésicules de gaz) : adaptation de la position dans la colonne d'eau : meilleur accès aux nutriments près des sédiments - Production de sidérophores : molécules permettant la modification de la spéciation chimique d'un élément pour augmenter sa biodisponibilité (ex. le fer) ou réduire sa toxicité (ex. le cuivre)
Stabilité de la colonne d'eau	Faible tolérance au brassage des eaux : nécessite une stabilité de la colonne d'eau car faibles taux de croissance (à 20°C et saturation lumineuse)
Prédation	<ul style="list-style-type: none"> - Toxines/composés allélopathiques - Organisation structurale : coloniale englobée dans un mucilage ou filamenteuse, difficile à consommer par les prédateurs
Ph	- Tolérance aux pH élevés (8-10)

Conditions Défavorables	- Cellules de résistance : akinètes (Nostocales, Stigonematales)
Compétition	- Composés allélopathiques - Toxines - Formation d'écume en surface : effet d'ombrage

6. Les causes et les mécanismes d'une efflorescence

L'apparition d'une fleur d'eau est causée principalement par un excès de phosphore et l'azote dans l'eau. Une eau riche en nutriments, chaude, calme et peu profonde est le lieu de prédilection des cyanobactéries où les sources de phosphore sont souvent reliées aux activités humaines, entre autres : installations septiques qui s'écoulent dans ou vers le lac, utilisation d'engrais (naturels ou artificiels), activités agricoles et forestières, pisciculture, déversement d'eaux usées industrielles ou municipales [23]. Aussi les conditions environnementales (canicule, sécheresse, eaux troubles...) favorise le développement des cyanobactéries, surtout par l'eutrophisation des étangs, dont l'enrichissement provient du nourrissage des oiseaux d'eau mais également des poissons avec du pain notamment. Les petits fragments non consommés, mais aussi les déjections des oiseaux, enrichissent le milieu aquatique ; ce qui favorise la pullulation des cyanobactéries et d'autres microorganismes pathogènes [24].

Les efflorescences pourraient être dues à une combinaison entre des conditions environnementales exceptionnelles et les stratégies adaptatives des cyanobactéries qui ont la capacité de s'adapter aux conditions de leur environnement et d'optimiser l'exploitation de leur milieu. Par exemple, elles peuvent constituer des colonies, faire varier leur flottabilité grâce à des vacuoles gazeuses, excréter une gaine ou un mucilage et produire des cellules spécialisées pour capter l'azote atmosphérique quand les conditions environnementales sont propices, les conditions environnementales qui favorisent le déroulement de certaines étapes clés de leur cycle de vie, illustre la production de cellules de résistance (CR), en fonction des conditions qui sont favorables ou défavorables à la croissance des cyanobactéries [25].

Certaines efflorescences saisonnières ou périodiques localisées peuvent être normale, à cause d'une remontée d'eau profonde froide et riche en nutriments par

exemple (Upwelling), ou à la suite de mouvements de nappes phréatiques (au printemps souvent) [17].

- **Les phénomènes d'eutrophisation**

Dont l'origine est naturelle, sont grandement accélérés par les activités anthropiques, par l'intermédiaire des rejets en azote et phosphore principalement. Ces rejets sont liés aux activités industrielles et de transport qui génèrent des pollutions allant de l'agriculture, avec l'utilisation intensive d'engrais, aux activités domestiques, ou encore aux rejets de stations d'épuration des eaux ou liés à l'assainissement non collectif. Ces apports excessifs en nutriments sont véhiculés via les eaux de ruissellement et d'infiltration, puis finissent par s'accumuler dans les écosystèmes fermés que constituent les lacs notamment. Dans les milieux aquatiques, l'azote et le phosphore sont les deux principaux facteurs limitants du développement des organismes photosynthétiques [2].

- **Capacités d'adaptation des cyanobactéries aux facteurs biotiques et abiotiques**

Les cyanobactéries sont soumises à un contrôle "bottom-up" - par voie ascendante – pour l'accès à l'énergie fournie par la lumière et aux nutriments, ainsi qu'un contrôle "top-down" - par voie descendante - par les prédateurs et les parasites. Elles vont ainsi chercher à s'adapter à ces facteurs (figure 11) [22].

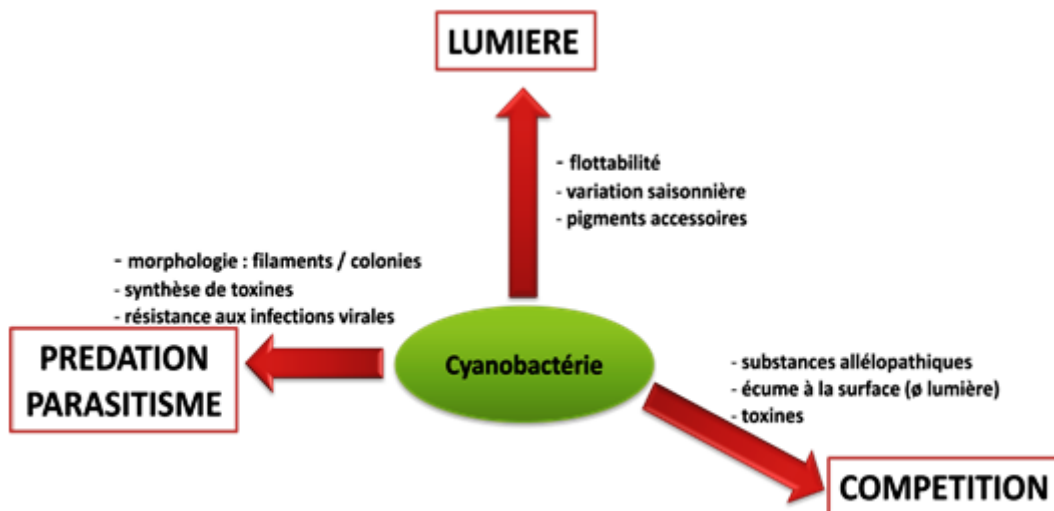


Figure 11 : Schéma des différentes capacités d'adaptation des cyanobactéries aux facteurs biotiques et abiotiques [22]

- Capacités d'adaptation aux facteurs abiotiques

Les cyanobactéries ont tendance à apparaître selon le rythme des saisons, principalement entre mai et septembre. Cependant, elles peuvent être présentes durant l'automne voire même durant l'hiver. Nous observons régulièrement la succession suivante : diatomées, chlorophycées et cyanobactéries [22].

Certaines espèces de cyanobactéries (comme *Microcystis aeruginosa*) ont un cycle biologique qui suit les variations saisonnières afin d'optimiser leur survie en fonction des conditions environnementales. Par ailleurs, les pigments accessoires leur permettent de capter la lumière plus profondément, notamment en faisant varier le ratio phycoyanine/phycoérythrine [22].

Les déplacements verticaux constituent un caractère adaptatif apparu chez certaines espèces afin d'optimiser les ressources nutritives et lumineuses et peuvent se dérouler de manière journalière ou saisonnière. En effet, les cyanobactéries vont migrer vers la surface afin d'atteindre la zone euphotique. A cet endroit, l'intensité lumineuse y est plus forte (au minimum 1% de la lumière incidente) et la température de l'eau y est plus élevée. Ainsi, leur développement est facilité par les conditions environnementales et elles intensifient leur photosynthèse. Lorsqu'elles redescendent en profondeur, elles recherchent des nutriments de type phosphore et azote. Ces derniers proviennent du bassin versant et du stock interne des sédiments qui les accumulent au fil des années et qui devient une véritable source d'alimentation pour le phytoplancton. Elles peuvent aussi périr et se déposer dans le fond pour passer un ou plusieurs hivers [22].

- Capacités d'adaptation aux facteurs biotiques

Face aux prédateurs, les cyanobactéries savent se défendre efficacement. Leur morphologie en filament ou en colonie, les rend impropres à la consommation par la plupart des organismes brouteurs comme le zooplancton. Ces algues bleues doivent être également compétitrices vis-à-vis des autres organismes phytoplanctoniques. Pour cela, elles possèdent certains avantages écologiques comme la possibilité de synthétiser des substances allélopathiques qui viendront perturber le cycle de vie de ses congénères. La possible influence des toxines sur les chlorophycées ou autres diatomées n'a pas encore été démontrée. De plus, lorsque les cyanobactéries prolifèrent jusqu'à former un bloom, elles limitent l'espace disponible pour les autres organismes phytoplanctoniques et augmentent la turbidité de l'eau empêchant alors la pénétration de la lumière. Dans ces

conditions, les diatomées et les chlorophycées restantes meurent et précipitent dans le fond du lac [22].

7. Persistance d'une fleur d'eau

Plusieurs hypothèses ont été proposées afin d'expliquer la présence et la persistance des fleurs d'eau ou des écumes à la surface d'un plan d'eau. Les cyanobactéries peuvent ajuster leur flottaison afin de tirer le meilleur parti des conditions environnementales, c'est-à-dire un bon éclairage dans les couches supérieures de la colonne d'eau durant le jour et une richesse en éléments nutritifs en profondeur durant la nuit. Il est donc fréquent que l'écume due à une fleur d'eau disparaisse en fin de journée pour réapparaître le matin. Mais comment expliquer la persistance d'écume pendant plusieurs jours, suggère que ce phénomène pourrait être causé par une défaillance de la régulation de flottaison due à des dommages physiologiques ou à la sénescence des cellules. En effet, il est suggéré qu'une exposition excessive à de fortes intensités lumineuses en surface induise des dommages physiologiques diminuant la croissance et la photosynthèse, réduisant ainsi la régulation de la flottaison [26].

CHAPITRE III

LES EFFLORESCENCES TOXIQUES

Les efflorescences à cyanobactéries toxiques constituent une problématique environnementale et sanitaire émergente dont la prise en compte par les pouvoirs publics s'est accrue ces dernières années. Cependant, les déterminants de la présence d'efflorescences à cyanobactéries et les facteurs contrôlant leur dynamique et leur production de toxines doivent encore être précisés [27].

1. Les différents types d'efflorescences nuisibles (toxiques)

Les efflorescences des cyanobactéries nuisibles sont souvent classés en trois groupes: celles qui produisent des fortes biomasses, celles qui produisent des toxines et celles qui sont nuisibles pour les poissons et les invertébrés [28].

Le premier groupe comprend les espèces qui produisent des fortes biomasses dans des environnements abrités tels que des baies. Elles deviennent nuisibles quand elles provoquent des problèmes d'anoxie qui entraînent des mortalités chez les poissons et les invertébrés. Cette anoxie résulte, en général, de la respiration bactérienne lors de la décomposition des cellules en fin d'efflorescence (*Trichodesmium erythraeum*) [28].

Le deuxième groupe d'efflorescences nuisibles rassemble des espèces capables de produire des toxines. Parmi ces toxines, Les toxines paralysantes (ou PSP en anglais pour "paralytic shellfish poisoning") produites par *Anabaena circinalis* [28].

Le dernier groupe d'efflorescences toxiques rassemble des espèces qui ne sont pas toxiques pour l'homme, mais qui peuvent endommager ou colmater les branchies des poissons et des invertébrés, entraînant généralement la mort par asphyxie (par exemple. *M. aeruginosa*) [28].

2. Les différentes catégories des cyanotoxines

Différentes théories sont actuellement en discussion. La production de ces toxines pourrait contribuer à augmenter l'avantage compétitif des cyanobactéries dans le « but » d'atteindre la dominance du monde aquatique. Ces toxines permettraient d'éliminer les potentiels compétiteurs pour les ressources ainsi que des prédateurs. La microcystine, par exemple, protégerait les cyanobactéries contre la prédation par le zooplancton. Mais les toxines auraient également des fonctions régulatrices du métabolisme cellulaire et interviendraient dans la croissance de la cellule. En effet, il semble que leur production soit liée au métabolisme primaire, directement corrélé à la croissance cellulaire [29].

De nombreuses espèces de cyanobactéries produisent des métabolites à fort potentiel de toxicité. Il existe généralement plusieurs catégories de toxines (neurotoxines, hépatotoxines, etc.) [22].

Tableau 3 : Description des différentes catégories de cyanotoxines [22].

	Hépatotoxines	Neurotoxines	Dermatotoxines
Exemples	Microcystines Nodularine Cylindrospermopsine	Saxitoxines (ex : PSP ³) Anatoxines β-N-méthylamino-L-alanine (BMAA)	Lyngbyatoxine LPS (lipopolysaccharides divers)
Exemples d'espèces associées	<i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Cylindrospermopsis</i> <i>Microcystis</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Planktothrix</i>	<i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Cylindrospermopsis</i> <i>Microcystis</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Planktothrix</i> <i>Pseudoanabaena</i>	<i>Oscillatoria</i> <i>Planktothrix</i>
Modes d'action	Inhibition de la synthèse protéique en se liant à l'enzyme phosphatase des cellules du foie	Perturbation de la transmission nerveuse	Fixation sur les membranes cellulaires
Effets	Hépatotoxicité hémorragique, fibrose, cytolyse hépatique, tumeur au foie et au tube digestif	Maux de tête, malaise, vomissement, diarrhées, paralysie	Allergies cutanées : inflammations, démangeaisons, irritations ...

2.1. Les neurotoxines

Elles affectent les systèmes nerveux et respiratoire et peuvent causer des tremblements musculaires, la stupeur, le déséquilibre, une paralysie rapide, des problèmes respiratoires et, avec un mode d'action spécifique à chaque famille [29].

- Les anatoxines, alcaloïdes parmi lesquels on trouve :

L'anatoxine a, amine secondaire de 165 daltons, soluble dans l'eau, peu stable et rapidement dégradée dans l'environnement. Chez la souris sa DL50 (la dose létale pour 50 % est la quantité d'une matière, qui, administrée en une seule fois, cause la mort de la moitié des animaux d'un groupe d'essai) est de 250 µg/kg en intrapéritonéale et de plus de 5000 µg/kg par voie orale.

L'anatoxine a(s) est un ester de phosphate de 252 daltons, instable au pH alcalin et à la chaleur. Sa DL50 chez la souris par voie intrapéritonéale est de 20 µg/kg [29].

- Les saxitoxines (STX) qui forment une famille de 25 variantes d'alcaloïdes à noyau tétrahydropurique. Leur poids moléculaire varie de 241 à 491 daltons. Elles sont très stables dans l'eau.
- La BMAA ou β-méthylamino-L-alanine, molécule de type acide aminé [29].

L'anatoxine a est un agoniste des récepteurs à l'acétylcholine. L'acétylcholine étant le neurotransmetteur principal de la jonction neuromusculaire, l'anatoxine entraîne donc une dépolarisation de la jonction neuromusculaire qui se traduit par des fasciculations musculaires, des convulsions et l'apparition d'une détresse respiratoire. L'acétylcholine intervient également dans la transmission de l'influx nerveux au niveau de synapses du système nerveux central et périphérique. Elle subit normalement une dégradation permanente par l'acétylcholinestérase qui ne peut en revanche dégrader l'anatoxine a, entraînant alors son accumulation. Ceci a pour conséquence l'apparition d'un syndrome cholinergique et en particulier des troubles psychiques, une faiblesse musculaire et une activité sécrétoire excessive.

L'anatoxine a(s), quant à elle, inhibe spécifiquement l'acétylcholinestérase. L'acétylcholine n'est alors plus suffisamment dégradée. Elle s'accumule et provoque une stimulation excessive des récepteurs cholinergiques. Les effets induits sont similaires à ceux observés avec l'anatoxine a (syndrome cholinergique). L'anatoxine a(s) est cependant dix fois plus toxique pour l'animal que l'anatoxine a.

Les anatoxines n'ont pas montré d'effet embryotoxique lors d'études sur la reproduction, excepté aux doses entraînant une toxicité sévère chez la mère (retard de croissance et malformations) [29].

Pour ce qui est des saxitoxines, celles-ci inhibent la transmission nerveuse en bloquant les canaux sodiques. Ce qui a pour conséquence un syndrome PSP (Paralytic Shellfish Poison). Les symptômes observés chez un animal intoxiqué sont des tremblements, une suffocation, des convulsions et un opisthotonos (état d'hyper-extension et de raideur, dans lequel la tête, le cou et la colonne vertébrale d'un individu forment un pont [29].

Un autre mécanisme de neurotoxicité a été observé pour la BMAA qui agit comme un agoniste du récepteur glutamate. Le glutamate étant un neurotransmetteur excitateur, la BMAA entraîne également une excitation des neurones qui y répondent [29].

2.2 . Les hépatotoxines

Ce sont les toxines les plus fréquemment rencontrées lors de proliférations. On distingue 3 grandes familles qui sont :

- Les microcystines (MCs), peptide cyclique de 7 acides aminés. On distingue plus de 80 variantes de masse moléculaire comprise entre 800 et 1100 daltons. Les variantes proviennent majoritairement de substitution d'acide aminé en position 2 et 4 ou bien du retrait/ajout d'un groupement méthyle sur les acides aminés 3 et 7 (tableau 4). Les MCs sont solubles dans l'eau et très stable dans l'environnement, la toxicité (ici exprimée en DL50) est variable en fonction du type de MCs. La MC-LR (pour leucine en 2 et arginine en 4) étant la plus toxique par voie intrapéritonéale. Si l'on considère la voie orale, on obtient une DL50 chez la souris de plus de 5000 µg/kg [29].

Tableau 4 : Les différentes microcystines MCs [29].

Microcystine	X	Z	DL50, voie IP, souris
MC-AR	Alanine	Arginine	250µg/kg
MC-FR	Phénylalanine	Arginine	250µg/kg
MCHicR	Homosoleucine	Arginine	100µg/kg
MC-HtYR	Homotyrosine	Arginine	80-100µg/kg
MC-La	Leucine	Alanine	50µg/kg
MC-IR	Leucine	Arginine	50µg/kg
MC-IY	Leucine	Tyrosine	90µg/kg
MC-M(□)R	méthionine sulfoxyde	Arginine	700-800µg/g
MC-RR	Arginine	Arginine	500-800µg/g
MC-Wr	Trptophane	Arginine	150-200µg/g
MC-YA	Tyrosine	Alanine	60-70µg/kg
MC-yM(□)	Tyrosine	méthionine sulfoxyde	56-110µg/kg
Mc-YR	Tyrosine	Arginine	150-200µg/g

- Les nodularines sont des peptides cycliques de 5 acides aminés. On distingue 9 variantes en fonction de la position des méthylations. Elles sont très proches des MCs, même gamme de poids moléculaire et propriétés physico-chimiques identiques.

- La cylindrospermopsine est un alcaloïde de 415 daltons. Il en existe 2 variantes, un non toxique et un toxique avec une DL50 après injection intrapéritonéale chez la souris de 2,1 mg/kg. C'est une molécule très polaire et soluble dans l'eau [29].

2.3. Les cytotoxines

Une cytotoxine hautement toxique soit par voie orale ou par voie orale ou par injection c'est la cylindrospermopsine. C'est un alcaloïde de 415 Da, produit principalement par *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Umezakia natans*, *Aphanizomenon ovalisporum*, *Raphidiopsis curvata*, possède une unité guanidine tricyclique (Figure12). C'est une molécule très polaire et très soluble dans l'eau, en solution sa demi-vie est supérieure à 10 jours. ont pu isoler deux congénères de cette molécule, une toxique dite la 7 épicylindrospermopsine et l'autre non toxique dite la désoxycylindrospermopsine. La DL50 par voie intra péritonéale chez la souris de la cylindrospermopsine est de 2,1 mg/kg [30].

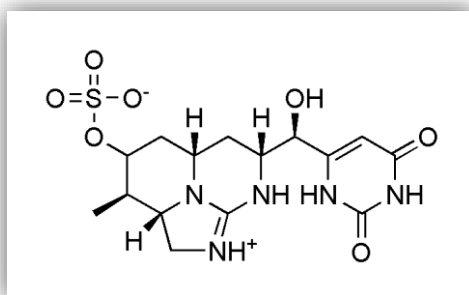


Figure 12 : Structure chimique du la cylindrospermopsine [30]

La cylindrospermopsine bloque la synthèse des protéines et provoque un empoisonnement au niveau des reins, du foie ainsi que des dommages dans la rate, les intestins, le cœur et le thymus. Chez les animaux intoxiqués par la cylindrospermopsine pure, les gastroentérites observées au niveau des hépatocytes sont suivies d'une accumulation de lipide dans le foie ce qui semble être corrélée avec une inhibition de la synthèse protéique. Cependant, l'injection intrapéritonéale d'extraits aqueux de *Cylindrospermopsis* met en évidence des dommages dans d'autres organes comme les intestins, les reins, l'estomac, la rate et le cœur, ce qui suggère un mode d'action non sélectif et/ou la présence d'autres toxines [30].

2.4. Les dermatotoxines

La lyngbyatoxine A (figure 9a), la débromoaplysiatoxine (figure 9b) et les aplysiatoxines (figure 9c) sont des alcaloïdes retrouvés chez des cyanobactéries benthiques telles que *Lyngbya majuscula*, *Oscillatoria nigroviridis* et *Schizothrix calcicola*. Ces toxines sont responsables de cas de fortes irritations cutanées et d'inflammation gastro-intestinales en zones de baignade. La lyngbyatoxine A a par ailleurs une structure similaire à la téléocidine A produite par un actinomycète (*Streptomyces*) qui est un agent potentiel de promotion tumorale. Aplysiatoxines et des activateurs de protéines kinase C [30].

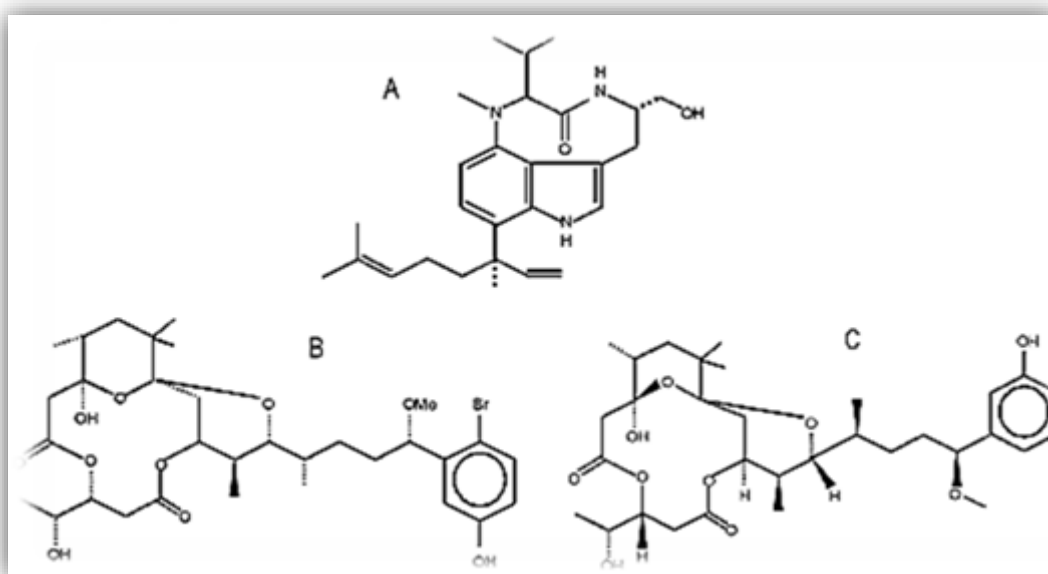


Figure 13 : Structures chimiques des dermatotoxines: (A) lyngbyatoxine, (B) débromoaplysiatoxine et (C) aplysiatoxine [30]

2.5. Les molécules à effets irritants

Il en existe de 2 types :

- Des alcaloïdes dermatotoxiques comme l'aplysiatoxine, la débromoaplysiatoxine et la lyngbyatoxine-a. Ces molécules ont été identifiées dans les eaux de mer mais pas encore dans les eaux douces.
- Les lipopolysaccharides (LPS) constitutifs de la paroi cellulaire, présents dans toutes les espèces de cyanobactéries. Ils pourraient également être responsables d'effets gastro-intestinaux en cas d'ingestion ainsi que d'irritation et d'inflammation des voies aériennes supérieures [29].

3. Facteurs qui influencent la synthèse et la libération des cyanotoxines dans l'environnement

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 [31].

3.1.1. 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.

De fait, plus la quantité de phosphore est importante dans le milieu, plus la croissance des cyanobactéries est importante et donc plus de toxines sont synthétisées. Une augmentation de la quantité de MCs (synthétisée par *Anabaena* sp, *Microcystis aeruginosa* et *Oscillatoria agardhii*), d'ATX-a (synthétisée par *Aphanizomenon* sp) et de NOD (synthétisée par *Nodularia spumigena*) est observée lorsque le phosphore est présent en quantité plus importante dans le milieu. Par contre, le phosphore n'a pas d'effet sur la synthèse d'ATX-a par *Anabaena* sp. le phosphore a une influence négligeable sur la quantité de MCs synthétisée par cellule, mais qu'il augmente la quantité totale de MCs synthétisée par le biais de l'augmentation du taux de croissance des cyanobactéries. L'influence directe du phosphore sur la synthèse de cyanotoxine par cellule est donc difficile à établir en raison des différences quantitatives et qualitatives entre les différentes espèces et souches de cyanobactéries [31].

3.1.2. 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. Les souches d'*Anabaena* sp., d'*Aphanizomenon* sp. et de *Nodularia* sp. toutes capables de fixer l'azote atmosphérique montrent des niveaux de MC, ATX-a et NOD intracellulaires plus élevées lorsqu'elles sont dans des milieux de culture sans azote. Au contraire, les souches d'*Oscillatoria* sp. et de *Microcystis* sp. non fixatrices d'azote produisent des toxines en quantité plus importante lorsque le niveau d'azote est élevé dans le milieu [31].

3.1.3. L'intensité lumineuse

Il existe une corrélation positive entre la lumière et la production de toxine. Tant que la lumière n'est pas en excès, elle stimule la croissance et donc la production de toxines jusqu'à un certain niveau d'éclairement. En effet, lorsque la lumière devient en excès cette production diminue. Une augmentation de l'intensité lumineuse peut également induire des changements dans la composition des MCs. Ainsi il a été démontré que la variante la plus toxique (MC-LR) était produite en plus grande quantité par *Planktothrix agardhii* sous de fortes intensités lumineuses. Ces résultats pourraient être expliqués par le fait que la lumière contrôle la transcription du gène *mcy*, responsable de la production de toxines [29].

3.1.4. Température et pH

La température optimale de production de toxines s'étend de 15 à 25 °C, selon les espèces. Par exemple aux températures inférieures à 25 °C, *Anabaena sp.* produit de la MC-LR plutôt que de la MC-RR, qui est préférentiellement produite à des températures supérieures [29].

3.2. Facteurs biologiques

3.2.1. Phase de croissance cellulaire

Il semble qu'il y ait une corrélation linéaire entre le taux de division cellulaire et la concentration intracellulaire en MCs chez *M. aeruginosa*. Le taux de MCs serait maximal durant la phase exponentielle de croissance et diminuerait à la fin de celle-ci [31].

3.2.2 Présence de compétiteurs et de prédateurs

La présence de prédateur comme le zooplancton induit une augmentation de la synthèse de MCs par *Microcystis sp.* Ceci mène à une hypothèse, à savoir que les toxines sont synthétisées comme mécanisme de défense. Par contre, le peu d'informations dans la littérature scientifique quant à l'effet de prédateur sur la synthèse et la sécrétions de cyanotoxines ne nous permet pas d'établir une influence évidente de la présence des prédateurs [31].

3.3. 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 subséquemment au niveau du nombre de copies d'ARNm. Le groupe de gènes qui code pour la MC est *mcy*

(ABCDEFGHIJ), l'effet de la lumière sur la transcription des gènes *mcyB* et *mcyD* est 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. ou l'intensité de la lumière influence sur la synthèse de diverses variantes de MCs. Par exemple, lorsqu'elle est exposée à une forte intensité lumineuse, la cyanobactérie *P. agardhii* synthétise des variantes plus toxiques de MCs [31].

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'IMPACT DES
EFFLORESCENCES DES
CYANOBACTERIES, REGLEMENTATION
ET SURVEILLANCE

1. Aspect des efflorescences dans l'environnement aquatiques

Les cyanobactéries sont des organismes «écostratégiques » pouvant adopter plusieurs comportements qui les conduisent à dominer les peuplements algaux :

- « écostratégiques agrégatifs » (Scum-forming), c'est le cas par exemple des genres *Microcystis*, *Anabaena* et *Aphanizomenon* qui utilisent au maximum la flottabilité assurée par les vésicules à gaz mais aussi par la constitution d'agrégats et/ou de faisceaux de cellules. Cela se traduit par la formation d'un tapis épais d'individus à la surface de l'eau où ils peuvent avoir une activité photosynthétique maximale [30].

- « écostratégiques dispersés ou stratifiants » c'est le cas de *Planktothrix* et *Limnothrix*. Ce sont des espèces filamenteuses sensibles aux fortes intensités lumineuses. La régulation de la flottabilité est moins efficace chez ces espèces qui se retrouvent alors dispersées dans l'épilimnion, arrivant parfois à éliminer les autres organismes phytoplanctoniques par simple ombrage. Cependant, ces espèces peuvent aussi adopter une stratégie différente en se développant au niveau de la thermocline où leur richesse en phycoérythrine leur permet d'absorber efficacement la lumière dans les longueurs d'ondes 490 à 570 nm (bleu et vert) [30].

- « écostratégiques fixateurs d'azote » certaines espèces de cyanobactéries appartenant aux genres *Aphanizomenon*, *Nodularia*, et *Nostoc* peuvent profiter d'une limitation de la disponibilité en azote sous forme directement assimilable (NO_3^- ou NH_4^+) pour dominer les autres espèces grâce à leur fixation d'azote.

Dans les milieux aquatiques, la biomasse de cyanobactéries atteint parfois de telles proportions que l'eau se colore et il se forme une efflorescence ou « bloom » selon les AngloSaxons. Des couches parfois très épaisses et éventuellement des écumes apparaissent à la surface de l'eau avec une durée assez variable, de quelques heures à plusieurs mois (figure 14). Ces efflorescences sont le plus souvent dominées par une ou un petit nombre d'espèces, présentant pour la plupart d'entre elles des vésicules à gaz [30].

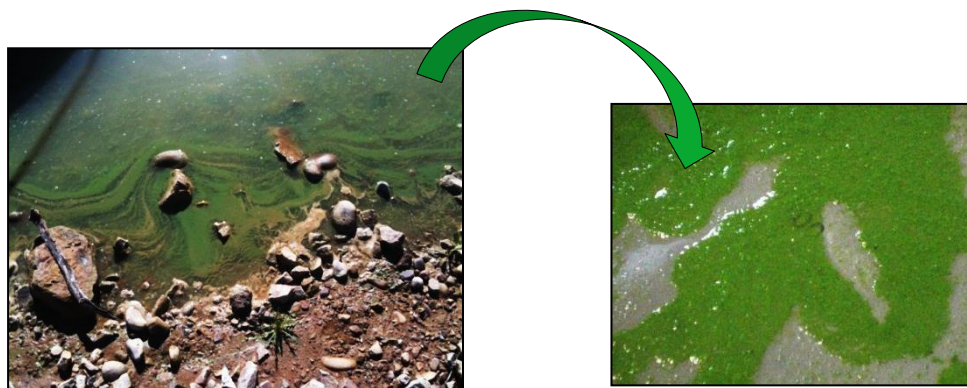


Figure 14 : Aspect du bloom à cyanobactéries [30]

2. Impacts des efflorescences des cyanobactéries

2.1. Impacts environnementaux : biodiversité et réseau trophique

Les effets des cyanobactéries et cyanotoxines sur le zooplancton sont jusqu'à présent mal compris et inconsistants. De façon générale, il semble évident que les cyanobactéries affectent le zooplancton. En effet, la question se pose à savoir si les effets inhibitoires sont associés à la faible valeur nutritive des cyanobactéries, à leurs toxines ou à des composés inconnus. Il est mentionné dans la littérature que les fleurs d'eau de cyanobactéries causent un déclin direct dans le nombre de cladocères de grande taille et d'ostracodes. Les fleurs d'eau de cyanobactéries peuvent également réduire le taux de reproduction des rotifères ainsi que le taux de croissance et de reproduction des cladocères. Selon Holm et Shapiro, les filaments d'*Aphanizomenon flos-aquae* ingérés par *Daphnia pulex* causent un retard de croissance et un indice lipidique plus faible, en plus d'inhiber la reproduction [27].

Des mortalités massives de poissons (fish kill) sont parfois observées lors de fleurs d'eau de cyanobactéries. La mort des poissons est souvent associée à l'anoxie générée suite à l'utilisation de l'oxygène par les bactéries lors de la dégradation d'une grande biomasse de cyanobactéries. Toutefois, plusieurs cas de mortalité de poissons ont été directement liés à la présence de toxines dans leurs tissus. La présence de cyanobactéries dans l'eau peut également obstruer les branchies lorsque la biomasse est extrême, entraînant ainsi la mort des poissons. Dans une étude portant sur l'accumulation et l'élimination des MC ingérées par un poisson planctonivore, Deblois a estimé à 30 % l'assimilation moyenne des MC disponibles dans la diète et à 84 % par jour le taux d'élimination par le foie des MC accumulées. Il est toutefois possible qu'une quantité de MC soit passée du foie vers un autre compartiment au lieu d'être

éliminée hors du poisson. Selon les recommandations de Deblois, un suivi des fleurs d'eau de cyanobactéries devrait être effectué même à de faibles concentrations en MC étant donné les taux d'accumulation observés dans les poissons [27].

2.2. Impacts sur la santé humaine

Leur présence n'est pas systématiquement détectable à l'œil nu. L'homme peut être exposé aux risques liés aux cyanobactéries par contact avec la peau et les yeux lors des activités de loisirs ou lors d'ingestion d'une eau contaminée. La chaleur favorisant son développement, les risques sont plus importants en période estivale [32].

Les efflorescences de cyanobactéries peuvent entraîner des troubles de la peau ou des muqueuses et un risque sanitaire important en cas d'ingestion, d'inhalation ou d'exposition par dialyse aux toxines. Ainsi il a été décrit :

- Des cas de gastro-entérites, d'affections hépatiques, de troubles rénaux et une augmentation de l'incidence de cancers colorectaux et hépatiques lors d'une exposition par l'eau de boisson ;
- Des cas d'éruption cutanée, d'allergies, de nausées, de vomissements, de diarrhées, de douleurs musculaires, de maux de tête, de pneumonie et de conjonctivites lors d'une exposition à l'occasion de baignades ou d'activités nautiques [29].

2.3. Impacts sur le plan économique

Les efflorescences des cyanobactéries qui entraînent la fermeture de zones d'aquaculture et d'agrément causent d'importantes pertes économiques. Elles entraînent aussi une forte diminution d'activités liées à la pêche, d'activités touristiques et de services connexes. Cela a pour conséquences une augmentation du chômage, des primes d'assurance et des prix des produits de la mer. Les efflorescences des cyanobactéries ont une incidence sur la sécurité sanitaire des produits de la mer, mais aussi sur leur sécurité alimentaire. Par exemple, la réglementation relative au poisson adoptée pour éviter l'intoxication ciguatérique prévoit dans la plupart des produits de la mer de certaines tailles d'espèces données [33].

2.4. Impacts sur les usages

2.4.1. Impacts sur les procédés de traitement de l'eau

La prolifération des cyanobactéries filamenteuses ou en bâtonnets peut impacter les filières de traitement de l'eau potable. En effet, ces algues sont difficilement retenues par floculation et s'accumulent alors dans les filtres en les colmatant. De plus, lorsqu'elles sont dans le décanteur, les algues relarguent de l'oxygène qui remet en suspension les sédiments normalement stockés au fond et crée une gêne mécanique. Les cyanobactéries provoquent, par ailleurs, une gêne organoleptique. Lorsque la lyse cellulaire se produit, en réaction avec l'oxydant chlore, elles libèrent leur cytoplasme qui contient des molécules odorantes comme la géosmine qui reste dans l'eau potable et qui apporte un goût de vase à l'eau en sortie du robinet. Ainsi, les blooms de cyanobactéries impliquent dans la chaîne de traitement de l'eau potable, des coûts plus élevés et une altération de la qualité de l'eau distribuée [22]. En outre, la matière organique générée en abondance lors des phénomènes de blooms de cyanobactéries a de nombreux impacts sur les étapes chimiques des procédés de traitement des eaux devant être considérés afin d'assurer la qualité de l'eau distribuée [2].

2.4.2. Impacts sur le tourisme

L'eutrophisation des plans d'eau dégrade leur image esthétique. Ils sont souvent décrits comme des lacs pollués et parfois même toxiques. Généralement, leurs principaux atouts sont leurs activités de baignade, de loisirs nautiques et de pêche. Lorsque ces derniers sont restreints ou fermés, c'est l'attrait du lac qui en est perturbé. Les campings, hôtels, bases nautiques peuvent voir leur fréquentation diminuée et les conséquences économiques peuvent être grandes. En fait, c'est l'ensemble des activités dépendantes de la qualité de l'eau et du milieu aquatique qui sont affectées (baignade, pêche...) [22].

3. Réglementation et surveillance des efflorescences des cyanobactéries

3.1. Eaux de baignade

Au niveau de l'Union européenne, la qualité de l'eau des zones de baignade et sports nautiques est régie par la directive européenne 76/160/CEE adoptée en 1976 et transposée en droit Français par le code de la santé publique (livre III, articles L1332). Cette directive ne comporte pas de cadre réglementaire pour la surveillance sanitaire des cyanobactéries ou cyanotoxines. En 2003 des recommandations de surveillance et de gestion de phénomènes de prolifération de cyanobactéries dans des eaux de baignade

ont été publiées par la Direction générale de la santé (circulaire DGS/SD7A 2003/270(34), 2004/364(35), 2005/304(36)) sur la base d'un avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France. Cet avis reprend l'avis de l'OMS de 1999 qui prévoit 3 niveaux d'alerte relatifs aux cyanobactéries et les mesures à prendre pour chaque niveau (Tableau numéro). Des précisions ont été apportées dans l'avis du CSHPF (Conseil supérieur d'hygiène publique de France) du 6 juillet 2004 [29].

Les gestionnaires de sites, ou le maire concerné, doivent mettre en place un système de surveillance renforcée pour les sites à risque (sensibles à l'eutrophisation, ayant déjà présenté des proliférations de cyanobactéries ou présentant une forte fréquentation) et un système de surveillance visuelle pour les autres sites (circulaire DGS/SD7A 2003/270, 2004/364, 2005/304).

La surveillance renforcée est basée :

- sur une observation visuelle
- sur la mesure de la turbidité ou observation au disque de Secchi ou la mesure du pH
- le dosage de chlorophylle a est possible mais utilisable que si les cyanobactéries sont majoritaires (confirmation par des observations microscopiques)

Tout changement des caractéristiques du milieu en faveur d'une prolifération doit conduire le gestionnaire du site à effectuer des prélèvements d'eau pour une observation microscopique. Si les cyanobactéries sont absentes ou présentes mais minoritaires, la surveillance renforcée est reconduite. Si les cyanobactéries sont présentes et majoritaires alors le dispositif décrit dans le tableau ci-dessous est déclenché [29].

3.2. Eau potable

L'OMS propose une concentration maximale acceptable de 1 µg/l de microcystine LR. Dans un premier temps, cette valeur a été reprise en France dans le décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles, qui est la transcription de la directive européenne n°98/83/CE. Il y est indiqué que la recherche de MC-LR doit être effectuée en cas de prolifération dans les eaux brutes [29].

Aujourd'hui, dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées

aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique, il est mentionné que c'est le « total MCs», c'est-à-dire la somme de toutes les MCs détectées et quantifiées, qui doit être inférieur à 1 µg/l pour les eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées [29].

Tableau 5 : Recommandations de gestion et de surveillance en fonction du niveau de contamination par les cyanobactéries [29].

Niveau	Nombre de cyanobactéries et teneur en MC-LR	Recommandations
Niveau 1	Nombre < 20 000 cellules/ml ± 20%	Gestion : informations du public au niveau des zones d'écume ou d'efflorescence et des zones d'usages. Surveillance : journalière renforcée et réalisation d'un comptage et d'une identification au moins bimensuelle
	Nombre compris entre 20 000 et 100 000 cellules/ml ± 20%	Surveillance renforcée quotidienne, comptage et identification hebdomadaire.
Niveau 2	Nombre de cellules > 100 000 cellules/ml ± 10% et taux de MC-LR < 25µg/l	Gestion : limitation de la baignade dans les zones les plus concentrées, informations du public. Surveillance : poursuite du suivi hebdomadaire.
	Nombre de cellules > 100 000 cellules/ml et taux de MC-LR > 25µg/l	Gestion : interdiction de la baignade et limitation des activités nautiques, informations du public. Surveillance : poursuite du suivi hebdomadaire.
Niveau 3	Présence de mousse ou d'écume	Gestion : interdiction de la baignade et de toutes les activités nautiques, prévenir tout contact de personnes ou d'animaux avec les écumes, informations du public. Surveillance : suivi de l'évolution des mousses ou écume et de leur localisation, poursuite du suivi hebdomadaire, suivi des concentrations en toxines au moins bimensuel.

CHAPITRE V

EFFLORESCENCE DES CYANOBACTERIES

EN ALGERIE

En Algérie le climat méditerranéen chaud, les écosystèmes d'eau douce subissent de plus en plus, le phénomène d'eutrophisation, qui se traduit par une efflorescence cyanobactérienne, ainsi que la production de toxines. La prolifération des cyanobactéries a été largement suspectée en Algérie, dans différents plans d'eau et les études sur la toxicité des cyanobactéries sont encore rares [34].

Dans l'Est algérien, les résultats d'un certain nombre de travaux réalisés dans divers plans d'eau révèlent la présence de 8 à 12 genres de cyanophycées, selon l'année et le plan d'eau étudié ; toutefois, la majorité des genres recensés est reconnue potentiellement toxique [35].

1. L'eutrophisation dans l'Algérie

L'Algérie est l'un des pays où la disponibilité de l'eau est limitée alors que les besoins sont en forte croissance. Cette croissance est due à l'explosion démographique, aux développements industriels et agricoles ainsi qu'à la sécheresse. Pour faire face à cette pénurie, la construction de barrages semble être la solution la plus adaptée pour répondre aux différents besoins. Si ces ouvrages constituent bien une nécessité pour garantir, en toute saison, l'approvisionnement en eau indispensable à notre pays, il conviendrait de contrôler et de protéger la qualité des eaux des barrages contre différentes sources de pollution, particulièrement, celles dues aux activités humaines, à savoir les pratiques agricoles, industrielles, et les rejets urbains [36].

Il faut noter que ces différents rejets chargés en produits polluants aboutissent souvent au milieu naturel sans aucun traitement préalable. Il faut ajouter à cela les processus naturels d'érosion des sols susceptibles d'apporter différents éléments pouvant être à l'origine de l'altération de la qualité de l'eau.

L'une des conséquences de cette situation est l'enrichissement de l'eau en nutriments, particulièrement le phosphore et l'azote, indicateurs d'un état avancé d'eutrophisation des eaux.

L'eutrophisation résulte d'un accroissement de la fertilisation de l'eau d'un lac par un apport d'éléments nutritifs, qui favorisent la prolifération du phytoplancton et des plantes aquatiques. Peu à peu, ce processus accélère la sédimentation: le lac se rétrécit, se comble et finit par disparaître. Ce phénomène a été classé, en 1997 par l'International Lake Environment Committee (ILEC), au quatrième rang des six risques majeurs susceptibles d'affecter les lacs et les réservoirs de la planète [36].

2. Les efflorescences toxiques

Les efflorescences toxiques sont associées à une eutrophisation croissante de plus en plus fréquente engendrant une dégradation de la qualité des eaux et pouvant se traduire par des pertes économiques et des risques pour la santé humaine. Les risques d'intoxication deviennent importants lorsque les blooms sont concentrés à la surface de l'eau au niveau des berges où ils s'accumulent [37]. Les efflorescences toxiques des cyanobactéries en Algérie provoquent de multiples dégâts : les cyanotoxines peuvent entraîner des symptômes de morbidité ou causer la mort de mammifères, d'oiseaux ou de poissons qui ingèrent une quantité suffisante de cellules toxiques ou de toxines extracellulaires. A rapporté la mortalité d'animaux ayant consommé de l'eau contenant de grands nombres ($>10^6$ /ml) de cellules cyanobactériennes. Les animaux incapables de sélectionner leur nourriture comme les oiseaux et les poissons sont directement affectés à la fois par les hépatotoxines et les neurotoxines, Mortalité des tortues (à des neurotoxines et des hépatotoxines de type MCs, ont rapporté la mortalité 12 tortues (figure 15) d'eau douce, de deux espèces *Emys orbicularis* et *Mauremys leprosa* dans le lac Oubeïra en Algérie par *Microcystis spp* lors de l'année 2005) [30].



Figure 15 : Mortalité des tortues dans le lac Oubeïra en Algérie suite à une efflorescence de *Microcystis spp* [30]

3. Les efflorescences des cyanobactéries dans différentes sources d'eau en Algérie

3.1. Les efflorescences des cyanobactéries dans les barrages

3.1.1. Le barrage Mexa

Dans le barrage Mexa situé au Nord-Est de l'Algérie, afin d'y rechercher des cyanobactéries potentiellement toxiques. Les MCs ont été spécialement recherchées. L'échantillonnage a été effectué durant 10 mois, de mars à décembre 2007. L'examen microscopique du phytoplancton montre la présence de huit genres de cyanobactéries dont cinq sont producteurs de toxines. Parmi ces derniers, le genre *Microcystis* prolifère régulièrement et domine le phytoplancton au mois de novembre et décembre, avec une densité cellulaire maximale de $2,101 \times 10^6$ cellules.ml⁻¹. Les teneurs de MCs intracellulaires déterminées par le test immunologique ELISA montrent que les valeurs les plus élevées atteignent 0,77 µg.l⁻¹ au mois de novembre. De plus, ces valeurs sont en concordance avec les densités cellulaires du genre *Microcystis sp.* et avec la concentration maximale de chlorophylle (a) obtenue [38].

3.1.2. Le barrage d'Ain El Dalia Souk Ahras

L'observation des caractères morpho anatomiques des cyanobactéries filamenteuses dans le barrage d'Ain El Dalia Souk Ahras récoltées nous a permis d'identifier huit genres (*Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Anabaena*, *Pseudoanabaena*, *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Spirulina*), dont la majorité est potentiellement toxique. Le suivi spatio temporelle des densités globales des cyanobactéries filamenteuses recensées fait apparaître la présence *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Pseudanabaena* et *Phormidium* dans les eaux traitées à des densités de 30 ind/l notamment en décembre et juin. Dans le site 2 (pollué), les cyanobactéries sont fortement représentées en novembre (40 ind/l), en février (55 ind/l) et en juin (70 ind/l). En ce qui concerne le site 3 (agricole), des teneurs de plus de 35 ind/l sont notées en janvier, mars, avril et mai. C'est en revanche dans le site 4 (exposé au vent) que sont notés 4 pics de 85 ind/l, 60 ind/l, 50 ind/l et 40 ind/l respectivement en octobre, décembre, mars et juin. Le calcul des densités globales des genres recensés fait apparaître la dominance de *Oscillatoria* suivie du genre *Lyngbya* et *Pseudoanabaena*. Selon le genre, certains préfèrent l'automne et le printemps (*Oscillatoria*, *Pseudanabaena*), d'autres le printemps (*Phormidium*) ou l'hiver (*Lyngbya*) [35]. Les barrages d'Ain El Dalia devraient être plus étroitement surveillés afin de mieux protéger les santés des utilisateurs [35].

3.2. Les efflorescences des cyanobactérie dans les lacs

3.2.1. Lac Oubeira- El Kala

L'étude de la dynamique spatiale des cyanobactéries peuplant le lac Oubeira- El Kala durant la période s'étalant de juin 2001 à juin 2002. Les données de l'observation des caractères morpho-anatomiques des micro-algues récoltées nous révèlent la présence de 11 genres de Cyanobactéries dont 9 sont reconnus potentiellement toxiques : *Anabaena*, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Pseudanabaena*, *Merismopedia*, *Aphanizomenon*, *Gomphosphaeria*, *Cylindrospermum*, *Synechocystis*, *Lyngbya* et *Phormidium*. Nous constatons, par ailleurs, une prédominance en densité du genre *Anabaena* ; toutefois, la fréquence d'apparition la plus élevée est enregistrée par le genre *Microcystis* ; ce dernier semble présenter de grandes capacités d'adaptation aux conditions environnementales. Le suivi de la distribution spatiale des Cyanobactéries identifiées montre que le site le plus exposé héberge les densités micro-algales les plus fortes [37].

3.3. Les efflorescence des cyanobactéries dans les eaux de cours d'eau et plans

L'évaluation des phénomènes l'eutrophisation par l'étude des cyanobactéries de trois milieux aquatiques urbains et périurbains de la région de Béjaia, willaya située à L'Est d'Alger, Sur l'ensemble des prélèvements effectués ont pu être identifiés :

- **Dans la lagune Tamelaht** : les Schizophyta prédominent avec 38 taxons (1 seule classe : Cyanophyceae). Sont représentées par l'unique classe des Cyanophyceae avec la moitié des espèces inventoriées (50%) et 22 taxons appartenant à eux seuls à la famille des Oscillatoriaceae ; les espèces les plus intéressantes appartiennent aux genres : *Oscillatoria*, *Microcystis*, *Lyngbya*, *Phormidium*, genres révélés très toxiques [39].
- **Dans Lac Mézaia** : plus de la moitié des taxons inventoriés appartiennent aux Schizophyta, soit 71 taxons qui représentent un pourcentage de 59,66%, avec dominance des formes filamenteuses, suivies par les Chlorophyta avec 36 taxons qui atteint 30,25% de la totalité des taxons identifiés [39].
- **Dans L'Embouchure de l'Oued Soummam** : d'après l'inventaire algal effectué pour ce milieu montre le plus faible effectif en comparaison avec les deux précédents. En effet, au total 54 taxons ont pu être identifiés: les schizophytes constituent 16 taxons, soit un pourcentage de 30,18% suivi par les Chlorophyta avec un nombre de taxons atteint égale à 11 (20,75%) [39].

- **Fréquence des Cyanophyceae toxiques**

Parmi les espèces d'algues bleues identifiées, quelques taxons reconnus nuisibles et producteurs de toxines sont présents. Le tableau 6 rassemble la liste de ces espèces selon les stations [39].

Tableau 6 : Liste des espèces de cyanobactéries potentiellement toxiques (selon AFSSA et AFSSET, 2006) identifiées au niveau des trois stations au cours de la période d'étude (mai-octobre, 2007) [39].

■ : Taxon identifié présent

	Les cyanophyceae toxiques inventoriées/famille	Stations		
		Lagune Tamelaht	Lac Mézaia	Embouchure de l'Oued Soummam
01	<i>M. Flos-aquae</i>		■	
02	<i>M. wesenbergii</i>	■	■	
03	<i>Pleurocapsa sp.</i>	■	■	
04	<i>Spirulina subsalsa</i>	■	■	
05	<i>Synechocystis aquatilis</i>		■	
Total		03	05	00
2. Famille des Nostocaceae				
06	<i>Anabaena affinis</i>	■	■	■
07	<i>Nostoc sp.</i>	■	■	
08	<i>Raphidiopsis sp.</i>	■		
Total		03	02	01
3. Famille des Oscillatoriaceae				
09	<i>Lyngbia major</i>	■	■	■
10	<i>L. majusculata</i>	■	■	
11	<i>Oscillatoria formosa</i>	■	■	■
12	<i>O. limosa</i>	■	■	■
13	<i>O. tenuis</i>		■	
Total/Famille		04	05	03
Total taxons / station		10	12	04

CONCLUSION

Conclusion

Notre travail consiste à l'étude bibliographique de l'efflorescence des cyanobactéries qui présentent une menace croissante pour la santé publique mondiale. La prolifération des cyanobactéries dans nos milieux est favorisée par certaines conditions environnementales particulières.

Les cyanobactéries possèdent des caractéristiques qui leur permettent de s'accroître de façon démesurée et former les efflorescences. Dans les milieux aquatiques, l'azote et le phosphore sont les deux principaux facteurs favorisant la prolifération des cyanobactéries. Les efflorescences des cyanobactéries se caractérisent par de nombreux caractères, qui se traduisent par une coloration de l'eau (en rouge, brun, brun-jaune ou vert), et de l'aspect quelque fois visqueux, l'odeur nauséabonde, la difficulté de traitement de l'eau contaminée (colmatage des filtres, élimination des toxines).

Plusieurs espèces de cyanobactéries peuvent produire de variété toxines en grandes quantités (les neurotoxines, les hépatotoxines, les cytotoxines, les dermatotoxine) qui occasionnent des problèmes dans nos ressources en eau et nos écosystèmes, et constitue un risque potentiel de santé.

Enfin Les efflorescence des cyanobactéries en Algérie ont des conséquences déférentes, comme tous les pays qui ont ce phénomène. Ainsi des plans de gestions du problème de l'eutrophisation est nécessaire face à ce problème naturelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Blais S., (2002). La problématique des cyanobactéries (algues bleu-vert) à la baie Missisquoi en 2001. Agrosol. P : 103.
- [2] Leloup M., (2013). Evaluation de l'impact des blooms algaux et d'efflorescences bactériennes sur les caractéristiques de la matière organique des eaux naturelles. Eau, Sol, Environnement. Thèse de Doctorat. Université de Limoges. France. P : 1-8-19.
- [3] Chardonnet P., (2007). Les cyanobactéries et leur toxines risques pour la sante et l'environnement aspects analytiques. Thèse de Doctorat en Pharmacie. Université de Limoges Faculté de Pharmacie. P : 17.
- [4] Silvano J., (2005). Toxicité des cyanobactéries d'eau douce vis-a-vis des animaux domestiques et sauvages. Thèse de Doctorat en MédecineVétérinaire. Université Claude-Bernard. Lyon. P : 25.
- [5] Jean-François Fortier et al., (22/07/2016). Ordre Chroococcales. Aquariophiles. Disponible sur : <https://www.aquaportail.com/taxonomie-ordre-131-chroococcales.html> consulté le 02/05/2021.
- [6] Pierre Bourrelly., Jean Claude lefeuvre., (2021). Cyanobactéries ou cyanophycées, anc. Algues bleues. Encyclopædia Universalis. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/cyanobacteries-cyanophycees-algues-bleues/>. consulté le 16/04/2021.
- [7] Antoine Houriet., (7/2015). Fiche inforative sur les Cyanobactéries. Centre Nature les Cerlatez. Disponible sur : <https://www.centre-cerlatez.ch/wp-content/uploads/cyano.pdf>. consulté le 17/04/21.
- [8] cyanobacteria (dernière mise à jour 21/02/2021, 10/4/2021) Wikipédia. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Discussion:Cyanobacteria>. consulté le 03/04/21.
- [9] Pierre Armand Roger., (2006). Les cyanobactéries : definition. Disponible sur : <http://www.pierre-armand-roger.fr/cyanobacteries/pages/Introduction/definition.htm>. consulté le 03/05/21.
- [10] Garcia j-l., Cayol j-l., Roger p., (2012). Cyanobacteria : Phylum BXI du Domaine Bacteria. Disponible sur : http://www.pierre-armand-roger.fr/Taxo_bacterienne/aaBXI.html. consulté le 03/05/21.
- [11] Jean-Louis Garcia, Jean-Luc cayol et Pierre Roger., (5/2012). Cyanobacteria : Phylum BXI du Domaine Bacteria. Disponible sur : http://www.pierre-armand-roger.fr/Taxo_bacterienne/aaBXI.html. consulté le 07/05/21.

- [12] Bouchoukh Imane., (2016/2017). Cours de botanique. Faculté des sciences de la nature et de la vie. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Constantine-1. Algérie. Vol 103. P : 8. Disponible sur : <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/tc/2017/cours/Cours%20botanique%20bouchoukh.pdf> f. consulté le 10/05/21.
- [13] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques Québec. (2018). Algues bleu-vert Gestion des épisodes de fleurs d'eau. Disponible sur : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/algues-bv/gestion/index.htm>. consulté le 30/05/2021.
- [14] Organisme des bassins versants du nord-est du bas-saint-laurent engagé dans la gestion intégrée de l'eau depuis 10 ans Québec., (2008). Les cyanobactéries. Disponible sur : <https://www.obv.nordestbsl.org/cyanobacterie.html>. consulté le 09/6/2021.
- [15] Quentin Mauguit., (19/07/2012). Réchauffement climatique : les algues prospèrent dans les lacs européens. Futura Planète. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-rechauffement-climatique-algues-prospere-lacs-europeens-40152/>. consulté 01/06/21.
- [16] Emilie Lavender., (07/2019). Les algues bleues (cyanobactéries). Environment Brussels. Disponible sur : <https://environment.brussels/node/2854>. consulté 03/06/21.
- [17] Lavender E., (2019). Les algues bleues (cyanobactéries). Environment Brussels. Disponible sur : <https://environment.brussels/node/2854>. consulté 03/06/21.
- [18] Berthot J.M., Ferry R., (2009). Prolifération des cyanophycées sur les herbiers et les fonds sableux et corallien sur la côte caraïbes de l'île de la Martinique. Site : Anse DUFOUR. Disponible sur : <http://www.biologiemarine.com/00001/cyanophycee/index.html>. consulté le 17/06/21.
- [19] Le Memphémagog Conservation., (5/2008). Cyanobacteries. Québec Science. Disponible sur : <https://www.memphremagog.org/fr/cyanobacteries>. consulté le 08/06/21.
- [20] Chrystelle Matte-Richer et al., (2009). Les cyanobactéries. © CRE Laurentides. Canada. Vol 4. P : 2-4. Disponible sur : file:///D:/httpsprogres.mesrs.dzwebinscriptionpagesprocedureprocedures.xhtml/1m%C3%A9moire%20aster%202/tel%C3%A9chargeant/fiche_cyanobacteries.pdf. consulté le 08/06/21.
- [21] Keith B.G., Kudela R.M., Mary E., (2018). Power Widespread anatoxin-a detection in benthic cyanobacterial mats throughout a river network. Plos one. P : 21.

- [22] Austruy E., (2012). Apports de phosphore et proliférations de cyanobactéries dans le Lac au Duc (Morbihan) : Diagnostic et propositions d'actions préventives et curatives potentielles. le cadre d'ingénieur. Génie de l'Environnement (Agrocampus Ouest-Rennes). Observatoire Départemental de l'Environnement du Morbihan ODEM. Morbihan. P : 6-7-8-10.
- [23] Catherine Béland., (2006). Municipalité de Labelle. Copyright ©. Labelle (Québec) n°2. Vol 32. Disponible sur : https://www.municipalite.labelle.qc.ca/images/documents/Infomunicipale/2006/info_2006_08.pdf. consulté le 04/06/21.
- [24] L'environnement et de l'énergie Bruxelles., (2019). Les algues bleues (cyanobactéries). Disponible sur : <https://environnement.brussels/node/2854>. consulté le 08/05/21.
- [25] Jourdain Myriam., (2010). Les effets des variables environnementales sur le recrutement des cyanobactéries et des akinètes. Mémoire de maîtrise en Biologie. Université du Québec. Montréal. P : 4-5.
- [26] Isabelle Lavoie et al., (2007). Les fleurs d'eau de cyanobactéries : Revue de littérature. Rapport de recherche. INRS Eau, Terre et Environnement. Québec. n° 916. v 17. P : 13-63.
- [27] Arnaud C., (2009). Déterminisme des efflorescences et de la toxicité des cyanobactéries en milieu périurbain (Ile-de-France). Thèse de Doctorat, Ecole doctorale en Sciences de la nature et de l'Homme - Évolution et écologie. Paris. P : 240.
- [28] Fauchot J., (2006). Ecologie du dinoflagellé toxique *Alexandrium tamarens* dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent: facteurs environnementaux affectant l'initiation et le développement des efflorescences. Thèse de Doctorat en Océanographie. Université du Québec, Rimouski. P : 127.
- [29] Vonarx J., Camus G., (2008). Cyanobactéries et cyanotoxines. Planet-Vie. Disponible sur : <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/cyanobacteries-et-cyanotoxines>. consulté le 27/05/21.
- [30] Amrani A., (2016). Impacts écologiques et sanitaires de la prolifération massive des cyanobactéries toxiques sur la faune piscicole et la production aquacole dans le lac Oubeïra : Bioaccumulation des cyanotoxines dans les poissons et risques sanitaires associés. Thèse de Doctorat en toxicologie fondamentale et appliquée. Université Badji Mokhtar –Annaba-, Algérie. P : 2-3.

- [31] Mélanie Ouellet., (2012). Écotoxicologie des toxines des cyanobactéries. Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env). Centre universitaire de formation en environnement. Universitaire de Sherbrook. Canada. P : 17-23.
- [32] Edenn., (2002). Cyanobactéries. Disponible sur : <http://www.edenn.fr/eau/cyanobacteries/#:~:text=Cyanobact%20%C3%A9rie,%20%A0%20prolif%20%C3%A9rer%20avec%20la%20chaleur>. consulté le 30/05/21.
- [33] Dixit A., (5/2017). Atténuation de l'impact des efflorescences algales nuisibles à l'aide de techniques nucléaires. Bureau de l'information et de la communication de l'AIEA. 17-2859. Disponible sur : https://www.iaea.org/sites/default/files/mitigating-the-impact-of-harmful-algal-blooms-using-nuclear-based-techniques_fr.pdf. consulté le 6/05/21.
- [34] Sandra Amri., Zidane Branes., Brahim Oudra., (2010). Inventaire des cyanobactéries potentiellement toxiques dans la tourbière du lac noir « parc national d'el-kala » (ALGERIE) Inventory of potentially toxic Cyanoba. Microbiol. Ind. San et Environn. n°1. Vol 4. P : 52.
- [35] Boualleg Chahinez et al., (2014). Evolution spatio-temporelle des cyanobactéries filamenteuses peuplant le barrage d'Ain el Dalia (Souk Ahras). 1er Séminaire National sur la Santé et Bio-Surveillance des Ecosystèmes Aquatiques University of Souk Ahras - Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras. <http://www.univ-soukahras.dz/en/publication/article/145>. P : 1-2-4.
- [36] Souaad Bouzid-Lagha., Belkheir Djelita., (2012). Etude du phénomène d'eutrophisation dans le Barrage de Hammam Boughrara (Wilaya de Tlemcen, Algérie) Study of eutrophication in the Hamman Boughrara Reservoir (Wilaya de Tlemcen, Algeria). P : 186-201.
- [37] M. Souissi., R. Chaibi., C. Bouallag., M. Melizi., M. Bensouilah., (2004). Les Cyanobactéries d'un plan d'eau douce (le Lac Oubeira- El Kala). Inventaire et répartition spatiale. Sciences et technologies. P : 38.
- [38] A. Ouarts., A. Saoudi., D. Chekireb., (2011). Etude des efflorescences toxiques à cyanobactéries dans le barrage mexa, Algérie. Rev Microbiol Ind San et Environn. P : 81.
- [39] Djouad Salima., (2007). Contribution à l'étude de la diversité algale notamment les cyanobactéries dans trois plans d'eau de la région de Béjaia. Mémoire de Magister en

Ecologie et Environnement. Université Abderrahmane Mira, Béjaia. Algérie. P : 101-102-104-108.