



Fleur d'eau d'*Anabaenopsis* sp



Colonie de *Microcystis aeruginosa*

LES FLEURS D'EAU DE CYANOBACTÉRIES

Document d'information vulgarisée

Isabelle Lavoie¹, Isabelle Laurion¹, Warwick Vincent²

¹Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, 490 rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9.

²Département de Biologie, Université Laval, Québec, G1K 7P4.

LAVOIE, I., I., LAURION et W.F. VINCENT, 2007. Les fleurs d'eau de cyanobactéries, document d'information vulgarisée. INRS rapport n° 917, 25 p.

Courriel : isabelle.laurion@ete.inrs.ca

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
PRÉAMBULE	v
I – LES CYANOBACTÉRIES... EN UN CLIN D’OEIL	1
Que sont les cyanobactéries?	1
Qu’est-ce qu’une fleur d’eau de cyanobactéries?.....	2
L’eutrophisation et les fleurs d’eau	3
Comment les fleurs d’eau de cyanobactéries se distinguent-elles des autres végétaux?..	4
Pourquoi les cyanobactéries sont-elles si performantes?	4
Comment s’explique la persistance d’une fleur d’eau?	6
II - LES CYANOTOXINES	7
Que sont les cyanotoxines?.....	7
Pourquoi les cyanobactéries produisent-elles des toxines?	8
III - LES FACTEURS DE CONTRÔLE	9
Où et quand les fleurs d’eau surviennent-elles?.....	9
Quelles sont les conditions favorables à la prolifération des cyanobactéries?.....	10
Nutriments (phosphore et azote)	10
Stratification thermique	11
Lumière	13
Herbicides	13
Contrôle de l’environnement par les cyanobactéries.....	13
Les changements climatiques vont-ils affecter les fleurs d’eau de cyanobactéries?.....	14
Quels sont les facteurs favorisant la production de cyanotoxines?	15
Rôle de l’azote	15
Croissance cellulaire	15
Effets de la lumière	15
IV – FOIRE AUX QUESTIONS	17
Pourquoi les fleurs d’eau de cyanobactéries sont-elles nuisibles?.....	17
Les cyanotoxines persistent-elles longtemps dans l’environnement?	18
Pourquoi observe-t-on des fleurs d’eau en milieu oligotrophe?.....	18
Peut-il y avoir des fleurs d’eau de cyanobactéries lorsque l’eau est froide ou recouverte d’une couche de glace?.....	19
Les cyanobactéries peuvent-elles produire des cyanotoxines en eau froide?	20
Les cyanobactéries entrent-elles en dormance?	20
Les cyanobactéries et les cyanotoxines peuvent-elles atteindre les eaux souterraines et les puits?.....	21
Est-il possible de provoquer une fleur d’eau par contamination d’un lac à l’autre?	21
Comment freiner la problématique grandissante des fleurs d’eau de cyanobactéries au Québec?	21
POUR EN SAVOIR PLUS	25

Coordination

Isabelle Laurion

Auteurs

Isabelle Lavoie, INRS-ETE
Isabelle Laurion, INRS-ETE
Warwick Vincent, Université Laval

Remerciements

Les auteurs remercient les personnes suivantes pour leur contribution à l'élaboration de ce document.

Mise en page, révision linguistique et aide à la vulgarisation :

Caroline Richard, Diane Tremblay et Béatrice Morel (INRS-ETE).

Discussions, conseils et transfert d'information :

Sylvie Blais (chargée du dossier cyanobactéries au MDDEP), David Bird (professeur à l'UQAM), Stéphane Campeau (professeur à l'UQTR) et Marie-Andrée Fallu (UQTR, agente de liaison scientifique au GRIL).

Révision :

Sylvie Blais (Direction du suivi de l'état de l'environnement ou DSÉE, MDDEP), Isabelle Giroux (DSÉE, MDDEP), Caroline Robert (Direction des politiques de l'eau ou DPE, MDDEP), Normand Rousseau (DPE, MDDEP), Denyse Phaneuf (Institut national de santé publique du Québec, MSSS), Marie-Claude Lacombe (Direction de la santé publique des Laurentides, MSSS), Linda Tapin (DSÉE, MDDEP) et Luc Berthiaume (DSÉE, MDDEP).

PRÉAMBULE

Les fleurs d'eau de cyanobactéries ne sont pas un phénomène propre aux écosystèmes aquatiques du Québec, ni une problématique nouvelle. En effet, plusieurs pays sont aux prises avec des proliférations massives de cyanobactéries, plusieurs étant toxiques. De plus, l'apparition de ces fleurs d'eau dans les écosystèmes d'eau douce à travers le monde a connu une augmentation importante depuis les dernières décennies.

Au Québec, depuis 1999, les directions régionales du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) ont reçu des signalements de fleurs d'eau de cyanobactéries pour environ 197 milieux aquatiques (tous n'ayant pas été validés en laboratoire). La problématique des fleurs d'eau de cyanobactéries sévit dans plusieurs bassins versants sur la rive nord et sur la rive sud du Saint-Laurent. Le nombre de milieux aquatiques touchés par les fleurs d'eau et signalés au Québec est passé de 43 en 2004 à 49 en 2005 et à 107 en 2006. Un milieu aquatique correspond à un tronçon de cours d'eau, un lac ou une partie de lac. Le nombre de milieux équivaut au nombre de municipalités ayant des usages comme une plage publique ou une prise d'eau municipale sur un plan d'eau touché par une fleur d'eau de cyanobactéries. Par exemple, en 2006, les 107 municipalités ou milieux aquatiques touchés se répartissaient sur 83 plans d'eau (lacs et cours d'eau).

Certaines espèces de cyanobactéries produisent des toxines qui représentent un danger pour les humains et les animaux. En plus du risque sanitaire associé à certaines cyanobactéries productrices de toxines, les fleurs d'eau de cyanobactéries affectent l'aspect esthétique d'un plan d'eau, sont responsables de la production de composés malodorants, en plus de réduire la biodiversité et l'oxygène et d'entraîner des coûts importants pour certaines municipalités.

Les cyanobactéries nuisibles ont fait l'objet de maintes recherches scientifiques pour expliquer les causes du phénomène. Malgré l'abondance d'information disponible, la complexité et la variabilité des écosystèmes rendent certaines conclusions incertaines, voire même contradictoires. Cependant, la communauté scientifique s'entend sur certains facteurs présumés responsables du phénomène. Ce document n'a pas réponse à toutes les questions, mais il présente une synthèse des connaissances sur la problématique des fleurs d'eau de cyanobactéries dans le but d'en améliorer la gestion et la prévention par l'éducation. Cette synthèse vulgarisée de la littérature scientifique s'adresse aux municipalités, comités de bassins versants, associations de lacs, zones d'intervention prioritaire ou tout autre regroupement ou individus soucieux des impacts et de la santé écologique des milieux aquatiques.

I - LES CYANOBACTÉRIES... EN UN CLIN D'OEIL

Que sont les cyanobactéries?

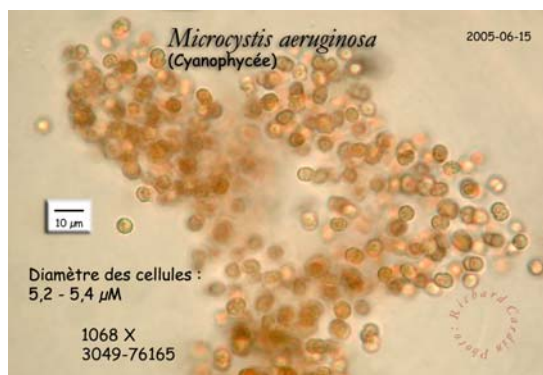
Les cyanobactéries sont des procaryotes photosynthétiques, aussi connues sous le nom d'algues bleu-vert ou algues bleues

Les cyanobactéries sont des procaryotes (cellules dépourvues de noyau et d'organites intracellulaires) photosynthétiques, également appelés cyanophytes ou cyanophycées. Bien qu'elles soient aussi connues sous le nom d'algues bleu-vert ou algues bleues, les cyanobactéries sont des bactéries photosynthétiques et non des algues proprement dites. Elles partagent toutefois les mêmes habitats que les algues, compétitionnent pour les mêmes ressources et contribuent à la production primaire des écosystèmes aquatiques.

Elles se regroupent en quelque 2 000 espèces réparties en 150 genres. Les cyanobactéries font partie d'un groupe ancien de micro-organismes et une grande partie de leur diversité morphologique s'est développée il y a plus de 2 milliards d'années. En milieu aquatique, les cyanobactéries sont dites planctoniques ou pélagiques si elles prolifèrent en suspension dans la colonne d'eau, ou benthiques si elles sont attachées à un substrat.

La majorité des cyanobactéries sont photoautotrophes, c'est-à-dire qu'elles tirent leur énergie à partir de la lumière, contrairement aux hétérotrophes (par ex. bactéries, protozoaires, zooplancton, mammifères) qui ne peuvent pas produire leur propre matière organique à partir de l'énergie solaire. Les cyanobactéries prolifèrent généralement en présence d'oxygène, bien qu'elles soient capables de vivre temporairement en son absence. Elles ne nécessitent que de l'eau, du dioxyde de carbone, des nutriments et de la lumière pour faire la photosynthèse. Toutefois, certaines espèces peuvent survivre à des conditions de noirceur totale durant de longues périodes; on dit qu'elles entrent en dormance.

Grâce à leur grande capacité d'adaptation, les cyanobactéries colonisent la plupart des écosystèmes tant aquatiques que terrestres. Certaines espèces sont adaptées à des conditions extrêmes, proliférant même dans la glace, les sources thermales, les eaux ferrugineuses et à des pH extrêmes.



Source : Christian Bastien, MDDEP

Qu'est-ce qu'une fleur d'eau de cyanobactéries?

Les fleurs d'eau sont le résultat d'une prolifération massive de cyanobactéries qui peuvent alors flotter à la surface d'un plan d'eau.

Une multitude de termes se rattachant au phénomène des cyanobactéries sont utilisés dans la littérature, ce qui peut parfois porter à confusion. Les termes «fleur d'eau», «floraison», «efflorescence», et en anglais «bloom» ou «HAB (harmful algal bloom)» désignent le résultat d'une prolifération massive de cyanobactéries pouvant persister plus ou moins longtemps. Une perte de diversité spécifique dans le phytoplancton est conséquemment observée alors qu'une ou deux espèces deviennent largement dominantes. Lorsque les cyanobactéries prolifèrent à la surface, des agrégats flottants appelés «écumes» ou «mousses» et en anglais «scums» sont souvent observés.



Source: Martin Mimeault, MDDEP

Il est important de mentionner qu'une fleur d'eau de cyanobactéries n'est pas nécessairement toxique. Selon Santé Canada, 30 à 50 % des fleurs d'eau ne sont pas toxiques. Ce ne sont pas toutes les espèces de cyanobactéries qui produisent des toxines présentant un danger pour la santé, mais presque toutes les cyanobactéries produisent au minimum des substances pouvant causer des allergies ou des irritations si elles se trouvent en grande quantité. De plus, il semble que les espèces de cyanobactéries à potentiel toxique ne produisent pas toujours leurs toxines, et les facteurs contrôlant cette production sont encore mal connus. Il est à noter que des concentrations élevées en toxines ont parfois été mesurées en l'absence de fleurs d'eau visibles à la surface. En fait, les cyanobactéries peuvent laisser derrière elles leurs toxines lorsqu'elles se déplacent ailleurs ou lorsqu'elles meurent. Les cyanobactéries sont très dynamiques. Par ailleurs, *Planktothrix agardhii*, qui est une espèce qui ne prolifère généralement pas en surface (elle colonise le plus souvent les couches inférieures de la colonne d'eau), peut produire des concentrations élevées en toxines. Aucun signe en surface n'annoncera sa présence. Cette espèce est fréquente en Europe, mais elle a été très peu rapportée au Québec.

Milieu pélagique et milieu benthique

Le **phytoplancton** est constitué de l'ensemble des organismes photosynthétiques (ou algues microscopiques) qui vivent en suspension dans l'eau.

Le **phytobenthos** est constitué de l'ensemble des organismes photosynthétiques vivant en association avec le fond. Il comprend les algues microscopiques (périphyton) mais aussi les plantes aquatiques (par ex. la myriophylle) et les macroalgues.

Ainsi, les cyanobactéries pélagiques font partie du phytoplancton alors que les cyanobactéries benthiques font partie du phytobenthos.

L'eutrophisation et les fleurs d'eau

L'eutrophisation et le phénomène des fleurs d'eau sont souvent observés simultanément, mais ne sont pas nécessairement interdépendants.

Bien que les fleurs d'eau de cyanobactéries soit surtout observées en milieux eutrophes (localement ou dans l'ensemble du plan d'eau), des conditions fortement dégradées ne résultent pas automatiquement à la prolifération de cyanobactéries. Il est donc important de faire la distinction entre les termes «fleur d'eau» et «eutrophisation». En termes généraux, l'eutrophisation résulte de l'enrichissement de l'eau par des nutriments, particulièrement le phosphore (P) et l'azote (N), provoquant une prolifération excessive des végétaux aquatiques ou des cyanobactéries, et subséquemment une diminution de l'oxygène. Puisque le phosphore est considéré comme l'élément limitant à la croissance des organismes photosynthétiques en eaux douces, il est généralement pointé du doigt comme le principal responsable de l'eutrophisation.

Eutrophisation *versus* fleurs d'eau

L'**eutrophisation** est le processus de vieillissement naturel d'un lac qui se voit grandement accéléré par les activités humaines dû à l'enrichissement excessif en nutriments. Ce phénomène peut se traduire par une surabondance de plantes aquatiques, d'algues ou de cyanobactéries.

Les statuts trophiques d'un milieu aquatique se définissent ainsi :

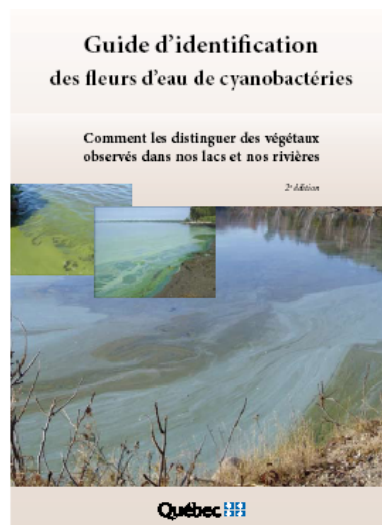
- oligotrophe : < 10 µg P par litre
- mésotrophe : 10-30 µg P par litre
- eutrophe : 30-100 µg P par litre
- hypereutrophe : > 100 µg P par litre

Les **fleurs d'eau** sont une production massive de biomasse (cyanobactéries ou autres). Les fleurs d'eau de cyanobactéries peuvent s'accumuler à la surface de l'eau en conditions relativement calmes par leur migration verticale, puis sur les rives lorsqu'elles sont poussées par le vent.

Comment les fleurs d'eau de cyanobactéries se distinguent-elles des autres végétaux?

Un guide d'identification conçu par le MDDEP aide à identifier et différencier les principaux phénomènes observés.

Une fleur d'eau de cyanobactéries peut facilement être confondue avec d'autres phénomènes communs dans les lacs et les rivières. En effet, des dépôts de pollen ou de spores flottant à la surface d'un plan d'eau peuvent ressembler étrangement à une fleur d'eau. Aussi, certaines plantes aquatiques flottantes minuscules (thalle) donnent une couleur verdâtre à la surface de l'eau et peuvent être identifiées à tort. Un guide d'identification visuelle des fleurs d'eau de cyanobactéries a été conçu par le MDDEP afin de sensibiliser et d'informer les citoyens. Des fiches d'identification illustrant les principaux types de fleurs d'eau et les phénomènes avec lesquels elles sont parfois confondues y sont présentées.



www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/cyanobacteries/guide-identif.pdf

Pourquoi les cyanobactéries sont-elles si performantes?

Grâce à un ensemble de stratégies qui favorise leur adaptation à une multitude de conditions, les cyanobactéries performant et prolifèrent même sous des conditions extrêmes.

Les cyanobactéries utilisent un ensemble de stratégies qui leur a permis de coloniser les écosystèmes d'eau douce. Ces stratégies leur permettent de supplanter les algues lors de conditions favorables et de persister dans l'environnement. Les cyanobactéries s'adaptent à une multitude de conditions environnementales et performent particulièrement bien sous conditions extrêmes. Il n'est donc pas surprenant qu'elles aient été parmi les premiers micro-organismes à coloniser la terre et qu'elles soient encore aujourd'hui très compétitives et parfois dominantes.

D'abord, elles présentent une pigmentation diversifiée qui assure une grande efficacité photosynthétique et une capacité à soutenir un taux de croissance relativement élevé même à de faibles intensités lumineuses. Ce sont les phycobiliprotéines (surtout la phycocyanine en eaux douces), qui confèrent cet avantage aux cyanobactéries (comparativement aux algues phytoplanctoniques qui utilisent la chlorophylle a), en leur permettant

d'exploiter le rayonnement solaire disponible sur une plus grande étendue de longueurs d'ondes. Les cyanobactéries ont également développé différentes stratégies de protection contre les rayons ultraviolets (UV) et le rayonnement excessif.

Une des caractéristiques particulières observée chez certaines espèces de cyanobactéries est la capacité de fixer l'azote atmosphérique. La fixation d'azote gazeux est un atout de taille pour la croissance cellulaire lorsque le milieu est pauvre en azote. Contrairement aux autres algues, les cyanobactéries peuvent entreposer des quantités importantes d'azote lorsque celui-ci se trouve en excès. Les cyanobactéries peuvent également faire des réserves de phosphore, phénomène qui est toutefois observé chez plusieurs autres types d'algues. Les cyanobactéries, grâce à leurs réserves intracellulaires, ont la capacité de survivre à de faibles concentrations en nutriments pendant quelques jours.

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

Les cyanobactéries peuvent produire des substances allélopathiques (substances qui transmettent des signaux chimiques entre espèces différentes) permettant de se défendre contre leurs prédateurs, et ne constituent donc pas la source de nourriture préférée du zooplancton (plancton du règne animal). De plus, les cyanobactéries se regroupent et forment des colonies (agrégat de cellules) trop volumineuses pour être ingérées par le zooplancton, évitant ainsi la prédation. Ainsi, même si durant certaines périodes leur taux de croissance est similaire ou inférieur aux algues, la perte par la prédation étant faible ou nulle, les cyanobactéries montrent de fortes augmentations en biomasse lorsque les conditions leur sont favorables.

Plusieurs espèces de cyanobactéries peuvent supporter de très faibles concentrations en oxygène, conditions fréquemment rencontrées en milieux eutrophes lorsque l'hypolimnion (couche inférieure d'un lac stratifié) est anoxique (absence d'oxygène). Les cyanobactéries, qui migrent vers le fond pour profiter de la plus grande richesse en nutriments près des sédiments, seront confrontées à de telles conditions. Les cyanobactéries sont aussi trouvées dans des environnements riches en sulfure d'hydrogène, conditions toxiques pour certaines autres algues et cyanobactéries non adaptées.

Parmi toutes ces adaptations, la capacité des cyanobactéries à réguler leur flottaison est la stratégie majoritairement responsable de leur succès et de la formation des fleurs d'eau. En effet, lors de conditions relativement

calmes, plusieurs espèces de cyanobactéries peuvent migrer verticalement dans la colonne d'eau grâce à leurs vacuoles gazeuses. Cette caractéristique permet aux cellules d'ajuster leur profondeur et de tirer le meilleur parti des conditions environnementales. Les cyanobactéries régulent leur flottaison en fonction des conditions environnementales, soit en modifiant le nombre et la taille des vacuoles, soit en modifiant l'accumulation d'hydrates de carbone et de protéines lors de la photosynthèse. L'accumulation de réserves de granules de phosphates influence aussi la flottaison des cellules en modifiant leur densité.

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. Cette migration horizontale explique parfois la quantité phénoménale de cellules et l'accumulation d'écume à certains endroits sur le bord des plans d'eau.

Comment s'explique la persistance d'une fleur d'eau?

Le phénomène de persistance des fleurs d'eau semble être causé par un problème interne au niveau de la régulation de la flottaison ou par la présence ou l'absence de certains facteurs environnementaux qui empêcheraient la migration des cellules vers le fond.

Les cyanobactéries ajustent leur flottaison pour chercher l'intensité lumineuse optimale en surface durant le jour et une richesse en éléments nutritifs en profondeur pendant la nuit. Il est donc fréquent que l'écume causée par une fleur d'eau disparaisse en fin de journée pour réapparaître le matin. Les fleurs d'eau disparaissent en fin de journée pour deux raisons principales. D'abord, les cyanobactéries ont accumulé suffisamment d'hydrates de carbone par l'activité photosynthétique ce qui augmente leur densité. Ensuite, le vent, qui souvent se lève en fin de journée, disperse les cellules à travers la colonne d'eau.

Mais comment expliquer la persistance d'écume pendant plusieurs jours? Le phénomène pourrait être causé par une défaillance de la régulation de flottaison due à des dommages physiologiques ou à la sénescence (vieillesse) des cellules. Il est aussi possible qu'une autre colonie de cyanobactéries forme une barrière physique, empêchant les cellules qui ont perdu leur flottaison de couler vers le fond. Il est également suggéré qu'une exposition excessive à de fortes intensités lumineuses en surface induise des dommages physiologiques diminuant la croissance et la photosynthèse, réduisant ainsi leur capacité de réguler la flottaison. La persistance de l'écume a aussi été attribuée à une limitation en carbone inorganique (CO₂), empêchant l'accumulation d'hydrates de carbone qui provoquent l'affaissement des vacuoles gazeuses et un effet de lest.

Les précipitations peuvent aussi avoir un effet sur l'abondance de cyanobactéries en surface, en entraînant les cellules vers des couches d'eau plus profondes. En effet, on a observé des diminutions importantes dans la densité de cellules en surface suite à certains épisodes de précipitations, concordant avec une augmentation de l'abondance des cellules en profondeur. L'absence de précipitations pourrait ainsi être un facteur favorisant la persistance des cyanobactéries en surface.

II - LES CYANOTOXINES

Que sont les cyanotoxines?

La majorité des cyanotoxines se trouvent à l'intérieur des cellules (intracellulaires). Elles sont libérées à l'extérieur des cellules (toxines libres) lors du vieillissement (sénescence) ou de la lyse cellulaire (destruction d'une cellule avec libération de son contenu) pouvant être causée par un stress (par ex. les algicides).

Les cyanotoxines peuvent avoir des effets nocifs sur la santé suite à leur ingestion ou à leur contact cutané. Leur présence constitue un problème d'envergure mondiale. Il y a au moins 46 espèces de cyanobactéries qui ont le potentiel de produire des toxines. Les cyanotoxines les plus communes appartiennent au groupe des microcystines (MC). Près de 80 variantes de microcystines ont été identifiées et sont principalement produites par les genres *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Microcystis*, *Oscillatoria* et *Nostoc*. Le caractère toxique ou non toxique peut varier à l'intérieur d'une même espèce de cyanobactéries, dépendamment du fait que les cellules possèdent ou non les gènes de production de toxines. Les facteurs qui contrôlent l'expression de ces gènes sont encore mal connus.

Les deux sources majeures d'exposition humaine aux cyanobactéries et à leurs toxines sont la consommation d'eau et l'utilisation de l'eau à des fins récréatives. Les mécanismes d'action sont discutés dans un avis publié en 2005 par le Groupe scientifique sur l'eau de l'Institut national de santé publique (www.inspq.qc.ca). Cet avis présente également des données toxicologiques et épidémiologiques, les méthodes analytiques, les limites de détection et les seuils de quantification liés aux cyanotoxines, ainsi que des propositions de valeurs seuils pour des usages récréatifs et l'ingestion d'eau potable. Santé Canada a également publié une recommandation pour la microcystine-LR dans l'eau potable. Aucune norme n'est cependant fixée par voie réglementaire au Québec. Le bétail et les animaux de compagnie qui s'abreuvent à des plans d'eau touchés par les fleurs d'eau de cyanobactéries toxiques sont aussi exposés aux effets nocifs des toxines.

Classement des cyanotoxines

Hépatotoxines (foie) : microcystines, nodularines, cylindrospermopsines.

Neurotoxines (système nerveux) : anatoxines, saxitoxines.

Dermatotoxines (peau) : lipopolysaccharides, lyngbyatoxines, aplysiatoxines

Bien que les méthodes d'identification, de décompte cellulaire et de dosage des cyanobactéries et de leurs toxines soient précises en soi, il est très difficile d'estimer la toxicité d'une fleur d'eau. La complexité de cette tâche découle principalement du fait que plusieurs types et variétés de toxines sont produites par les cyanobactéries. De plus, dépendamment d'une multitude de facteurs, la concentration en toxines produites par les cellules peut varier. Le fait qu'une même espèce de cyanobactérie puisse être

toxique ou non selon la souche (variante génétique) ajoute aussi une part de complexité.

Pourquoi les cyanobactéries produisent-elles des toxines?

La production de cyanotoxines est-elle une simple conséquence des processus environnementaux ou découle-t-elle d'une adaptation particulière? Il est suggéré dans la littérature scientifique que la production de ces composés pourrait contribuer à augmenter l'avantage compétitif des cyanobactéries dans l'atteinte de la dominance d'un milieu aquatique. Les résultats d'autres recherches indiquent que les toxines auraient des fonctions régulatrices à l'intérieur du métabolisme cellulaire et seraient importantes pour la croissance des cellules. Bien que la fonction des cyanotoxines reste à élucider, il semble que leur production soit directement corrélée au taux de croissance des cellules.

III - LES FACTEURS DE CONTRÔLE

Où et quand les fleurs d'eau surviennent-elles?

Les fleurs d'eau de cyanobactéries se développent généralement dans les lacs riches en nutriments durant les mois d'été lorsque la température de l'eau est élevée.

Les cyanobactéries qui forment des fleurs d'eau prolifèrent majoritairement dans des milieux aquatiques d'eau stagnante tels que les lacs et les mares. Elles peuvent aussi être observées dans un tronçon de rivière, là où le courant est faible et surtout en aval de lacs où il y a eu prolifération de cyanobactéries, même si ce lac se trouve à plusieurs kilomètres en amont. Les fleurs d'eau ne se développent généralement pas en rivières mais elles peuvent y persister si le courant est faible. Par exemple, 26 % des milieux aquatiques où des fleurs d'eau de cyanobactéries ont été signalées au Québec en 2004 étaient des rivières, et 14 % en 2005. Par contre, les rivières sont un des habitats des cyanobactéries benthiques qui croissent sur les sédiments ou sur d'autres substrats tels que la roche, les plantes aquatiques et les macroalgues (périphyton). Certaines espèces de cyanobactéries benthiques sont toxiques (par ex. *Lyngbya wollei*, une espèce récemment découverte dans le Saint-Laurent).

Plus un plan d'eau est riche en nutriments, plus il est susceptible d'être touché par des fleurs d'eau de cyanobactéries. En fonction de la géologie, un lac peut être suffisamment eutrophe de façon naturelle pour supporter des fleurs d'eau. Toutefois, le degré d'eutrophisation est exacerbé par l'apport excessif en nutriments causé par le développement intensif des zones agricoles, urbaines, industrielles ou de villégiature dans le bassin versant. La présence de résidences isolées est un facteur déterminant dans le transport des nutriments vers le milieu aquatique parce qu'elles ne sont pas raccordées au système de traitement des eaux usées. Par ailleurs, la dégradation des berges, la déforestation et l'érosion agricole favorise le transfert des nutriments du milieu terrestre vers le milieu aquatique. De façon générale, les lacs qui ont un bassin versant de grande taille par rapport à leur superficie ont tendance à avoir des fleurs d'eau de cyanobactéries de plus forte magnitude et de plus longue durée comparativement aux lacs de taille similaire ayant un plus petit bassin versant (plus de nutriments provenant du bassin versant pour un même milieu récepteur), quoi que d'autres facteurs hydrologiques entrent en ligne de compte.

Les fleurs d'eau de cyanobactéries se développent généralement dans des milieux aquatiques riches en nutriments durant les mois d'été lorsque la température de l'eau est élevée. Toutefois, les variations dans la température de l'air et de l'eau, l'ensoleillement, la vitesse du vent et les précipitations influencent aussi le développement et la persistance des fleurs d'eau. Puisque ces facteurs s'avèrent très variables selon les années, il est difficile de prédire l'évolution et l'envergure des fleurs d'eau. Il est même possible d'en observer aussi tôt qu'en mai et aussi tard qu'en novembre. Elles peuvent ne pas être observées dans un lac pendant une année, ou ne pas survenir à la même période ou avec la même intensité

d'une année à l'autre. De plus, les espèces responsables des fleurs d'eau diffèrent souvent d'année en année ou même à l'intérieur de quelques mois. Par exemple, selon les années et la période de suivi, l'espèce dominante de cyanobactérie responsable des fleurs d'eau dans la baie Missisquoi étaient *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena flos-aquae*, *Microcystis flos-aquae*, *Gloeotrichia echinulata*, *Microcystis viridis* ou *Microcystis aeruginosa*. Ces espèces ne représentent pas toutes le même danger pour la santé.

Quelles sont les conditions favorables à la prolifération des cyanobactéries?

La prolifération des cyanobactéries nécessite de fortes concentrations en nutriments, mais est favorisée par plusieurs autres facteurs dont la stratification thermique et le climat.

La succession saisonnière des espèces phytoplanctoniques est un processus naturel. Néanmoins, plusieurs facteurs environnementaux affectés par les activités humaines influencent le patron naturel de succession du phytoplancton, en favorisant particulièrement la prolifération des cyanobactéries. Il est généralement admis que l'apparition des fleurs d'eau de cyanobactéries soit en lien direct avec le statut trophique des plans d'eau et que des conditions relativement calmes jouent un rôle clé lorsque la température de l'eau est élevée. D'autres phénomènes peuvent également favoriser le développement des cyanobactéries. De nombreuses études ont examiné la question du succès et de la dominance des cyanobactéries.

Nutriments (phosphore et azote)

Contrairement à l'azote et au carbone, le phosphore est très peu abondant dans les milieux aquatiques en conditions naturelles. D'abord, il est inexistant à l'état gazeux. Puis, la géologie des sols ne contient qu'environ 0,1 % de phosphore. Finalement, il est fortement adsorbé par les constituants majeurs des sols (fer, aluminium, calcium, etc.) ce qui le rend moins disponible, et il est prélevé par les plantes terrestres. L'intensification des activités anthropiques a généré une augmentation phénoménale des concentrations en phosphore dans les écosystèmes aquatiques, causant une accélération de l'eutrophisation. Évidemment, les fortes concentrations en phosphore ne peuvent à elles seules expliquer l'apparition récurrente de fleurs d'eau de cyanobactéries. Toutefois, cet élément étant essentiel à la croissance de tout organisme vivant, son augmentation dans l'eau entraîne généralement une augmentation de la production primaire (production de matière organique par les organismes photosynthétiques).

Bien que le phosphore soit le principal élément responsable de l'augmentation de la biomasse dans les plans d'eau, l'azote est un autre élément à considérer. En effet, dans certaines circonstances, l'azote peut devenir un élément limitant la production primaire. Aussi, il est suggéré que le phosphore ait un rôle clé dans le contrôle de la biomasse, alors que l'azote serait plutôt responsable de la structure des communautés. Tel que mentionné auparavant, plusieurs espèces de cyanobactéries peuvent fixer l'azote atmosphérique. Par exemple, l'apparition de cyanobactéries

non fixatrices d'azote (telles que *Microcystis aeruginosa*) aurait un lien avec l'épuisement des ressources en nitrates. Des études suggèrent que *M. aeruginosa* préfère l'azote ammoniacal aux nitrates en tant que source d'azote. Dans un environnement à forte concentration en nitrates, *M. aeruginosa* se verrait supplantée par d'autres espèces de phytoplancton.

Au Canada, l'utilisation des fertilisants azotés a grandement augmenté depuis les années 70. Le Canada est actuellement le plus grand utilisateur d'urée au monde, avec plus de 50 % des fertilisants azotés appliqués sous cette forme. Selon le Dr. Leavitt de l'Université de Regina en Saskatchewan, la production de cyanotoxines augmente avec le taux de croissance stimulé par l'apport en azote, particulièrement dans les milieux déjà saturés en phosphore. Les cyanobactéries préférant l'urée aux autres sources d'azote, l'épandage d'urée risque de favoriser la prolifération de cyanobactéries et leur toxicité dans les prochaines années.

Stratification thermique

La période de prolifération des fleurs d'eau de cyanobactéries est caractérisée par la séparation verticale, due à la stratification thermique, des deux ressources principales essentielles à la croissance du phytoplancton, soit la lumière et les nutriments. En effet, la prolifération algale à la surface de l'eau, là où la lumière est abondante, conduit à l'affaiblissement des nutriments au cours de l'été. Au contraire, les couches d'eau plus profondes (métalimnion et hypolimnion) sont généralement riches en nutriments, vu la faible croissance algale en absence de conditions lumineuses optimales en profondeur et suite au relargage des nutriments contenus dans les sédiments. En absence de mélange, le phytoplancton est carencé en nutriments à la surface, et sa sédimentation vers le fond (le phytoplancton est plus dense que l'eau) provoque une carence de lumière en profondeur. C'est à ce moment que les cyanobactéries possédant des vacuoles gazeuses sont avantagées par leur capacité de migration.

Cette stratification estivale de la colonne d'eau, qui demeure jusqu'au mélange automnal, caractérise les lacs suffisamment profonds des régions tempérées (voir l'encadré). Certains lacs moins profonds sont aussi touchés par les fleurs d'eau de cyanobactéries, la stabilité thermique de la colonne d'eau y jouant encore un rôle fondamental, mais cette fois c'est la stratification temporaire mais fréquente (souvent diurne) qui sera nécessaire pour l'établissement d'une dominance par les cyanobactéries. De même, à l'automne, c'est l'alternance de périodes ensoleillées (stabilité) et de périodes de mélange (apport de nutriments) qui permettra la persistance des fleurs d'eau.

L'apparition d'une fleur d'eau de cyanobactéries nécessite d'abord la présence d'une population préexistante (nutriments assez abondants sur une période de temps assez longue pour permettre la croissance des cyanobactéries dans la colonne d'eau, car les cyanobactéries ne croissent pas très rapidement). Ensuite, une augmentation du mélange

de la colonne d'eau (nuits fraîches, vents plus forts, précipitations) déclenche une réponse physiologique (diminution de la lumière moyenne reçue, pulse de nutriments) résultant en une augmentation de la flottabilité des cellules. C'est l'établissement d'une période prolongée de stabilité (canicule, fort ensoleillement, hausse des températures la nuit) qui permet finalement la sur-flottaison des cellules et la formation d'une fleur d'eau.

Stratification thermique

Stratification estivale

La stratification thermique estivale est une superposition de masses d'eau de températures différentes. La masse d'eau superficielle (**épilimnion**) se réchauffant plus rapidement, elle devient moins dense que l'eau en profondeur (**hypolimnion**) qui reçoit moins d'énergie solaire et demeure plus froide. Il se crée ainsi deux couches d'eau superposées qui ne se mélangent pas, séparées par une barrière thermique (**métalimnion**) à l'intérieur de laquelle se situe la thermocline saisonnière (profondeur où le changement de température est maximal). Dans certains lacs, l'hypolimnion perd graduellement son oxygène durant l'été (anoxie), alors qu'il est consommé par la dégradation microbienne de la matière organique qui sédimente. Cette stabilité persistant tout l'été ne se produit que dans les lacs assez profonds pour que le mélange par le vent ne réussisse pas à la briser.

Stratification de surface

Également appelée stratification secondaire ou diurne, elle s'établit à la surface d'une masse d'eau lors de périodes chaudes et en absence de vent et peut se maintenir quelques jours en période de canicule. Le vent, qui s'établit souvent en fin de journée en plus de l'évaporation, brise ce gradient thermique.

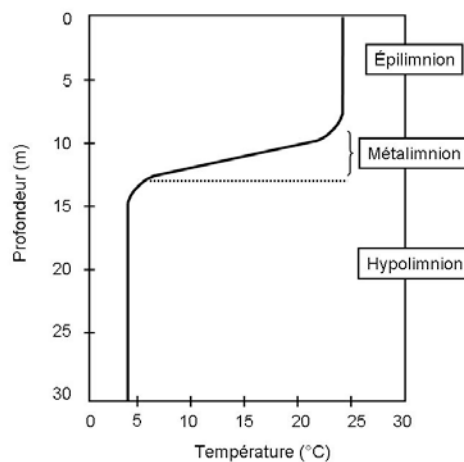


Figure 1. Stratification thermique estivale typique d'un lac. La température à la surface de l'épilimnion augmente fréquemment le jour et forme alors une stratification à court terme (brisée la nuit).

Lumière

Une faible disponibilité en lumière dans la colonne d'eau favorise la croissance des cyanobactéries au détriment des autres groupes d'algues. En effet, bien que de fortes intensités lumineuses soient propices au développement des cyanobactéries, elles sont aussi bien adaptées à un manque de lumière résultant d'une prolifération excessive («auto-ombrage»). Les cyanobactéries tolèrent les faibles intensités lumineuses grâce à leurs pigments spécialisés et à leur potentiel de flottabilité. En ce sens, les cyanobactéries ont un réel avantage compétitif sur les autres algues et dominent souvent lorsque la lumière est limitante.

Herbicides

Une importante proportion des herbicides appliqués aux champs sont transportés vers le milieu aquatique, notamment lors des événements de pluie. Des études ont démontré que les herbicides ont un effet sur l'abondance de certains végétaux aquatiques. Par contre, il semble que les cyanobactéries soient moins sensibles aux herbicides que les algues vertes et les diatomées par exemple. Il est donc possible que les lacs et les rivières, dont le bassin versant est grandement affecté par les activités agricoles, affichent des concentrations épisodiques élevées en herbicides, ce qui pourrait changer la structure du phytoplancton vers une dominance de cyanobactéries.

Les cyanobactéries influencent l'environnement aquatique à leur faveur, ce qui contribue à leur persistance et leur dominance dans le milieu une fois établies.

Contrôle de l'environnement par les cyanobactéries

Les cyanobactéries ont une «rétro-influence» chimique, physique et biologique sur l'environnement, favorisant ainsi leur propre persistance et dominance dans le milieu. D'abord, une prolifération de cyanobactéries augmente l'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau. Tel qu'expliqué plus haut, cette atténuation de la lumière n'affecte généralement pas les cyanobactéries vu leur faible besoin en énergie et leurs pigments photosynthétiques spécialisés. Il a également été noté qu'une augmentation de l'absorption des radiations solaires causée par l'accumulation de cyanobactéries entraîne une augmentation de la température à la surface durant le jour. Cette augmentation de température s'avère bénéfique aux cyanobactéries qui ont un optimum de croissance à des températures plus élevées que les autres organismes photosynthétiques. Une température de l'eau plus élevée en surface induit également une plus grande stabilité qui favorise les cyanobactéries. La prolifération de cyanobactéries peut également causer une augmentation du pH de l'eau (activité photosynthétique élevée), conditions leur procurant un net avantage par rapport aux autres algues, dû à une réduction de la disponibilité en CO₂ que les cyanobactéries savent contourner (utilisation du bicarbonate). Une fleur d'eau de cyanobactéries peut également entraîner une augmentation de l'azote ammoniacal et une diminution de la concentration en oxygène dissous dans l'eau, conditions auxquelles les cyanobactéries sont, une fois de plus, bien adaptées.

Les changements climatiques vont-ils affecter les fleurs d'eau de cyanobactéries?

L'ensemble des conditions liées au réchauffement climatique pourraient mener à une augmentation de l'incidence de floraisons de cyanobactéries.

Il est probable que les fleurs d'eau de cyanobactéries deviennent plus fréquentes et persistantes sous un climat plus chaud et affectent un plus grand nombre de milieux aquatiques. Les espèces nuisibles, telles que *Microcystis aeruginosa* et *Anabaena flos-aquae*, ont une croissance optimale à une température particulièrement élevée, et par conséquent des conditions plus chaudes résulteront en une croissance plus rapide et une plus grande dominance de ces espèces dans l'environnement aquatique. Par ailleurs, un climat plus chaud favorisera la stratification à court terme, cet étagement par couches de différentes températures et donc de différentes densités résistant mieux au mélange par le vent. Ces conditions sont idéales pour les cyanobactéries formant des fleurs d'eau qui, grâce à leurs vacuoles de gaz, peuvent contrôler leur position dans une colonne d'eau stable pour une acquisition optimale de la lumière et des nutriments.

Plusieurs mécanismes indirects peuvent aussi favoriser la croissance et la dominance des cyanobactéries. Par exemple, le devancement de la fonte des glaces au printemps va accélérer le réchauffement en surface des lacs, l'augmentation de la stratification favorisera alors la perte d'oxygène et le relargage du phosphore des sédiments vers l'eau. Les changements climatiques impliquent également des changements dans les processus biogéochimiques du bassin versant, qui peuvent affecter l'apport en matière organique dissoute vers les milieux aquatiques. La matière organique dissoute est un facteur clé pour plusieurs processus limnologiques incluant la transparence et la stabilité de l'eau.

Finalement, des changements dans le régime des précipitations font partie des changements climatiques, mais avec une grande variabilité régionale encore difficile à prévoir. Dans les régions où les précipitations vont diminuer, la réduction du taux de renouvellement hydraulique des lacs pourrait mener à des conditions plus eutrophes. Le temps de résidence de l'eau dans les lacs étant plus élevé, la concentration en polluants augmente même si les apports demeurent similaires. Ces changements seront accompagnés d'une transition vers des espèces caractérisant typiquement des milieux eutrophes et contaminés. Une augmentation de l'érosion est également prévue par les modèles climatiques (événements extrêmes plus fréquents), ce qui pourrait favoriser le transfert de nutriments vers le milieu aquatique. Lors d'avènements de pluies intenses, les sols deviennent saturés en eau, entraînant une érosion et un ruissellement supérieurs à la normale. Une grande quantité de phosphore et d'azote peut alors être transportée vers les plans d'eau. Cet apport en nutriments pourrait agir de «catalyseur» en accélérant la croissance des populations de cyanobactéries déjà présentes, si la stratification de surface s'établit sur une base diurne (journées encore chaudes et ensoleillées de l'automne).

Ainsi, comme l'anticipent plusieurs chercheurs, l'ensemble des conditions liées au réchauffement climatique (c.-à-d. stratification plus importante, température de l'eau plus chaude, anoxie et libération subséquente

de phosphore et d'azote) pourrait mener à une augmentation de l'incidence de fleurs d'eau de cyanobactéries. Néanmoins, toutes ces conditions ne peuvent mener à des fleurs d'eau si au départ le plan d'eau ne possède pas suffisamment de nutriments. Nous pouvons ralentir le réchauffement du climat, mais ces actions sont complexes et leurs effets se manifesteront sur une échelle de temps relativement longue. Par contre, nous pouvons, dès maintenant, freiner l'eutrophisation, un effort d'autant plus pertinent sous un climat se réchauffant et qui a des conséquences positives à plusieurs autres niveaux (voir la section *Comment freiner la problématique grandissante des fleurs d'eau de cyanobactéries au Québec*).

Quels sont les facteurs favorisant la production de cyanotoxines?

Plusieurs études scientifiques indiquent que la production de toxines dépend principalement de la disponibilité en azote, du taux de croissance cellulaire et de l'intensité lumineuse.

Le rôle des cyanotoxines chez les cyanobactéries n'est pas clairement élucidé. Il existe néanmoins une quantité impressionnante d'études tentant de relier certains facteurs environnementaux et la production de toxines.

Rôle de l'azote

Les résultats de nombreuses études suggèrent que la disponibilité en azote peut être un facteur important affectant la production de toxines. L'azote est un élément constitutif des toxines. Par exemple, il a été démontré que les concentrations intracellulaires de microcystine sont positivement corrélées au taux de prélèvement d'azote et au contenu cellulaire en azote. Également, une baisse remarquable de la toxicité a été observée lorsque la concentration en azote était réduite, alors que des changements mineurs ont résulté d'une baisse de la concentration en phosphore.

Croissance cellulaire

D'autres études suggèrent que le taux de production de microcystine est déterminé par le taux de croissance des cellules, qui est à son tour déterminé par la concentration en phosphore dans l'eau. Plusieurs études scientifiques démontrent que le contenu et la composition des microcystines intracellulaires varient de façon marquée selon les changements dans les phases de croissance cellulaire, le contenu de microcystine étant plus élevé durant la phase exponentielle de croissance des espèces de *Microcystis* et diminuant ensuite à la fin de cette phase. En général, la plupart des études suggèrent que les cyanobactéries produisent des toxines lorsque les conditions sont favorables à leur croissance.

Effets de la lumière

Certaines études indiquent qu'une augmentation de l'intensité lumineuse induit une augmentation dans la concentration des microcystines produites. En revanche, dans une étude portant sur les effets de la lumière sur *Microcystis aeruginosa*, il a été observé que la souche toxique produisait moins de toxines à de fortes intensités lumineuses.

IV – FOIRE AUX QUESTIONS

Pourquoi les fleurs d'eau de cyanobactéries sont-elles nuisibles?

En plus du désagrément esthétique, la présence accrue des cyanobactéries représente une menace pour la santé des humains. Les cyanotoxines peuvent provoquer des malaises sérieux, voire même la mort.

Les fleurs d'eau de cyanobactéries et les écumes qui y sont souvent associées sont esthétiquement désagréables, en plus des odeurs qui les accompagnent. Des problèmes plus importants peuvent survenir lors de la décomposition de cette biomasse (c.-à-d. celle des cyanobactéries qui se dépose au fond lors du déclin de la fleur d'eau), causant parfois d'un coup la mort de tous les poissons (*fish kill*). Ce phénomène est associé à l'anoxie engendrée par la dégradation de cette matière organique par les bactéries qui consomment l'oxygène et produisent de fortes concentrations en azote ammoniacal, toxique pour les poissons. De plus, plusieurs cas de mortalité de poissons ont directement été 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.

Les fleurs d'eau de cyanobactéries peuvent constituer une menace sérieuse pour la santé des animaux et des humains lorsque des toxines sont produites. En plus d'avoir causé la mort d'animaux sauvages et domestiques répertoriés à travers le monde, les cyanobactéries sont responsables de divers malaises et de trois épisodes connus de décès chez les humains. Les effets des cyanotoxines sur la santé humaine sont nombreux, par exemple gastroentérites, nausées, vomissements, fièvres, symptômes comparables à la grippe, maux de gorge, irritation des yeux et des oreilles, éruptions cutanées, myalgie (douleurs musculaires), hépatomégalie (augmentation du volume du foie), consolidation pulmonaire, troubles visuels, dommages aux reins et au foie. Certains composés produits par les cyanobactéries peuvent également être des irritants cutanés et provoquer des réactions allergiques.

Des milliers de cas de gastroentérite causés par la présence de cyanobactéries dans l'eau auraient été rapportés jusqu'à maintenant dans le monde. En 1979, une épidémie de gastroentérite causée par la présence de *Cylindrospermopsis raciborskii* dans un réservoir d'eau de Palm Island dans le Queensland (Australie) a conduit 140 enfants à l'hôpital. Au Brésil, en 1988, plus de 2 000 cas de gastroentérite causée par une cyanotoxine inconnue ont été rapportés sur une période de 42 jours, causant 88 décès. L'hépatotoxicité aiguë de la microcystine chez les humains a été mise en évidence suite à la mort de 76 patients hémodialysés en 1996 au Brésil. Ces patients étaient traités à une clinique dont les appareils d'hémodialyse étaient alimentés par une eau contaminée en cyanobactéries et en microcystines. C'est aux États-Unis que le premier décès attribué aux activités récréatives a été rapporté. Un adolescent de 17 ans aurait été intoxiqué par l'anatoxine-a, suite à l'ingestion accidentelle d'eau lors d'une baignade dans un étang sur un terrain de golf. Au Canada, bien qu'aucun

décès humain n'ait été associé à une intoxication aux cyanotoxines, les cyanobactéries ont causé la mort de bétail et de chiens. Le cas documenté le plus grave d'intoxication est survenu en 1992 le long de la rivière Darling en Australie, où près de 10 000 bêtes sont mortes suite à une fleur d'eau massive de l'espèce neurotoxique *Anabaena circinalis*. En ce sens, il est important de garder les animaux de ferme à l'écart des plans d'eau et d'éviter que les chiens se baignent et s'abreuvent aux endroits touchés par les cyanobactéries.

Les cyanotoxines persistent-elles longtemps dans l'environnement?

Les toxines se dégraderont par la force des mécanismes naturels du milieu, mais certaines peuvent persister pendant plusieurs jours ou plusieurs semaines selon les conditions.

Les cyanotoxines peuvent être éliminées selon différents processus tels que la dégradation par les bactéries, la photolyse (dégradation par la lumière), la dégradation thermique, l'adsorption aux particules en suspension, la liaison aux phosphates et la dilution. La vitesse de dégradation est influencée par le type et la concentration initiale des toxines et par les facteurs qui affectent la dégradation par les bactéries (par ex., composition de la microflore, température et pH de l'eau). L'efficacité de la photolyse dépend du type de toxines (les photons doivent être absorbés par la molécule) et de la quantité de lumière (significative que pour les lacs peu profonds).

La persistance des microcystines est plus élevée que celle des anatoxines. Par exemple, un délai de 30 jours est suggéré pour obtenir une réduction substantielle de la concentration en microcystine-LR dissoute à une température de 8 °C. L'anatoxine-a est pour sa part relativement stable dans le noir, mais subit rapidement une dégradation lorsqu'elle est exposée à la lumière.

Pourquoi observe-t-on des fleurs d'eau en milieu oligotrophe?

Un lac oligotrophe est caractérisé par une faible concentration en nutriments. Il est cependant possible de trouver des concentrations plus élevées en nutriments dans certaines sections d'un lac (par ex. certaines baies alimentées par des affluents pollués).

Certaines espèces de cyanobactéries préfèrent les faibles intensités lumineuses et se concentrent sous forme de bandes distinctes à des profondeurs intermédiaires, qu'on appelle «fleurs d'eau métalimnétiques». Bien que ce type de prolifération soit moins commun que les fleurs d'eau de surface, elles surviennent périodiquement dans les lacs affichant une concentration en nutriments de faible à modérée. En conséquence, même les lacs relativement propres sont susceptibles d'avoir des fleurs d'eau de cyanobactéries, bien qu'elles soient invisibles de la surface.

Il est également possible que des fleurs d'eau de cyanobactéries soient observées en conditions oligotrophes suite à un déplacement de cellules provenant de milieux enrichis. Par exemple, des fleurs d'eau de cyanobactéries ont été observées au centre du lac Biwa (source d'eau potable pour plusieurs millions de japonais), là où les concentrations en nutriments étaient pourtant très faibles. Les cyanobactéries se seraient alors développées en zone littorale, là où l'eau était enrichie en nutriments,

puis auraient été transportées sur plusieurs kilomètres par advection (courant de masses d'eau entraînées par les vents). Le même phénomène a été noté au lac Saint-Charles près de la Ville de Québec. En effet, bien que ce lac soit globalement considéré oligo-mésotrophe (phosphore total variant entre 7 et 16 $\mu\text{g L}^{-1}$ depuis une dizaine d'années), il est possible que certaines portions du lac soient plus riches en phosphore, comme la baie de l'Écho où des fleurs d'eau de cyanobactéries ont été observées en 2006.

Bien que la problématique des fleurs d'eau de cyanobactéries soit généralement associée aux formes planctoniques (organismes en suspension dans la colonne d'eau), certaines espèces de cyanobactéries peuvent proliférer à la surface des sédiments lorsque la pénétration de la lumière le permet (généralement en milieux oligotrophes). Dans certains cas, les cyanobactéries peuvent former des tapis de biomasse très dense. Il est à noter que ces formes benthiques sont différentes des cellules en dormance à la surface des sédiments (voir la section *Qu'en est-il de la population de cyanobactéries benthiques?*). Des cyanobactéries benthiques toxiques ont causé la mort d'animaux en milieux oligotrophes, notamment en Suisse et en Écosse.

Peut-il y avoir des fleurs d'eau de cyanobactéries lorsque l'eau est froide ou recouverte d'une couche de glace?

Certaines espèces de cyanobactéries ont une tolérance plus grande au froid.

En général, ce ne sont pas les cyanobactéries qui dominent lorsque la température de l'eau est faible ou sous couvert de glace. Des proliférations importantes de cyanobactéries ont toutefois été remarquées en zones tempérées durant l'hiver. Par exemple, une fleur d'eau toxique (*Anabaena flos-aquae*) a été observée au lac American (É.-U.) durant l'hiver 1989, et a persisté jusqu'au printemps 1990. Les conditions climatiques à cette latitude sont toutefois plus clémentes qu'au Québec. Aux lacs Biwa et Yogo (Japon), des fleurs d'eau d'*Aphanizomenon flos-aquae* ont été détectées en hiver à une température d'environ 10 °C. Une étude en laboratoire fut alors initiée afin de clarifier les effets de la température sur la croissance de cette espèce. Les résultats indiquent que la souche étudiée croît à une température supérieure à 8 °C, avec une température optimale variant entre 23 et 29 °C, et peut survivre à 5 °C pendant au moins 25 jours sous de faibles intensités lumineuses. Dans les lacs profonds stratifiés, *Planktothrix rubescens* peut proliférer dans la colonne d'eau à l'interface de la couche froide et de la couche chaude durant l'été (métalimnion). Cette accumulation de cellules peut ensuite se distribuer uniformément dans la colonne d'eau et persister tout l'hiver.

Les cyanobactéries peuvent-elles produire des cyanotoxines en eau froide?

Les études en laboratoire indiquent que toutes les souches de cyanobactéries étudiées ont produit la majorité des toxines lorsque les conditions lumineuses étaient optimales, c'est-à-dire durant l'été. Dans la plupart des études, le contenu cellulaire en toxines était maximal lorsque la température se situait entre 18 et 25°C, alors qu'une température inférieure à 10°C et supérieure à 30°C ont résulté en une baisse du contenu en toxines. Ces résultats suggèrent que la production de toxines durant l'hiver dans les lacs du Québec est peu probable étant donné la faible température de l'eau et les conditions lumineuses réduites sous le couvert de glace. Toutefois, les cellules benthiques en dormance à la surface des sédiments semblent capables de produire des toxines.

Les cyanobactéries entrent-elles en dormance?

Certaines espèces de cyanobactéries entrent en dormance dans les sédiments l'hiver. Ces cellules peuvent recoloniser la colonne d'eau l'année suivante si les conditions leur sont de nouveau favorables.

En plus des espèces de cyanobactéries qui croissent sur les sédiments ou autres substrats tels que la roche, les plantes aquatiques et les macroalgues (les cyanobactéries benthiques), les espèces qui forment des fleurs d'eau peuvent survivre à des conditions adverses sous forme de colonies «dormantes» dans les sédiments, par exemple durant l'hiver. Ces cyanobactéries en hibernation forment alors un inoculum pour la saison de croissance suivante. Cette situation explique pourquoi, à partir du moment où un plan d'eau est colonisé, les fleurs d'eau de cyanobactéries se succèdent tant et aussi longtemps que les conditions leur sont favorables.

La quantité totale de colonies disponibles pour le recrutement printanier vers la zone pélagique dépend de plusieurs facteurs tels que le nombre de colonies accumulées dans les sédiments, le taux de survie dans les sédiments et l'apparition de conditions favorables pour initier la phase de réinvasion. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les facteurs susceptibles d'initier la phase de réinvasion des cellules benthiques vers la zone pélagique. Ce recrutement peut être initié en réponse à un stimulus tel qu'une variation dans la température de l'eau, dans l'intensité lumineuse, des conditions anoxiques, une bioturbation (remaniement des sédiments par les mouvements et les modes de nutrition de la faune qui y vit) et des changements dans la quantité de nutriments.

Les cyanobactéries et les cyanotoxines peuvent-elles atteindre les eaux souterraines et les puits?

Des microcystines ont été détectées dans l'eau de certains puits peu profonds en Chine et en Italie. Une étude conduite en Lettonie démontre que les sols de cette région ne sont pas efficaces pour protéger les eaux souterraines des toxines produites lors de fleurs d'eau dans le lac approvisionnant la nappe phréatique. Il est cependant rare que la topographie permette un gradient hydraulique d'un lac vers une nappe phréatique. À la lumière de la littérature consultée, il ne semble généralement pas y avoir de cellules de cyanobactéries présentes dans les eaux souterraines. Il est toutefois possible que des cyanobactéries se retrouvent dans certains puits suite au ruissellement ou à la dissémination des cellules par le vent ou les animaux. Leur croissance en absence de lumière est alors très peu probable.

Est-il possible de provoquer une fleur d'eau par contamination d'un lac à l'autre?

Plusieurs riverains sont inquiets de voir leur lac contaminé par les cyanobactéries suite aux activités nautiques ou autres. Est-il nécessaire de préconiser une désinfection des embarcations et autres équipements? Probablement pas, puisqu'il y a des cyanobactéries partout et le transfert par le vent et les animaux (surtout les oiseaux aquatiques) est déjà très efficace. Pour qu'il y ait une fleur d'eau, il faut que les conditions soient propices au développement des cyanobactéries. Donc s'il y a introduction de cyanobactéries, il n'y aura pas nécessairement une fleur d'eau si les conditions ne sont pas propices (nutriments, stabilité). Il y a cependant plusieurs autres avantages à nettoyer les embarcations avant leur transfert vers un autre plan d'eau, en particulier la réduction du risque d'introduction d'espèces exotiques (par ex. le cladocère *Bythotrephes*, la moule zébrée, la plante aquatique myriophylle).

Comment freiner la problématique grandissante des fleurs d'eau de cyanobactéries au Québec?

Le meilleur moyen d'obtenir une réduction notable des fleurs d'eau de cyanobactéries est de respecter la capacité de support des écosystèmes aquatiques. La capacité de support d'un lac est déterminée, entre autres, par l'évaluation du bilan de masse ou de la charge maximale en phosphore (apports naturels et anthropiques) pouvant être tolérée par l'écosystème. Lorsque le phosphore dépasse une certaine limite au-delà de laquelle les cyanobactéries se mettent à croître et dominer le système, on sait que la capacité de support est dépassée. Il s'agit donc de limiter le développement humain en respect de la capacité de support et de changer les pratiques existantes afin de réduire les apports là où la capacité

de support est dépassée et le processus d'eutrophisation bien amorcé. Plusieurs années d'effort sont parfois nécessaires pour restaurer un milieu aquatique mais des exemples démontrent que cela est possible.

L'établissement d'un bilan de masse permet de quantifier les apports provenant de différentes origines, telles que les effluents municipaux, les effluents de résidences isolées, les parcelles agricoles, les installations industrielles et commerciales (par ex., golf, piscicultures) et le milieu naturel. Un bilan rigoureux permet de désigner les responsabilités de chacun et de bien cibler les actions à entreprendre qui permettront de réduire efficacement les apports de phosphore.

L'agriculture est sans contredit la principale source de pollution diffuse responsable du transport de nutriments, de sédiments et de contaminants sur de courtes et de grandes distances vers les lacs, les rivières, ainsi que le fleuve et l'estuaire du Saint-Laurent. L'azote est très mobile dans les sols et ainsi facilement sujet au lessivage par les eaux de pluie. Au contraire, le phosphore est moins mobile et fortement fixé aux particules de sol et de matière organique lessivées par l'eau de ruissellement. Ainsi, en ce qui a trait à la pollution diffuse, la voie principale empruntée par le phosphore est le ruissellement de surface et l'érosion éolienne. Une gestion appropriée des matières fertilisantes (fertilisants agricoles organiques et de synthèse, boues municipales et de fabriques de pâtes et papiers, engrais de pelouse et de jardin, etc.) est une action prioritaire pour réduire à son minimum la dégradation des milieux aquatiques causée par la pollution diffuse.

Au Québec, la production porcine est pointée du doigt notamment à cause de la difficile gestion collective de sa surproduction de fumier concentrée dans une superficie restreinte du territoire agricole. À la ferme, il est plus que jamais important que la fertilisation en phosphore soit prescrite en fonction des seuls prélèvements des cultures et de la saturation en phosphore des sols selon les règles de calcul établies par le *Règlement sur les exploitations agricoles*. La caractérisation adéquate des charges en phosphore des effluents d'élevage ainsi que l'élaboration de plan agro-environnemental de fertilisation (PAEF), rédigé de manière professionnelle dans la perspective de la recherche déterminée d'un bilan de phosphore équilibré, sont des pièces maîtresses du respect de la capacité de support des écosystèmes s'ils sont rigoureusement respectés par les exploitants agricoles. Des mesures de contrôle doivent être notamment renforcées dans les bassins versants agricoles susceptibles de causer des impacts négatifs sur les écosystèmes à risques, et là où des doutes subsistent quant au respect des doses, périodes et lieux d'épandage prescrits.

D'autre part, au Québec, on estime que 25 % des résidences et chalets ne sont pas raccordés à un réseau d'égout. Bien que la majorité des résidences isolées soit équipée d'une fosse septique et d'un champ d'épuration, la conformité de ces installations n'est pas toujours vérifiée. Un suivi de l'efficacité des installations septiques est donc incontournable.

Toutefois, même si les installations sont conformes, elles libèrent du phosphore. Il existe maintenant sur le marché un système de lit filtrant artificiel qui permet de traiter efficacement les eaux usées des propriétés privées isolées. Ce type de système développé en Norvège est performant dans les régions nordiques, la qualité de l'effluent à la sortie de l'installation respectant les standards européens de qualité pendant toute l'année. Ce procédé permet l'enlèvement de 80 % de la matière organique, de 40 à 60 % de l'azote total et jusqu'à 90 % du phosphore total sur une période allant jusqu'à 10 ans.

La plupart des stations d'épuration municipales ne permettent pas d'éliminer complètement les charges de phosphore et d'azote avant le rejet des eaux traitées dans l'environnement. Ces nutriments excédentaires peuvent être éliminés par des procédés de traitement biologiques; boues activées, lits filtrants immergés et marais filtrants entre autres sont bien documentés et mériteraient d'être mieux connus du public.

La seconde action qui vise la réduction de la pollution diffuse est la gestion du ruissellement sur les parcelles ou en aval de la source de pollution. Quoique limitée pour sa contribution en terme de capacité purificatrice de rétention des éléments nutritifs, l'implantation ou le maintien de zones tampon et de bandes riveraines en bordure de tout plan d'eau sont des impératifs afin de réduire l'apport de nutriments en provenance des élevages, des systèmes de production végétales et des installations septiques individuelles.

POUR EN SAVOIR PLUS

Chorus, I. et Bartram, J. (1999) Toxic Cyanobacterium in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management. London: E & FN Spon (Published on behalf of the World Health Organisation).

Chorus, I. (2001) Cyanotoxins: Occurrence, Causes, Consequences. Springer-Verlag. 357 p.

Codd, G.A., Morrison, L.F. et Metcalf, J.S. (2005) Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. Toxicology and Applied Pharmacology 203: 264-272.

Duy, T.N., Lam, P.K.S., Shaw, G.R. et Connell, D.W. (2000) Toxicology and Risk Assessment of Freshwater Cyanobacterial (Blue-Green Algal) Toxins in Water. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 163: 113-186.

Groupe scientifique sur l'eau (2005) Propositions de critères d'intervention et de seuils d'alertes pour les cyanobactéries. Dans : Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine, Institut national de santé publique du Québec, 4 p. Document disponible sur : <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/348-CriteresInterventionCyanobacteries.pdf>.

Hyenstrand, P., Blomqvist, P. et Petterson, A. (1998) Factors determining cyanobacterial success in aquatic systems - a literature review. Archiv für Hydrobiologie Special Issues of Advanced Limnology 51: 41-62.

Jacoby, J.M. et al. (2000) Environmental factors associated with a toxic bloom of *Microcystis aeruginosa*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 57: 231-240.

Jenssen, P.D. et al. (2005). High Performance Constructed Wetlands for Cold Climates, Journal of Environmental Science and Health 40: 1343-1353.

Kalff, J. (2002) Limnology; inland water ecosystems, Upper Saddle River, Prentice-Hall, 592 p.

Lavoie, I., Laurion, I. et Vincent, W.F. (2007) Les fleurs d'eau de cyanobactéries, revue de littérature. INRS rapport n° 916, 120 p.

Pearl, H.W., Fulton, R.S., Moisander, P.H. et Dyble, J. (2001) Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. The Scientific World 1: 76-113.

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, de l'agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (www.afsset.fr)

Whitton, B.A. et Potts, M. (2000) The ecology of cyanobacteria, their diversity in time and space. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 669 p.