

Michel Aragno¹, Gilbert Greub^{2,3}

Cyanobactéries toxiques

Durant la canicule de fin juillet, plusieurs chiens sont décédés à proximité de l'embouchure de l'Areuse, sur le lac de Neuchâtel, des suites d'une intoxication attribuée à la présence de «fleurs d'eau» de cyanobactéries observées dans les mêmes eaux.

Comme souligné par l'un d'entre nous sur le site de la RTS le 1^{er} août [1], le risque pour l'être humain est limité puisque contrairement aux chiens qui peuvent boire des quantités d'eau du lac pour se désaltérer, surtout lors des fortes chaleurs estivales que nous avons connues cet été, les êtres humains vont tout au plus «boire la tasse». Il faut toutefois éviter de se baigner dans des eaux dans lesquelles des cyanobactéries sont retrouvées, car ces bactéries peuvent causer chez l'homme, selon les toxines (hépatotoxines, dermatotoxines, neurotoxines) qu'elles produisent, différents signes et symptômes dont des nausées, vomissements, crampes abdominales, diarrhées, douleurs musculaires et/ou articulaires, atteintes cutanées (irritations), céphalées ... [2,3].

En l'occurrence, le résultat des analyses effectuées dans le contenu des estomacs de deux chiens morts le 30 juillet 2020 à la suite d'une baignade dans le lac de Neuchâtel a confirmé la présence de deux cyanobactéries (*Tychothema* et *Phormidium/Microcoleus*) connues pour produire des neurotoxines (anatoxine). Ces cyanobactéries sont typiquement filamenteuses (figure 1). Des quantités importantes d'anatoxine, à dose létale, ont aussi été documentées dans le contenu de l'estomac d'un des chiens par un laboratoire à Berlin. Les cyanobactéries sont donc en cause dans le décès de ces chiens. Le phénomène est bien connu, touchant les chiens en particulier, puisqu'ils aiment aller dans l'eau et s'y désaltérer, au contraire des chats, par exemple. Les chiens ont donc bu de l'eau dans une zone de «fleurs d'eau» à cyanobactéries toxiques (le plus probable), ou alors ont mangé des agglomérats de cellules cyanobactériennes.

Mais qui sont les cyanobactéries?

On les a longtemps considérées comme des algues (cyanophycées, ou algues bleues). Il s'agit en fait d'un phylum du domaine des *Bacteriae* (vraies bactéries), dont l'apparition, il y a environ 3 milliards d'années, a constitué le tournant le plus important de l'évolution du vivant: l'invention de la *photosynthèse oxygénique*, qui a permis l'utilisation de l'eau comme source des électrons nécessaires à la construction du vivant, source quasi illimitée au regard de celles utilisées jusque-là, à savoir les ions sulfures et ferrugineux; ceci a considérablement stimulé l'évolution du vivant, donnant entre autres les premiers écosystèmes complexes de la biosphère, formés de tapis cyanobactériens, les *stromatolithes* (figure 2).

Cette «révolution» a eu une autre conséquence immense pour l'environnement terrestre, l'apparition de l'oxygène libre, qui est à la base un déchet de la photosynthèse, et qui a fini par s'accumuler dans l'atmosphère, au fur et à mesure que la biomasse de cyanobactéries s'accumulait et se fossilisait dans le sous-sol. L'oxygène libre fut à l'origine une substance extrêmement toxique pour les organismes anaérobies qui avaient dominé jusque-là, et contre lequel ils ont dû développer des mécanismes de protection. Ce ne fut qu'ensuite que certains d'entre eux ont appris à utiliser l'oxygène pour la *respiration aérobie*, largement plus rentable que les autres formes de métabolisme énergétique que sont les fermentations et les respirations anaérobies. Par la suite, des bactéries aérobies se sont associées sous forme d'*endosymbiose* à des cellules dérivées du phylum des archées, pour donner la première lignée d'eucaryotes, dont les endosymbiotes devenus les mitochondries ont apporté la respiration aérobie, à l'origine du monde animal. Cet origine endosymbiote des mitochondries a été admirablement confirmée par l'analyse des séquences d'hydrogénases de rickettsies et de leur comparaison avec celles de mitochondries [4].

Par la suite, des cyanobactéries ont colonisé certaines lignées de cellules eucaryotes, engendrant les *chloroplastes* dans une interaction probable en ménage à trois avec des chlamydiae ancestrales [5]. Cette hypothèse a d'ailleurs été étayée par les équipes des professeurs Ball et Greub en analysant le métabolisme de la vitamine K, qui chez les cyanobactéries est d'origine chlamydienne [6]. Une autre preuve de l'interaction étroite des chlamydiae et des cyanobactéries fut apportée par l'analyse des génomes de chlamydiae, qui a démontré le haut taux de gènes similaires aux cyanobactéries dans les génomes de divers membres de l'ordre des *Chlamydiales* [7,8].

Ainsi, les cyanobactéries ont joué un rôle majeur dans l'évolution à la fois des animaux grâce à la respiration mitochondrienne possible par une atmosphère oxygénée mais également du règne végétal par la biogénèse des chloroplastes. L'évolution n'est donc pas que le fait de la compétition acharnée entre espèces, comme le voudrait un certain néolibéralisme darwiniste à la mode, mais aussi, voire surtout, de l'entraide, de l'association mutualiste de diverses lignées d'organismes.

Merci, les cyanobactéries

Les cyanobactéries actuelles se présentent sous diverses formes: cellules

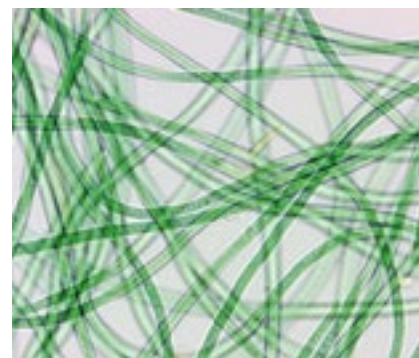


Figure 1: Le *phormidium*, aussi appelée *microcoleus* est une «algue bleue» (cyanobactérie) aux filaments non branchés (photographie du Dr Peter Siver, Visuals unlimited, Science photo Library).

1 Ancien directeur du laboratoire de microbiologie, Université de Neuchâtel
2 Directeur de l'Institut de microbiologie de l'Université de Lausanne
3 Médecin-cadre au sein du service des maladies infectieuses, CHUV, Lausanne



Toxische Cyanobakterien

Cyanobakterien vermehren sich im Sommer oftmals stark aufgrund der hohen Temperaturen oder der Änderungen im Säuregrad oder Phosphorgehalt der Seen; daher ist es gut möglich, dass wir in Zukunft im Zuge des Klimawandels stärker mit ihnen konfrontiert sein werden. Cyanobakterien sind einerseits aussergewöhnlich aufgrund ihrer metabolischen Eigenschaften, die einst für die Evolution von Eukaryonten von wesentlicher Bedeutung waren, andererseits teilweise gefährlich aufgrund ihrer Toxine.

Das Risiko für den Menschen ist begrenzt, da wir im Gegensatz zu Hunden, die vor allem bei sommerlicher Hitze auch grössere Mengen Seewasser trinken, um ihren Durst zu stillen, höchstens einmal baden gehen. Allerdings ist das Schwimmen in Cyanobakterien-belasteten Gewässern zu vermeiden, da diese Bakterien je nach produziertem Toxin verschiedene Beschwerden und Symptome beim Menschen hervorrufen können, darunter Übelkeit, Erbrechen, Bauchkrämpfe, Durchfall, Muskel- und/oder Gelenkschmerzen, Hauterkrankungen und Kopfschmerzen.

isolées, ou groupées en amas, et souvent en longs filaments, comme *phormidium* (figure 1) et *tychonema* (figure 3), par exemple. On distingue les cyanobactéries benthiques (généralement présentes sur les cailloux au fond des rivières) et les cyanobactéries pélagiques (planctoniques), typiquement présentes dans les lacs.

Dans les années 1970, l'équipe de Michel Aragno en avait observées dans le Loclat, ou lac de St-Blaise, près de Neuchâtel. C'était une espèce pélagique, *Planktothrix* (ex-*Oscillatoria*) *rubescens*. Comme son nom l'indique, cette «algue bleue» est de couleur rouge, ce qui tient à son pigment dominant, la phycoérythrine, alors que chez les cyanobactéries bleu-vert, c'est un pigment voisin de

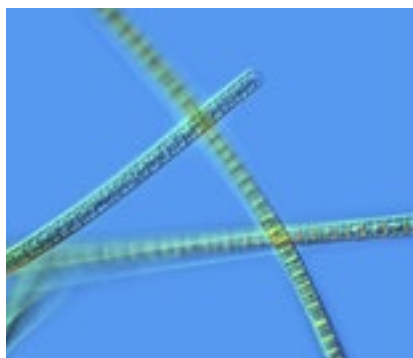


Figure 3: *Thycodema*, un autre exemple de cyanobactérie filamenteuse (Reproduced from the Encyclopedia of Life repository website: <https://content.eol.org/data/media/7f/0d/3e/542.26966870413.jpg>)



Figure 2: Les stromatolithes. Illustration de la terre telle qu'elle était probablement à l'ère des archées (3,8 à 2,5 milliards d'années). A cet époque, l'activité volcanique était intense. La croûte terrestre commençait à durcir et la composition de l'atmosphère et des océans était diamétralement opposée. Les formations qui sont visibles sous la surface de l'eau sont des stromatolithes formés par la précipitation du carbonate de calcium par des cyanobactéries. (Crédit photographique: Christian Jegou, Publiphoto diffusion, Science photo Library).

couleur bleue, la phycocyanine, qui domine. En complément de la chlorophylle, ces pigments constituent l'«antenne» qui capte l'énergie lumineuse nécessaire à la photosynthèse.

Planktothrix rubescens était abondante en été, au-dessus du chémocline, et engendrait même une sursaturation en oxygène (jusqu'à 300% de la saturation) dans la zone qui ne se mélangeait pas avec les eaux de surface (entre le chémocline et le thermocline). Comme de nombreuses bactéries phototrophes pélagiques, ces cyanobactéries possèdent des vacuoles gazeuses qui leur permettent de se maintenir au niveau optimal de la colonne d'eau. Pour des raisons peu claires, il arrive qu'elles surproduisent ces vacuoles gazeuses, ce qui les amène à flotter à la surface, formant une «fleur d'eau», pellicule rose connue dans le lac de Morat sous le nom de «sang des Bourguignons».

Pour conclure, notons que ces cyanobactéries prolifèrent souvent durant l'été, du fait des hautes chaleurs ou de changement de l'acidité ou de la teneur en phosphore des lacs; il n'est donc pas impossible qu'à l'avenir, avec le réchauffement climatique, nous soyons davantage confrontés à ces cyanobactéries, à la fois extraordinaires de par leurs compétences métaboliques et, pour certaines, dangereuses via leurs toxines.

Références

1. <https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/11502626-les-cyanobacteries-du-lac-de-neuchatel-ne-sont-pas-sans-danger-pour-lhomme.html>.
2. C. Svrcek, D. W. Smith, Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: a review, *J. Environ. Eng. Sci.* 3: 155–184, 2004.
3. Facts about cyanobacteria and cyanobacterial harmful algal blooms by the Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (From www.cdc.gov/hab/cyanobacteria/facts.htm).
4. Andersson SG, Zomorodipour A, Andersson JO, Sicheritz-Pontén T, Alsmark UC, Podowski RM, Näslund AK, Eriksson AS, Winkler HH, Kurland CG. The genome sequence of *Rickettsia prowazekii* and the origin of mitochondria. *Nature*. 1998 Nov 12;396(6707):133–40.
5. Ball SG, Greub G. Blurred pictures from the crime scene: the growing case for a function of Chlamydiales in plastid endosymbiosis. *Microbes Infect.* 2015 Nov-Dec;17(11–12):723–6.
6. Cenci U, Qiu H, Pillonel T, Cardol P, Remacle C, Colleoni C, Kadouche D, Chabi M, Greub G, Bhattacharya D, Ball SG. Host-pathogen biotic interactions shaped vitamin K metabolism in Archaeplastida. *Sci Rep.* 2018 Oct 15;8(1):15243.
7. Brinkman FS, Blanchard JL, Cherkasov A, Av-Gay Y, Brunham RC, Fernandez RC, Finlay BB, Otto SP, Ouellette BF, Keeling PJ, Rose AM, Hancock RE, Jones SJ, Greberg H. Evidence that plant-like genes in Chlamydia species reflect an ancestral relationship between Chlamydiales, cyanobacteria, and the chloroplast. *Genome Res.* 2002 Aug;12(8):1159–67.
8. Pillonel T, Tagini F, Bertelli C, Greub G. ChlamDB: a comparative genomics database of the phylum Chlamydiae and other members of the Planctomycetes-Verrucomicrobia-Chlamydiae superphylum. *Nucleic Acids Res.* 2020 Jan 8;48(D1):D526–D534.