



**LE PROGRAMME DE RECHERCHE
SUR LES CYANOBACTÉRIES
AU LAC BROMONT**



CAHIER 2
CONNAISSANCES ET CONCEPTS

**Dolors Planas
Claire Vanier
Estelle Lavirotte**

UQÀM | Service aux collectivités
Université du Québec à Montréal



Comité d'encadrement depuis 2007

Dolores Planas, professeure au Département des Sciences biologiques de l'UQAM, responsable de la recherche

Béatrix Beisner, professeure au Département des Sciences biologiques de l'UQAM

Yves Gosselin, Anne Joncas, Marcel Samson et Martin Miron, de Action conservation du bassin versant du lac Bromont (ACBVLB)

Jean-François L. Vachon, Nicolas Rousseau et Mylène Leblanc, de la Municipalité de Bromont

Claire Vanier, agente de développement, Service aux collectivités de l'UQAM

Rédaction

Dolores Planas

Claire Vanier

Estelle Lavirotte, stagiaire

Révision et coordination de la production

Claire Vanier, Service aux collectivités de l'UQAM

Photographie de la page couverture : Myriam Jourdain

Soutiens financiers et techniques

Programme d'aide financière à la recherche et à la création, UQAM - recherche dans le cadre des services aux collectivités, Volet 2

Municipalité de Bromont

Centre de recherche en géochimie et géodynamique - Groupe de Recherche Interuniversitaire en Limnologie et en Environnement Aquatique (GÉOTOP-GRILL)

Ministère du développement durable de l'environnement et des parcs (MDDEP)

Programme Études-travail

Programme Horizons sciences, d'Environnement Canada

Service aux collectivités de l'UQAM

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)

Fonds de recherches du Québec - nature et technologies (FQRNT)

Organisme de bassin versant de la Yamaska (OBY) (anciennement, Conseil de gestion du bassin versant de la Yamaska - COGEBY)

Épicerie Métro de Bromont.

Service aux collectivités de l'Université du Québec à Montréal

Case postale 8888, Succ. Centre-Ville,
Montréal (Qc) H3C 3P8

Téléphone : (514) 987-3177

Télécopieur : (514) 987-6845

www.sac.uqam.ca/accueil.aspx

Action conservation du bassin versant du lac Bromont

Case postale 17
Bromont (Qc) J2L 1A9

(450) 263-9130

Courriel : info@lacbromont.ca

www.lacbromont.ca

ISBN 978-2-923773-15-5

Dépôt légal-Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU	II
LISTE DES ABRÉVIATIONS	III
INTRODUCTION	1
QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DES LACS.....	2
LES NUTRIMENTS ET LES CONCEPTS ASSOCIÉS.....	4
Les éléments nutritifs ou nutriments	4
Les unités de mesure et quelques autres concepts.....	6
Le bassin versant, les apports en nutriments et les bilans de nutriments	7
L'eutrophisation et les statuts trophiques des lacs	10
Classification trophique des lacs.....	11
Principaux phénomènes qui se produisent dans un lac.....	12
Le brassage de la colonne d'eau	12
La stratification thermique.....	13
L'abaissement de la thermocline	15
Les liens entre la stratification, l'oxygène dissout et le relargage du phosphore.....	15
LES ALGUES.....	16
La photosynthèse	17
Le rapport de Redfield	17
Les grands groupes d'algues en eau douce	18
Quelques formes de cyanobactéries.....	20
Quelques espèces de cyanobactéries du lac Bromont	20
Quels sont les avantages qui permettent aux cyanobactéries de survivre à des conditions extrêmes, contrairement aux autres groupes?	22
RÉFÉRENCES	23

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU

Figure 1 : Un lac, ses tributaires, sa décharge, sa colonne d'eau et ses sédiments	2
Figure 2 : Distribution de la lumière dans la colonne d'eau d'un lac : zone euphotique et zone aphotique.	3
Figure 3 : Exemples (a) de dissolution : le sucre dans l'eau ; (b) de sédimentation : des grains (particules) de sable dans l'eau.....	4
Figure 4 : Schémas explicatifs de la concentration (A) et du débit (B)	6
Figure 5 : Calcul de la charge (kg/j) de nutriments apportés par un ruisseau en une journée.....	6
Figure 6 : Le bassin versant d'un lac	7
Figure 7 : Le calcul du bilan de nutriments : une boîte noire.....	8
Figure 8 : Lac oligotrophe et lac eutrophe.....	10
Figure 9 : Schématisation de l'eutrophisation d'un lac	10
Figure 10 : Classification trophique des lacs de l'Estrie, du Québec, et de l'Europe et États-Unis confondus.....	11
Figure 11 : Schéma du processus de stratification et du brassage de la colonne d'eau dans un lac tempéré.....	12
Figure 12 : Exemple d'onde interne illustrée par la température de l'eau	12
Figure 13 : Schéma des différentes couches d'un lac stratifié et du profil de température en été	13
Figure 14 : Oscillations de la thermocline entraînées par le vent et le brassage de la colonne d'eau.....	14
Figure 15 : Brassage de la colonne d'eau qui entraîne la disparition de la stratification	14
Figure 16. Abaissement de la thermocline suite à de forts vents ou orages	15
Figure 17 : Schéma général de la photosynthèse des algues.....	17
Figure 18 : Les grands groupes d'algues (Chlorophycées, Chrysophycées, Chryptophycées, Diatomées, Dinophycées, Euglénophycées, Cyanophycées)	19
Figure 19 : Quelques formes de cyanobactéries.....	20
Figure 20 : Des espèces de cyanobactéries trouvées au lac Bromont	21
Figure 21 : Vacuoles de cyanobactéries remplies de gaz.....	22
Figure 22 : Des formes de cellules de résistance de cyanobactéries trouvées au lac Bromont.....	22
Tableau 1 : Classes des niveaux trophiques des lacs, avec les valeurs correspondantes de phosphore total, de chlorophylle a et de transparence de l'eau.....	11

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACBVLB : Action conservation du bassin versant du lac Bromont

MES : Matières en suspension

N : Azote

ND : Azote dissous dans l'eau

NP : Azote particulaire dans l'eau

NT : Azote total dans l'eau

NH₄ : Azote inorganique dissous dans l'eau interstitielle des sédiments

P : Phosphore

PD : Phosphore dissous dans l'eau

PP : Phosphore particulaire dans l'eau

PT : Phosphore total dans l'eau

PO₄ : Phosphore inorganique dissous dans l'eau interstitielle des sédiments

SAC : Service aux collectivités de l'UQAM

UQAM : Université du Québec à Montréal

INTRODUCTION

Entre 2007 et 2011, un Programme de recherche partenariale a été réalisé au lac Bromont par Dolores Planas et Béatrix Beisner, de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), avec Action conservation du bassin versant du lac Bromont (ACBVLB), suite à une demande de cette dernière. **Globalement, ce programme de recherche visait à étudier la présence de cyanobactéries dans le lac Bromont, à en déterminer les causes et à faire des recommandations.** La croissance de ces algues étant liée à une augmentation de la fertilité de l'eau des lacs, particulièrement par l'apport de phosphore, la recherche s'est principalement penchée sur les sources potentielles de nutriments et le lien entre ces nutriments et la croissance des cyanobactéries. Le Programme de recherche a été initialement soutenu par le Service aux collectivités de l'UQAM puis par la Municipalité de Bromont, qui y a grandement contribué.

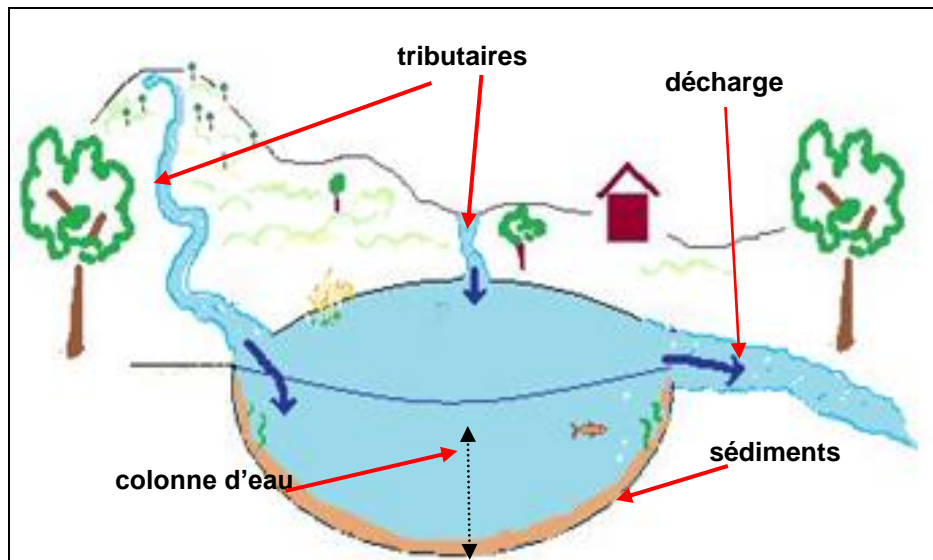
Suite à ces études et en vue de favoriser la diffusion et l'appropriation des connaissances mises en lumière par le programme de recherche, neuf Cahiers ont été produits. Les informations et les données présentées ces Cahiers sont basées sur les études réalisées dans le cadre du Programme de recherche. Quelques informations sont aussi tirées du rapport du Rappel, réalisée en 2008 sur le lac et ses tributaires.

Le premier cahier (Cahier 1) présente les caractéristiques du lac Bromont et les objectifs du programme de recherche, le présent cahier traite des connaissances et concepts qui devraient, nous l'espérons, fournir aux lecteurs de comprendre les résultats des études présentées dans les cahiers sur le programme de recherche au Lac Bromont. Le Cahier 3 porte sur les méthodologies générales employées dans les études au lac Bromont. Les cinq cahiers suivants font état des résultats des études réalisées au lac Bromont en 2007-2008 (Cahier 4), en 2008-2009 (Cahier 5), en 2009-2010 (Cahier 6), et pendant les périodes libres de glace de 2010 (Cahier 7) et de 2011 (Cahier 8). Chaque cahier reflète les questions suscitées par les résultats des années antérieures, outre d'assurer un suivi des relations entre les nutriments et les algues, dans le lac. Par ailleurs, étant donné l'importance de la **période libre de glace**, pour la croissance des algues mais aussi dans la fréquence et l'intensité des apports au lac par les ruisseaux, les études depuis 2007-2008 ont toujours accordé une place centrale à cette période.

Le dernier cahier, le Cahier 9, synthétise les résultats les plus importants et présente des recommandations pour assurer la qualité des eaux du lac. Outre les résultats annuels, ces cahiers présentent aussi en introduction les méthodologies spécifiques aux objectifs de recherche de ces années. De plus, une brève formation et un protocole d'échantillonnage ont été développés, dans la perspective que la municipalité et l'ACBVLB maintiennent leur collaboration dans le suivi de la qualité de l'eau du lac.

Plusieurs personnes et organisations ont contribué à la réalisation du Programme de recherche au lac Bromont. Sans la générosité de tous, le Programme de recherche n'aurait pu se réaliser. Nous ne reprenons pas ici les **remerciements** : le lecteur pourra en consulter la liste dans le Cahier 1, de même que la liste des **publications** produites dans le cadre du Programme de recherche au lac Bromont.

QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DES LACS



Modifié de McMeekin et al, 2008

Figure 1 : Un lac, ses tributaires, sa décharge, sa colonne d'eau et ses sédiments

TRIBUTAIRES

Les tributaires sont les cours d'eau (ruisseaux, rivières) que se déversent dans un plan d'eau (lac, rivière, fleuve, mer) et qui l'alimentent. Ce sont les tributaires, ainsi que les berges des plans d'eau, qui constituent généralement les apports externes de nutriments aux plans d'eau.

DÉCHARGE

La décharge représente l'ensemble de l'eau qui sort d'un lac par un ou plusieurs ruisseaux. Par la décharge peuvent être exportés des nutriments, des algues et autres particules en suspension dans l'eau.

COLONNE D'EAU

La colonne d'eau désigne l'eau comprise entre la surface et le fond d'un plan d'eau. C'est toute l'eau située au-dessus des sédiments.

SÉDIMENTS

Les sédiments sont des particules de tailles variables transportées par l'eau des ruisseaux, les eaux de ruissellement et le vent, et qui se déposent dans le fond d'un plan d'eau. Ces particules peuvent être minérales (argile, sable, etc.) ou organiques (algues et animaux morts, résidus de décomposition d'algues, de plantes et d'animaux, fumiers plus ou moins dégradés, etc.). Les sédiments qui s'accumulent au fond des lacs peuvent former au cours du temps des dépôts importants.

EAU INTERSTITIELLE OU PORALE

L'eau interstitielle est l'eau qui se trouve **entre les particules composant les sédiments** au fond du lac. Elle contient beaucoup d'éléments dissous, comme le phosphore, l'ammonium, le fer, le manganèse et certains métaux.

MATIÈRES EN SUSPENSION (MES)

Les matières en suspension (MES) sont des particules solides qui flottent dans l'eau et qui ne se sont pas encore déposées au fond. Elles sont généralement apportées par les sources externes et proviennent du sol dénudé, des roches, des terrains agricoles ou maraîchers et de toute autre source de particules solides. Les MES peuvent aussi provenir d'une remise en suspension des sédiments du lac, ou encore en partie composées d'algues vivantes ou mortes, de débris d'animaux ou de végétaux. Notons que les MES peuvent aussi être une source de nutriments pour les algues.

DENSITÉ DE L'EAU

La **densité** d'un élément est le calcul de la relation entre le poids de cet élément et le volume qu'il occupe dans l'espace. Elle est exprimée en kilogramme par mètre cube (kg/m^3). Plus la densité est élevée, plus l'élément est lourd. Dans le cas de l'eau, la relation entre la température et la densité est particulière. En effet, la densité de l'eau est maximale à 4°C. Au-dessus et en dessous de cette valeur, la densité est moins élevée et l'eau est plus légère. C'est à cause de cette particularité de l'eau qu'en hiver la glace flotte sur l'eau, et qu'en été l'eau chaude est en surface et l'eau froide, plus lourde, se retrouve en profondeur.

TRANSPARENCE ET TURBIDITÉ DE L'EAU

La **transparence de l'eau** d'un lac nous informe sur la profondeur à laquelle la lumière du soleil peut pénétrer. Cette transparence dépend de la quantité de matières présentes dans l'eau. Ces matières peuvent être des MES ou des substances dissoutes dans l'eau, comme les acides humiques qui viennent du ruissellement de certains sols et qu'on retrouve dans les *eaux brunes* au Québec. Une **eau turbide** contient beaucoup de matières dissoutes ou particulaires en suspension, ce qui diminue la transparence de l'eau et donc la pénétration de la lumière, et peut limiter la croissance des algues.

ZONES EUPHOTIQUE ET APHOTIQUE

La **zone euphotique** représente la couche d'eau dans laquelle la lumière pénètre suffisamment pour permettre la photosynthèse et la croissance des algues et des plantes aquatiques. La profondeur de cette couche dépend de la transparence de l'eau.

La **zone aphotique** est la profondeur de l'eau où il reste moins de 1 % de la lumière présente à la surface de l'eau : la transmission de la lumière y est presque nulle et limite ainsi la croissance des algues.

Zone
euphotique

Zone
aphotique



Figure 2 : Distribution de la lumière dans la colonne d'eau d'un lac : zone euphotique et zone aphotique

LES NUTRIMENTS ET LES CONCEPTS ASSOCIÉS

Les éléments nutritifs ou nutriments

Les nutriments sont les éléments minéraux indispensables à la croissance des êtres vivants. Dans le contexte du milieu aquatique, les principaux nutriments nécessaires aux végétaux, et donc aux algues, sont le **phosphore** et **l'azote**.

PHOSPHORE

Dans la majorité des régions du globe, le phosphore (P) représente le nutriment le plus important pour la croissance des algues : essentiel pour leur croissance et il en est aussi le **facteur limitant** de cette croissance. Dans l'eau, on le trouve sous trois formes :

- Le phosphore dissout (**PD**) est sous forme dissoute dans l'eau, comme le serait du sucre (Figure 1a). Ce phosphore vient généralement de la dégradation des feuilles et des animaux, et est directement utilisable par les algues pour leur croissance.
- Le phosphore particulaire (**PP**) représente le phosphore contenu dans les organismes (végétaux et animaux) et dans les particules en suspension, qui peuvent sédimenter et s'accumuler au fond de l'eau (Figure 1b).
- Le phosphore total (**PT**) représente tout le phosphore qu'on peut mesurer dans l'eau, soit la somme du PD et du PP.

Les formes de phosphore mesurées dans l'eau sont le **PD** et le **PT**. Les valeurs de **PP** sont par la suite calculées à partir de ces deux données ($PP = PT - PD$).

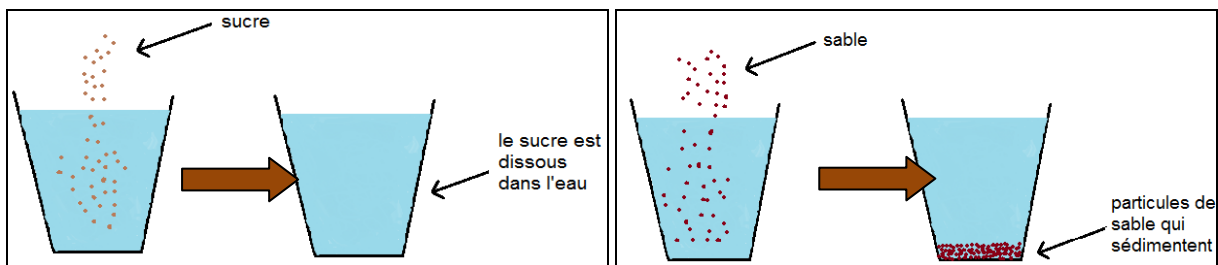


Figure 3 : Exemples (a) de dissolution : le sucre dans l'eau ; (b) de sédimentation : des grains (particules) de sable dans l'eau

Par ailleurs, la forme de phosphore relarguée par les sédiments est le phosphore inorganique dissout (PO_4).

AZOTE

Si le phosphore représente le nutriment le plus important pour la croissance des algues, ce n'est généralement pas le cas pour l'azote (N), surtout en regard des cyanobactéries, qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique. En fait, normalement on retrouve 16 fois plus d'azote que de phosphore dans l'eau (i.e. un ratio $N/P = 16/1$).

Par contre, certaines études ont montré que la production de toxines des cyanobactéries (microcystines) est supérieure lorsqu'il manque d'azote par rapport au phosphore, i.e. quand le ratio $< 16/1$ (Orihel et coll. 2012; Kotak et coll. 2000). C'est pourquoi il est important de l'évaluer.

Dans l'eau, on trouve l'azote sous trois formes :

- L'azote dissous (**ND**) dans l'eau, qui vient généralement de la dégradation des feuilles et des animaux, et qui est directement utilisable par les algues.
- L'azote particulaire (**NP**) représente l'azote contenu dans les organismes (végétaux et animaux) et les détritiques en suspension, qui peuvent sédimenter et s'accumuler au fond de l'eau.
- L'azote total (**NT**) représente la somme de NP et ND.

Les formes d'azote mesurées dans l'eau sont le ND et le NT, les valeurs de **NP** sont par la suite calculé à partir de ces deux données ($NP = NT - ND$).

La forme d'azote relarguée par les sédiments est l'azote inorganique dissous (**NH₄**).

Notons que l'azote gazeux (N₂), le gaz le plus répandu dans l'atmosphère (70%), est peu soluble dans l'eau et n'est généralement pas mesuré. L'azote gazeux est toutefois utilisable comme source d'azote pour quelques espèces de cyanobactéries (*Aphanizomenon* par exemple).

PRODUCTIVITÉ

La productivité d'un lac est la quantité de matière vivante (algues, zooplancton, poissons, etc.) produite dans le lac pendant une durée donnée. Un lac productif est un lac qui permet une forte croissance des algues.

Les unités de mesure et quelques autres concepts

KILOGRAMME, GRAMME, MILLIGRAMME ET MICROGRAMME

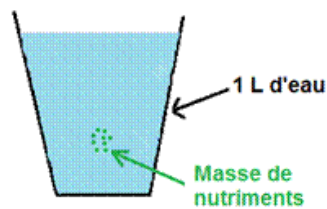
Le kilogramme, le gramme, le milligramme et le microgramme sont TOUS des unités de mesure de poids. Le symbole du kilogramme est **kg**. Le gramme est mille fois plus petit que le kilogramme et son symbole est **g**. Le milligramme (**mg**) est mille fois plus petit que le gramme et le microgramme (**µg**) est un million de fois plus petit que le gramme.

MILLIMÈTRE ET MICROMÈTRE

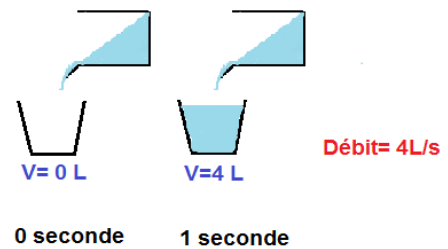
Le millimètre et le micromètre sont des unités de mesure de longueur. Le millimètre est mille fois plus petit qu'un mètre et son symbole est **mm**. Le micromètre est un million de fois plus petit qu'un mètre et son symbole est **µm**. La taille des algues est souvent exprimée en micromètre.

CONCENTRATION

La concentration (**C**) d'un élément est la mesure de la quantité (ou masse) de cet élément dans un certain volume d'eau (Figure 4 A). Par exemple, 1 gramme de sucre dans 1 litre d'eau (1 **g/L**) ou 1 kilogramme dans 1 litre d'eau (1 **kg/L**). Dans le cas des nutriments dans l'eau, la concentration est exprimée en milligramme par litre (**mg/L**) ou en microgramme par litre d'eau (**µg/L**).



A : Concentration d'un nutriment : masse du nutriment dans un volume d'eau (par ex. : mg/l)



B. Débit : volume d'eau qui s'écoule dans un temps donné (par ex. : m³/jour)

Figure 4 : Schémas explicatifs de la concentration (A) et du débit (B)

DÉBIT

Le débit (**Q**) est la mesure du volume d'eau qui s'écoule à un endroit par unité de temps (Figure 4 B). Il peut s'exprimer en litre par jour (**L/jour**) ou en mètres cubes par seconde (**m³/s**). Il se mesure en multipliant la vitesse de l'eau en mètres par seconde (m/s) par l'aire de la section de la rivière en mètres carrés (m²).

LA CHARGE

La charge d'un nutriment, par exemple le phosphore, pour un ruisseau donné est la quantité de phosphore que le ruisseau apporte au lac en une journée. Tel qu'illustré à la Figure 5, l'importance de cette charge dépend donc : (i) de la concentration du nutriment (**C**) mesurée dans le ruisseau, et (ii) du débit (**Q**) du ruisseau.

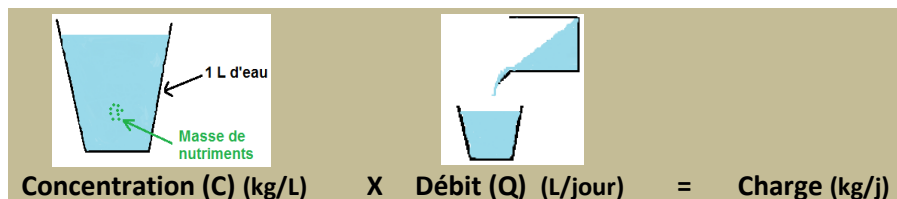
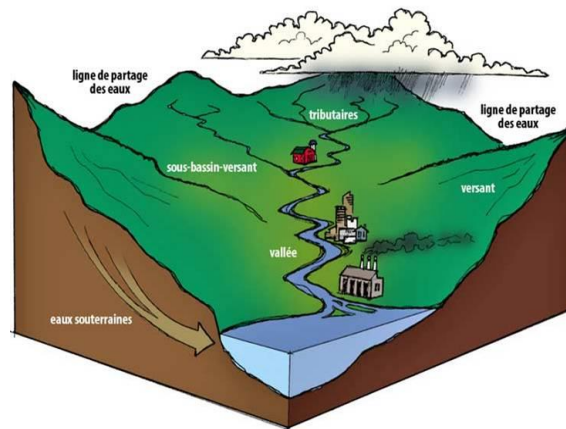


Figure 5 : Calcul de la charge (kg/j) de nutriments apportés par un ruisseau en une journée

Le bassin versant, les apports en nutriments et les bilans de nutriments

BASSIN VERSANT

Le bassin versant est l'ensemble du territoire dont **toutes les eaux se déversent dans un même lac** (ou un même fleuve, etc.; Figure 6). Ce territoire est délimité par le relief : la goutte d'eau qui tombe en haut d'une montagne peut ruisseler jusqu'au lac mais, si elle tombe d'un autre versant de la montagne, elle se retrouvera dans un autre cours d'eau si ce versant fait partie d'un autre bassin versant. Un bassin versant est caractérisé par sa surface, sa pente, la nature du sol, sa végétation, ainsi que par la présence d'activités humaines (habitations, agriculture, industries). Un bassin versant se mesure en kilomètres carrés (km²).



McMeekin et al, 2008 (Image tirée de © Canard Illimité 2008)

Figure 6 : Le bassin versant d'un lac

APPORTS EXTERNES DE NUTRIMENTS

Les apports externes désignent l'ensemble du matériel (nutriments, MES, algues, etc.) qui arrive du bassin versant dans un plan d'eau. Ces apports peuvent être atmosphériques (poussières, substances chimiques) ou venir du bassin versant du cours d'eau. Lorsque possible, les apports externes d'un plan d'eau sont calculés en additionnant le matériel apportés par les ruisseaux, les eaux souterraines, les eaux de ruissellement qui se déversent dans le plan d'eau, ainsi que l'eau de pluie qui y tombe directement.

APPORTS INTERNES DE NUTRIMENTS

Au fil des ans, dans un lac, les apports en nutriments, incluant ceux provenant des activités humaines, s'accumulent dans les **sédiments**. Quand ces sédiments deviennent très chargés et saturés en phosphore, dans certaines conditions ce phosphore peut être libéré (*relargué*) des sédiments vers la colonne d'eau. C'est surtout le cas lorsqu'il y a un manque d'oxygène au fond du lac, par exemple dans le cas des lacs stratifiés en plein été, lorsque les eaux ne sont pas brassées.

Ainsi, les **apports internes** correspondent au phosphore qui est libéré des sédiments et qui est remis en circulation dans l'eau, quand les conditions sont réunies. Dans certains cas, ce relargage peut être la principale source de phosphore, pour la croissance des algues présentes dans le lac.

BILAN DES NUTRIMENTS

Dans le cadre de la gestion d'un plan d'eau, surtout s'il subit des efflorescences d'algues ou de plantes aquatiques, il est important de savoir si ce sont les apports externes ou les apports internes qui alimentent ces algues. Toutefois, mesurer la quantité de nutriments relâchés par les sédiments demande un investissement en temps et en ressources relativement important. Une autre approche est celle du calcul du **bilan des nutriments**¹.

Suivant le concept de bilan des nutriments, un lac est défini comme une boîte noire : on y calcule le bilan d'un nutriment en le mesurant, à un temps donné, à l'entrée et à la sortie de la boîte noire, peu importe ce qui se passe dans cette boîte (Figure 7).

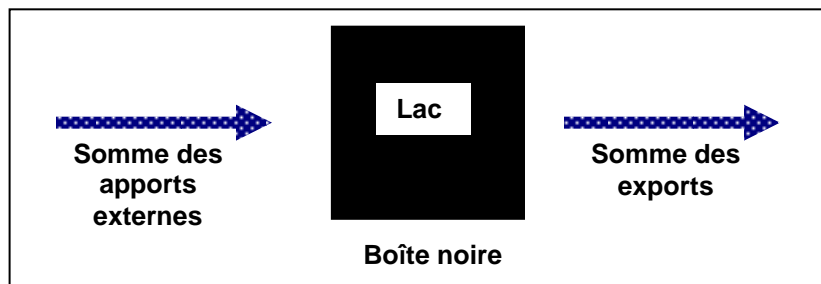


Figure 7 : Le calcul du bilan de nutriments : une boîte noire

Le calcul du bilan de nutriments nécessite de mesurer, pendant au moins une année complète, les nutriments apportés par les sources externes, afin de calculer la **Somme des apports externes** (Σ apports), ainsi que les nutriments qui sortent du lac par sa ou ses décharges, pour calculer la **Somme des exports** (Σ exports).

Prenons pour exemple le phosphore comme nutriment :

Lorsque la Σ apports de phosphore au lac est **supérieure à la Σ exports** de phosphore => ceci implique qu'une partie du phosphore apporté au lac y est retenue. Le lac agit alors comme un *puits* de phosphore même si, dans les faits, le phosphore pourra être absorbé par les algues présentes et ne se déposera donc pas nécessairement au fond du lac.

Si la Σ apports est **inférieure à la Σ exports** => ceci suggère fortement qu'une partie du phosphore qui sort du lac ne vient pas des apports externes mais plutôt des sédiments du lac. Le lac est alors considéré comme une *source* de phosphore pour le territoire en aval, mais aussi pour les algues dans le lac.

Le calcul du bilan d'un nutriment se comprend ainsi :

Si Σ apports nutriment > Σ exports nutriment => nutriment retenu => charge nette positive = le lac est un puits du nutriment

Si Σ apports nutriment < Σ exports nutriment => nutriment sorti du lac => charge nette négative = le lac est une source du nutriment

¹ Voir le Cahier 3

En conditions naturelles, **il est normal que les nutriments apportés à un lac par ses tributaires demeurent dans le lac**, et que le calcul du bilan conduise au statut de *puits* pour un lac (Valentyne, 1978). Ce nutriment, surtout si c'est du phosphore, alimentera les algues, lesquelles alimenteront le zooplancton et, ainsi, sera soutenue toute la chaîne alimentaire aquatique.

Toutefois, le fait qu'un lac exporte plus de nutriment, notamment du phosphore, qu'il en reçoit des apports externes indique un **déséquilibre**, souvent produit par les activités humaines (voir plus loin Lac eutrophe). Ceci indique que, au fil des ans, les sédiments du lac se sont enrichis en phosphore, à cause des perturbations dans son bassin versant. Quand les **sédiments** sont très chargés, et surtout lorsqu'il ya un manque d'oxygène au fond de l'eau, le phosphore se libère en grandes quantités vers la **colonne d'eau**, alimentant ainsi les algues et, notamment, les cyanobactéries qui vivent plus près des sédiments que les autres algues. C'est le cas notamment en plein été, lorsque les eaux ne se brassent pas.

Il est toutefois important de signaler que, si le calcul du bilan des nutriments est un outil relativement rapide pour évaluer si un lac est un *puits* ou une *source* de ces nutriments, **cette approche ne fournit pas des résultats irréfutables**. En effet, les nutriments relargués par les sédiments peuvent être rapidement assimilés par les algues dans le lac. Dans ce cas, il y aura peu de nutriments rejetés par la décharge. Une telle situation ferait en sorte que le calcul du bilan conduirait à caractériser le lac comme un *puits*, alors qu'en réalité, les sédiments du lac pourraient être la principale *source* de phosphore pour les algues, sans que le calcul du bilan le mette en lumière.

L'eutrophisation et les statuts trophiques des lacs

L'eutrophisation d'un lac est son passage du statut de lac oligotrophe ou mésotrophe à celui de lac eutrophe (Figures 8 et 9), par un enrichissement du lac en nutriments, qui conduit à une croissance importante d'algues et de macrophytes et, à moyen ou long terme, à son eutrophisation. On peut considérer que **l'eutrophisation est l'asphyxie des eaux...** Cette eutrophisation des lacs est fortement associée aux activités des humains, à l'usage d'engrais, de savons phosphatés, au déboisement et autres activités dans le bassin versant des lacs.

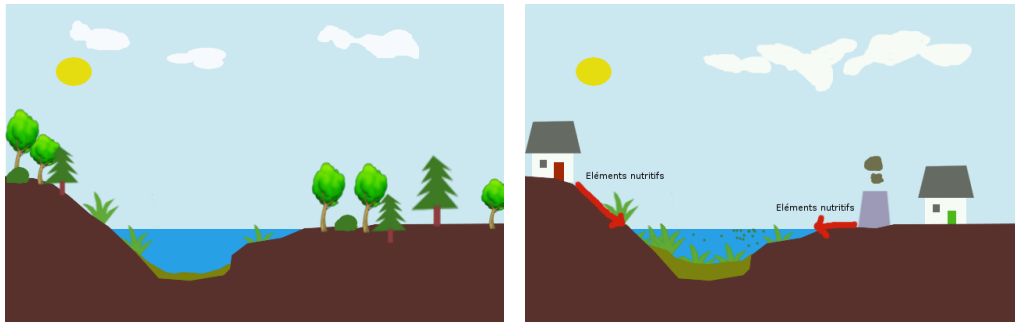


Figure 8 : Lac oligotrophe et lac eutrophe

Lac oligotrophe

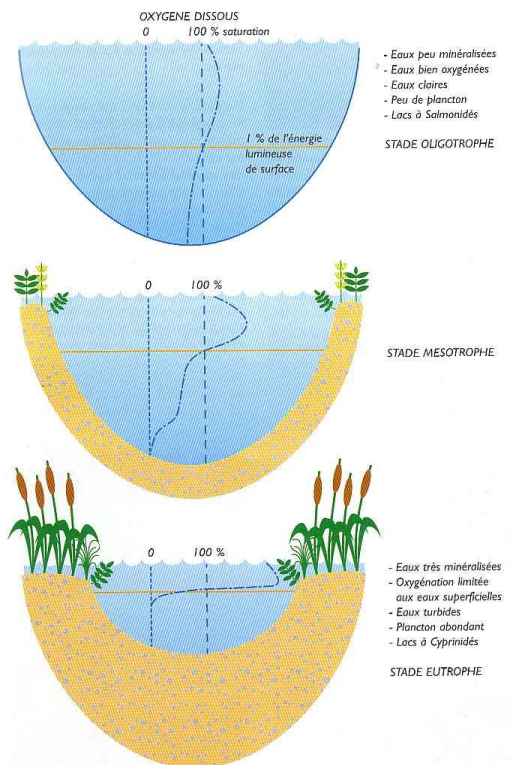
Un lac oligotrophe est un lac généralement peu perturbé par les activités humaines, très **pauvre en nutriments** et peu productif. La croissance des algues est limitée par le peu de phosphore présent et il n'y a pas de prolifération d'algues.

Lac mésotrophe

Dans un lac mésotrophe, la présence de **nutriments** est moyenne et donc, la croissance des algues aussi. C'est un lac intermédiaire entre oligotrophe et eutrophe.

Lac eutrophe

Un lac eutrophe est **très fertile et productif** en raison de **l'excès de nutriments**, qui favorisent la croissance des algues et des végétaux. Ceci se produit quand les apports très importants de phosphore provenant des activités humaines s'accumulent dans les **sédiments** au fil des ans. Le phosphore n'est plus un élément limitant, les algues peuvent proliférer et, en croissance épidémique, former des **efflorescences**. Même quand les sources externes de phosphore sont contrôlées, le phosphore accumulé dans les sédiments peut mettre plusieurs années à diminuer.



▲ Les grandes étapes de l'évolution naturelle d'un écosystème lacustre : phénomène d'eutrophisation.

Caumont, 2010

Figure 9 : Schématisation de l'eutrophisation d'un lac

Classification trophique des lacs

Différentes organisations ont proposé des classifications du statut trophique des lacs. Le Tableau 1 présente celle du ministère de Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP). Les valeurs de référence retenues pour les grandes classes trophiques (ultra-oligotrophe, oligotrophe, mésotrophe, eutrophe et hyper-eutrophe) correspondent aux limites les plus reconnues et utilisées.

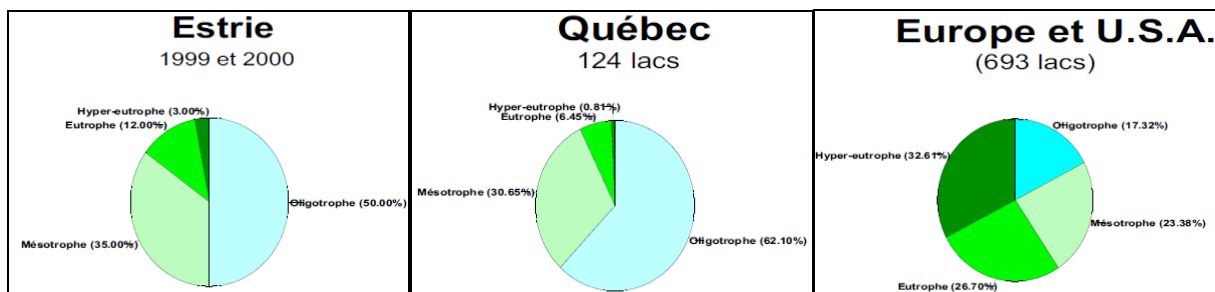
Dans ce tableau, les valeurs de chlorophylle a représente la biomasse des algues (μg) par litre d'eau du lac. La transparence de l'eau réfère à la profondeur de l'eau à laquelle on peut voir les détails d'un disque Secchi².

Tableau 1 : Classes des niveaux trophiques des lacs, avec les valeurs correspondantes de phosphore total, de chlorophylle a et de transparence de l'eau

Classes trophiques	Phosphore total ($\mu\text{g/l}$)	Chlorophylle a ($\mu\text{g/l}$)	Transparence de l'eau (m)
Classe principale <i>(transition)</i>	Moyenne *	Moyenne *	Moyenne*
Ultra-oligotrophe	< 4	< 1	> 12
Oligotrophe	4 - 10	1 - 3	12 - 5
<i>oligo-mésotrophe</i>	7 - 13	2,5 - 3,5	6 - 4
Mésotrophe	10 - 30	3 - 8	5 - 2,5
<i>méso-eutrophe</i>	20 - 35	6,5 - 10	3 - 2
Eutrophe	30 - 100	8 - 25	2,5 - 1
Hyper-eutrophe	> 100	> 25	< 1

* Les moyennes réfèrent à la moyenne estivale ou à la moyenne de la période libre de glace. La moyenne estivale correspond à la période durant laquelle il y a une stratification. MDDEP.

Une étude comparative du statut trophique des lacs de l'Estrie, du Québec, de l'Europe et les États-Unis (Yves Prairie, 2008) montre qu'il y a plus de lacs mésotrophes et eutrophes en l'Europe et aux États-Unis qu'au Québec et en Estrie (Figure 10).



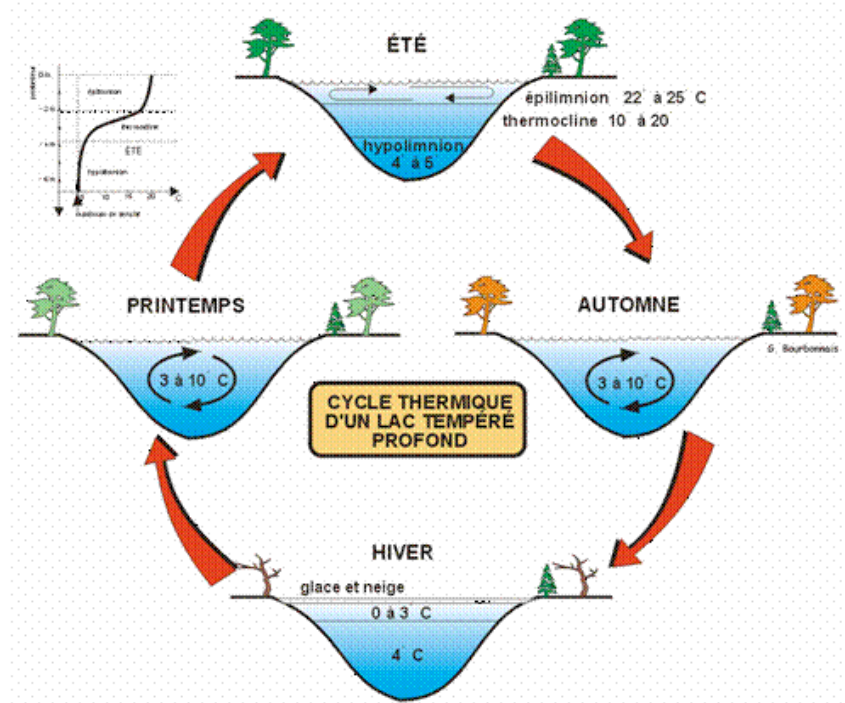
Prairie, 2008

Figure 10 : Classification trophique des lacs de l'Estrie, du Québec, et de l'Europe et États-Unis confondus

² Voir le Cahier 3 pour les détails sur la transparence de l'eau

Principaux phénomènes qui se produisent dans un lac

Le brassage de la colonne d'eau



Müller, 2010

Figure 11 : Schéma du processus de stratification et du brassage de la colonne d'eau dans un lac tempéré

Au début du printemps (Figure 11), quand le lac est encore gelé, l'eau de surface est à $\sim 0^{\circ}\text{C}$ et l'eau du fond est près de 4°C , température à laquelle la densité de l'eau est maximale³. Puis la température de l'air augmente et l'eau glacée en surface fond. La température de toute la colonne d'eau atteint $\sim 4^{\circ}\text{C}$ et, lorsque le vent atteint la surface du lac (un peu de vent suffit), une onde interne apparaît (Figure 12). L'eau se met alors en mouvement, ce qui provoque une perturbation des propriétés physiques : modifications de la température, etc., qui se propagent localement.

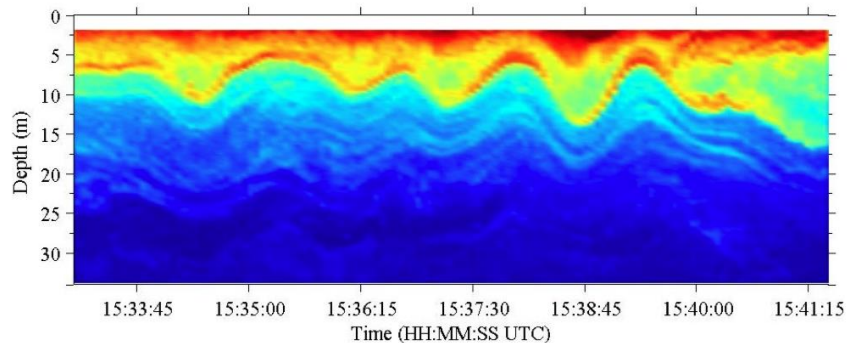


Figure 12 : Exemple d'onde interne illustrée par la température de l'eau

³ Voir à la page 3 du présent document, pour la densité de l'eau

C'est le **brassage printanier**. Ce brassage conduit à une uniformisation de la température sur toute la colonne d'eau ainsi qu'à une mise en circulation des **nutriments** et des algues accumulés au fond du lac (Figure 9).

La stratification thermique

Après le brassage printanier, la température de l'eau de surface continue à augmenter. Tant que les différences de température de l'eau entre la surface et le fond sont faibles, le brassage du lac peut continuer, sous l'effet du vent. Dès que ces différences de température augmentent, le brassage devient de plus en plus difficile, à cause de la différence de densité entre les couches d'eau. Il faut alors beaucoup d'énergie pour déplacer les masses d'eau.

Au fil de l'été, l'eau en surface se réchauffe : plus légère, elle flotte au-dessus des couches d'eau plus profondes, où l'eau est plus froide et donc plus lourde. Se forment alors, de la surface vers le fond, trois couches d'eau avec des températures différentes : **l'épilimnion**, en surface, **le métalimnion**, au milieu, et **l'hypolimnion**, au fond du lac.

C'est ce que l'on appelle la **stratification thermique de la colonne d'eau** du lac. La stabilité de la colonne d'eau dépend alors de l'intensité du vent et des orages ainsi que de leur fréquence. La Figure 13 présente la stratification de la colonne d'eau et ses 3 couches d'eau.

Épilimnion

Du printemps à l'automne, lors de la stratification, l'épilimnion est directement influencée par la température de l'air extérieur et présente les températures les plus chaudes de la colonne d'eau. La température y est uniforme car elle se mélange constamment.

Métalimnion

C'est dans le métalimnion qu'on retrouve la plus forte diminution de température de la colonne d'eau

Hypolimnion

La température de l'hypolimnion diminue légèrement en fonction de la profondeur. C'est la couche la plus froide en été et, en hiver, sa température est ~ 4°C.

Thermocline

La thermocline, quant à elle, est l'épaisseur de la colonne d'eau où la température diminue le plus rapidement. Cette zone se situe dans le métalimnion et **constitue une barrière qui empêche les échanges de gaz et nutriments** entre la couche de surface (épilimnion) et la couche du fond (hypolimnion).

La durée de la stratification peut être très différente d'un lac à l'autre. De plus, elle n'a pas lieu, dans certains lacs peu profonds.

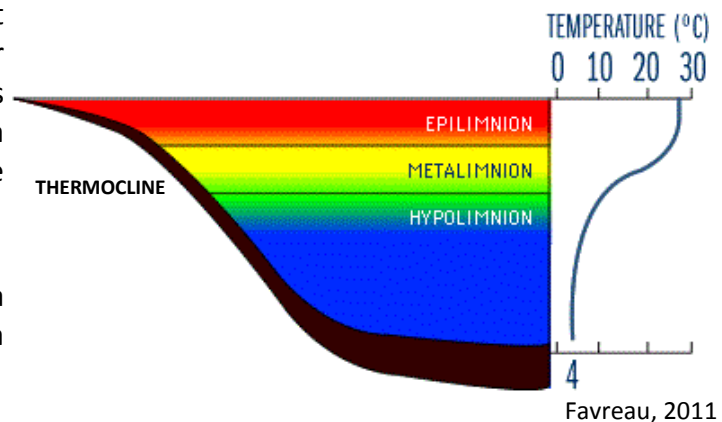


Figure 13 : Schéma des différentes couches d'un lac stratifié et du profil de température en été

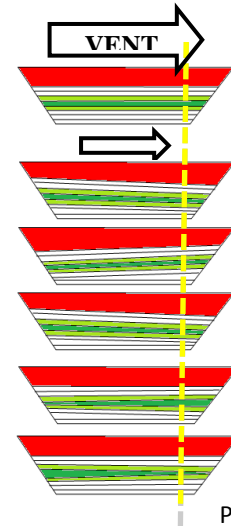
LE BRASSAGE DE LA COLONNE D'EAU À L'AUTOMNE ET LA STRATIFICATION EN HIVER

En pays tempérés, le brassage de la colonne d'eau arrive aussi à l'automne (Figure 11). Au début de cette saison, la stratification est bien installée mais, au fil des jours, l'air se refroidit et l'eau en surface se refroidit aussi. Elle devient plus lourde, s'enfonce et se mélange avec l'eau du métalimnion, puis avec celle de l'hypolimnion.

Ceci crée un mouvement dans l'eau, qui a pour conséquence un brassage total de la colonne d'eau, entraînant une **oscillation de la thermocline**, c'est-à-dire son rehaussement et son abaissement, tel qu'illustré à la figure ci-contre (Figure 14).

L'abaissement provoque l'échange entre les eaux de surface (épilimnion) et les eaux intermédiaires (métalimnion), ce qui entraîne les nutriments et les algues vers l'épilimnion.

On considère qu'il faut un déplacement de la thermocline d'au moins 1 mètre par jour pour qu'il y ait des effets significatifs sur l'entraînement des nutriments et des algues vers le haut.



Pannard et al, 2008

Figure 14 : Oscillations de la thermocline entraînées par le vent et le brassage de la colonne d'eau

Ces mouvements occasionnent ce qu'on appelle le **brassage automnal** de la colonne d'eau, qui uniformise la température des trois couches, défait la stratification et permet le mélange dans toute la colonne d'eau (Figure 15). Le brassage remet en circulation des nutriments dissous, des algues et autres particules accumulées au fond pendant la stratification.

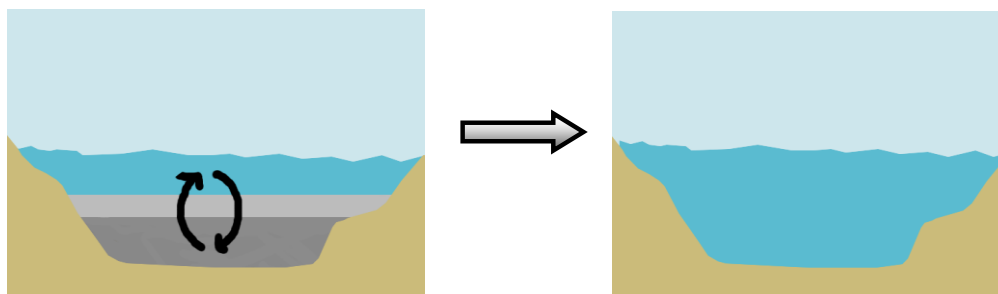


Figure 15 : Brassage de la colonne d'eau qui entraîne la disparition de la stratification

En pays tempérés ou froids, la stratification de la colonne d'eau peut aussi s'installer en hiver. La Figure 11 illustre bien ce phénomène. En hiver, avec le froid, la température de l'eau de surface descend graduellement à moins de 4 °C. L'eau de surface, plus légère à 0 °C qu'à 4 °C, reste en surface. Plus on descend en profondeur, plus la température de l'eau augmente, pour atteindre généralement 4°C au fond. Il peut alors se former deux couches de températures différentes : la couche de surface, plus froide, reste au-dessus, alors que l'eau à 4 °C, plus lourde, se retrouve au fond du lac. C'est la **stratification inverse**.

L'abaissement de la thermocline

Tel que dit précédemment, la thermocline est présente pendant la stratification d'un lac et elle constitue une barrière aux échanges entre l'épilimnion et l'hypolimnion. Au printemps et à l'automne, le brassage total de la colonne d'eau cause l'oscillation de la thermocline et finalement sa disparition, la température de l'eau devenant égale dans toute la colonne d'eau.

Toutefois un brassage partiel de la colonne d'eau peut aussi se produire en dehors de ces saisons, lors de conditions de très forts vents, créant ainsi une oscillation de la colonne d'eau.

La Figure 16 donne un exemple d'une telle situation. Dans les conditions initiales, la thermocline se situe à 4 mètres de profondeur. Un phénomène apportant assez d'énergie (orage, vent violent) pour entraîner un brassage, provoque un mouvement de l'eau de surface vers les eaux profondes, ce qui a pour effet d'abaisser la thermocline à 3 mètres (Figure 16 : conditions après l'abaissement). Le mouvement d'abaissement de la thermocline provoque l'échange des eaux de l'épilimnion avec les eaux du métalimnion, ce qui enrichit l'épilimnion en phosphore et en algues.

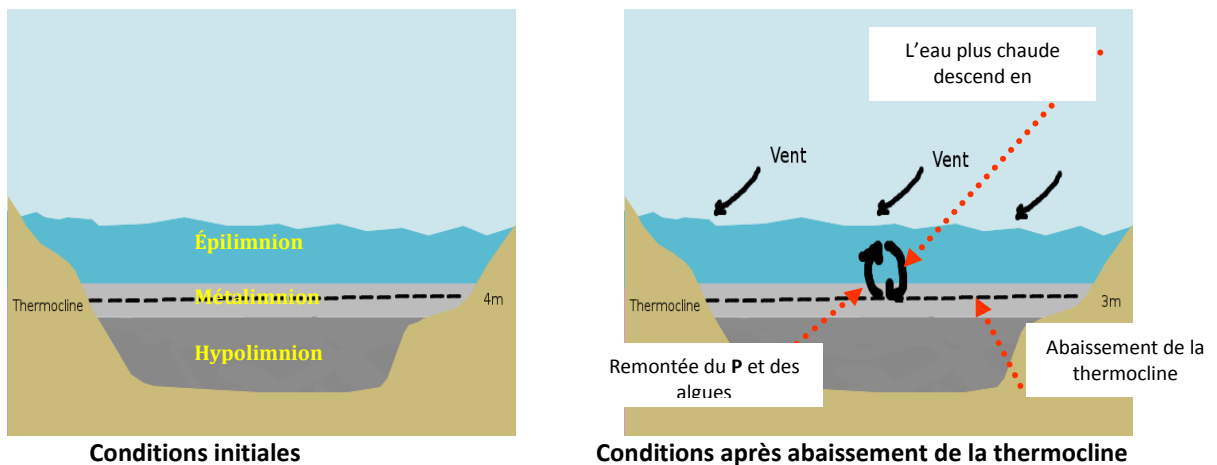


Figure 16. Abaissement de la thermocline suite à de forts vents ou orages

Les liens entre la stratification, l'oxygène dissout et le relargage du phosphore

Tel que dit précédemment, quand la stratification est installée, la thermocline empêche les échanges d'oxygène entre les eaux en surface et l'hypolimnion. Ce dernier **peut alors devenir anoxique**, c'est-à-dire avec très peu sinon pas du tout d'oxygène. Or, en situation d'anoxie, le phosphore accumulé dans les sédiments est beaucoup plus facilement libéré vers l'hypolimnion, alimentant ainsi les algues qui ont la capacité de survivre en profondeur⁴.

⁴ La section Lecture des graphiques du Cahier 3 présente les liens entre les profils de température, d'oxygène dissout et de la biomasse des algues.

LES ALGUES

Les **algues** sont des organismes végétaux constitués d'une seule cellule (unicellulaires) ou de plusieurs cellules (pluricellulaires), qui vivent isolées ou en colonies, en eau douce ou salée ainsi que dans les milieux très humides. En eau douce, sont généralement microscopiques.

Les algues possèdent de la chlorophylle (verte) et d'autres pigments de couleurs très variées. Elles peuvent présenter des formes très différentes : rondes, ovales, en forme de bâtonnet, de spirale ou de filament. Certaines peuvent se déplacer à l'aide d'un ou de plusieurs filaments mobiles appelés flagelles.

Les algues se nourrissent par photosynthèse et sont à la base de la chaîne alimentaire, servant de nourriture aux petits animaux aquatiques, mangés à leur tour par des poissons ou mammifères marins. Elles ont besoin d'azote, de phosphore, de carbone et de lumière pour croître. Quelques classes d'algues, comme les diatomées, ont aussi besoin de silice.

EFFLORESCENCES OU FLEURS D'EAU (*BLOOM EN ANGLAIS*)

Les efflorescences se forment lorsque les algues croissent en grande quantité, et se rassemblent à la surface de l'eau. L'augmentation en nutriments favorise l'apparition d'efflorescences, mais d'autres facteurs tels la stabilité hydrodynamique, la température, la lumière, la pression des prédateurs, et les variations des rapports azote/phosphore peuvent intervenir et influencer la composition spécifique de l'efflorescence

CHLOROPHYLLE

La chlorophylle est un pigment contenu dans les végétaux qui est responsable de leur couleur verte. Il a pour fonction d'absorber la lumière nécessaire à la **photosynthèse**.

La photosynthèse

La photosynthèse est une réaction chimique qui permet à tous les végétaux de se nourrir (Figure 17). Lors de ce processus, les organismes transforment les **éléments nutritifs** et le gaz carbonique (CO_2) en matière organique (sucres, protéines, lipides). Pour réaliser cette transformation, les végétaux utilisent l'énergie de la lumière, qu'ils captent à l'aide d'un pigment de couleur verte appelé **chlorophylle**. Pendant la photosynthèse, le végétal rejette de l'oxygène (O_2).

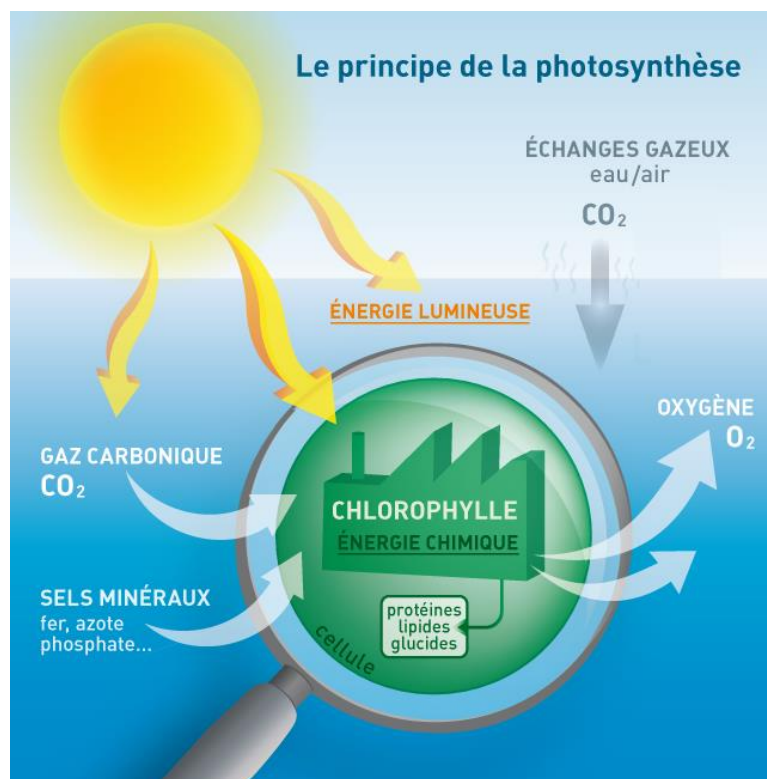


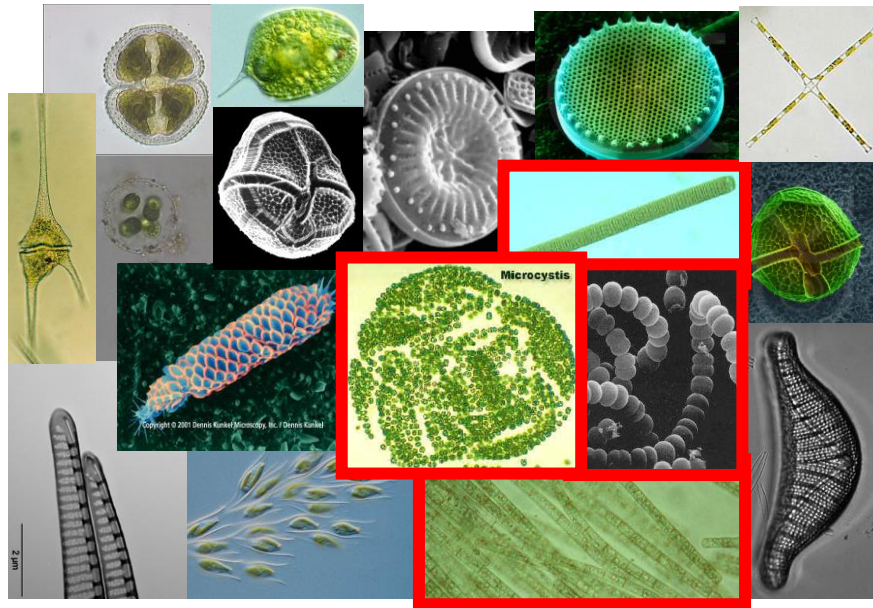
Figure 17 : Schéma général de la photosynthèse des algues

Le rapport de Redfield

Dans les tissus des algues, le rapport de la quantité de **carbone** *versus* la quantité d'**azote** *versus* la quantité de **phosphore** est de 106 : 16 : 1. Ce rapport est appelé **Rapport de Redfield**. Il signifie que les algues assimilent l'azote et le phosphore selon un rapport de 16/1, c'est-à-dire qu'elles ont besoin de 16 fois plus d'azote que de phosphore. Le calcul de ce rapport dans un plan d'eau nous permet de connaître l'élément limitant de la croissance des algues.

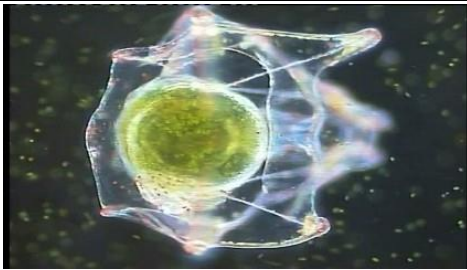
- des valeurs de **N/P inférieures à 16** indiquent qu'il n'y a pas assez d'azote par rapport au phosphore pour permettre la croissance des algues. Dans ce cas, l'azote est limitant.
- des valeurs de **N/P supérieures à 16** indiquent qu'il n'y a pas assez de phosphore par rapport au phosphore pour permettre la croissance des algues. Dans ce cas, le phosphore est limitant.

Les grands groupes d'algues en eau douce



Pannard et al, 2008.

Dans les lacs, il existe une grande diversité de microalgues. Voici les grands groupes qu'on y retrouve.



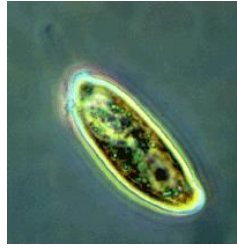
Les Chlorophycées

Appelées **algues vertes** car elles contiennent beaucoup plus de chlorophylle que d'autres pigments, ces algues sont unicellulaires ou pluricellulaires, vivent en eaux douces ou marines. Elles sont de formes et de tailles très variables (de 1 à plus de 100 μm), peuvent avoir 2 flagelles pour se déplacer, rester en surface, flotter ou vivre attachées aux roches ou aux plantes aquatiques.



Les Chrysophycées

Appelées **algues dorées** à cause de leur couleur jaune à brunâtre, ces algues sont unicellulaires ou forment des colonies des formes très variables. Elles mesurent de 2 à plus de 50 μm et quelques espèces ont 2 flagelles. Plus abondantes dans les lacs oligotrophes, elles vivent souvent dans le littoral.



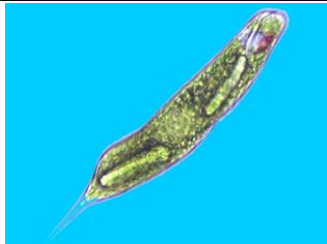
Les Cryptophycées

Ces algues sont de couleur brune, bleue, verte ou rouge, selon le pigment dominant, et mesurent entre 3 et 50 μm . Elles sont munies de flagelles pour se déplacer, et peuvent vivre sur toute la colonne d'eau, même en profondeur si l'oxygène est peu abondant.



Les Diatomées

Ces algues sont de couleurs jaune et brune, proches des algues dorées mais avec une enveloppe externe dure formée de silice (frustule). Elles vivent seules, réunies en filaments ou accrochées à des plantes ou à des coquillages grâce à des valves.



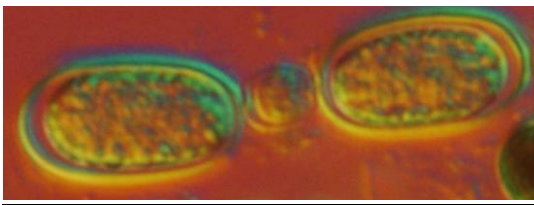
Les Euglénophycées

Ces algues unicellulaires sont dotées de 2 flagelles. On les rencontre fréquemment dans les eaux polluées. Elles sont de forme allongée et mesurent environ 50 μm de long et 12 μm de large.



Les Dinophycées ou dinoflagellés

Ces algues ont 2 flagelles perpendiculaires et une enveloppe rigide formée de plaques de cellulose réunies par des sutures. Elles vivent solitaires ou en colonies et mesurent entre 50 et plus de 100 μm . Elles sont plus abondantes dans l'eau salée, où elles produisent les marées rouges toxiques.



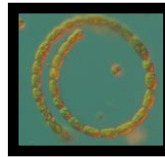
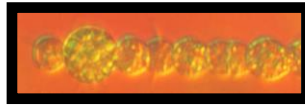
Les Cyanophycées ou cyanobactéries

Ces algues, appelées **algues bleu-vert** en raison du mélange des couleurs de leurs nombreux pigments, sont les premiers organismes apparus sur terre, il y a plus de 3 milliards d'années. Elles ont fortement contribué à l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène et donc à la vie sur terre. Très bien adaptées aux environnements extrêmes (des pôles aux déserts), on les trouve partout où il y a de l'eau, froide ou chaude, et dans la glace. On dénombre actuellement environ 3 500 espèces dont un petit nombre peuvent être toxiques. Certaines espèces, en conditions favorable c'est-à-dire lorsqu'il y a beaucoup de nutriments disponibles, prolifèrent et peuvent former des **efflorescences** (blooms en anglais) en surface.

Figure 18 : Les grands groupes d'algues (Chlorophycées, Chrysophycées, Cryptophycées, Diatomées, Dinophycées, Euglénophycées, Cyanophycées)

Quelques formes de cyanobactéries

Forme «collier»



Forme «spaghetti»



Forme «boule»

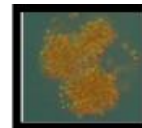
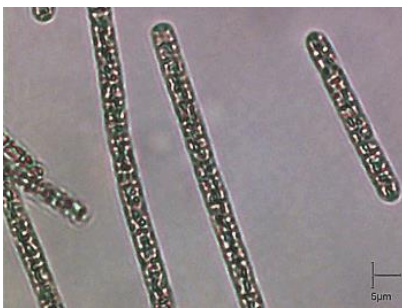


Figure 19 : Quelques formes de cyanobactéries

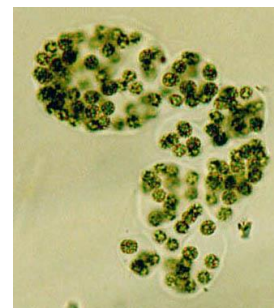
Quelques espèces de cyanobactéries du lac Bromont

La figure qui suit présente quelques espèces de cyanobactéries retrouvées au Lac Bromont au cours des années d'études qui s'y sont déroulées.



Planktothrix agardhii

Cyanobactérie filamenteuse de grande taille qui peut produire des toxines. Elle est capable d'effectuer la photosynthèse même lorsqu'il y a très peu de lumière. Elle est peu sensible aux eaux froides, ce qui lui permet de vivre au méta-hypolimnion si la concentration de nutriments est élevée. Elle ne forme pas de colonies, a une forme rectiligne et peut former des efflorescences gélatineuses de couleur turquoise.



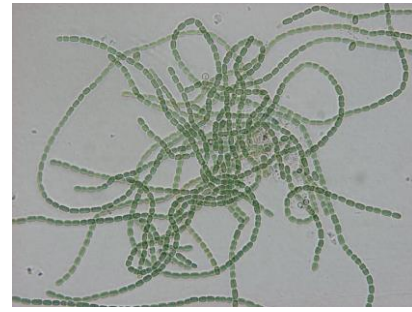
Microcystis wesenbergii

Cyanobactérie de forme sphérique ou en bâtonnet qui mesure environ 3-4 μm de long et 0,5 à 0,8 μm de large. Elles se rassemblent en colonies de grande taille (visible à l'œil nu), dont la cohésion est assurée par un mucilage. Elles forment fréquemment des blooms toxiques dans les lacs eutrophes.



Woronichinia naegeliana

Cyanobactérie qui vit en colonies plus ou moins sphériques, recouvertes d'une fine enveloppe transparente. Elle forme en surface des amas floconneux verts pâles.



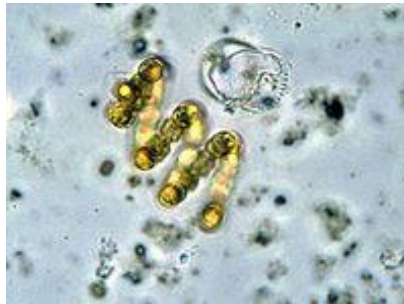
Aphanizomenon flos-aquae

Cyanobactérie en forme de filaments, capable de fixer l'azote. Elle est fréquemment présente lors des efflorescences automnales et peut être toxique.



Anabaena flos-aquae

Cyanobactérie unicellulaire qui vit en colonies filamenteuses. Elle a la capacité de fixer l'azote atmosphérique (N_2) pour la transformer en ammonium assimilable par ses cellules. Elle peut produire des toxines.



Anabaena spiroïdes



Anabaena solitaria

Figure 20 : Des espèces de cyanobactéries trouvées au lac Bromont

Quels sont les avantages qui permettent aux cyanobactéries de survivre à des conditions extrêmes, contrairement aux autres groupes?

- Dans un milieu pauvre en **azote**, elles ont la capacité de fixer l'azote contenu dans l'atmosphère pour le transformer en **azote ammoniacal**, ce que ne peuvent pas faire les autres espèces.
- Leur pigmentation diversifiée leur assure une grande efficacité photosynthétique et une capacité à soutenir un taux de croissance relativement élevé même à de faibles intensités lumineuses, comparativement à la majorité des autres algues. Ainsi, les autres algues ne survivant pas bien dans ces conditions, les cyanobactéries ont accès aux éléments nutritifs disponibles, puisqu'il y a peu de compétition de la part des autres algues.
- Elles possèdent des cavités remplies de gaz appelées vacuoles qui leur permettent de flotter et de se déplacer verticalement dans la **colonne d'eau**. Elles peuvent ainsi se positionner dans les zones où la luminosité est optimale pour leur développement, ou encore là où les nutriments sont accessibles.

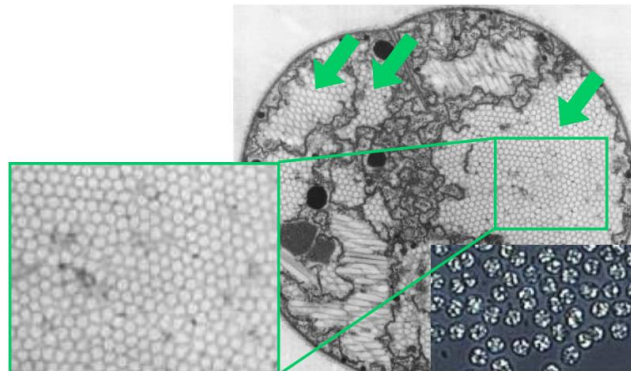
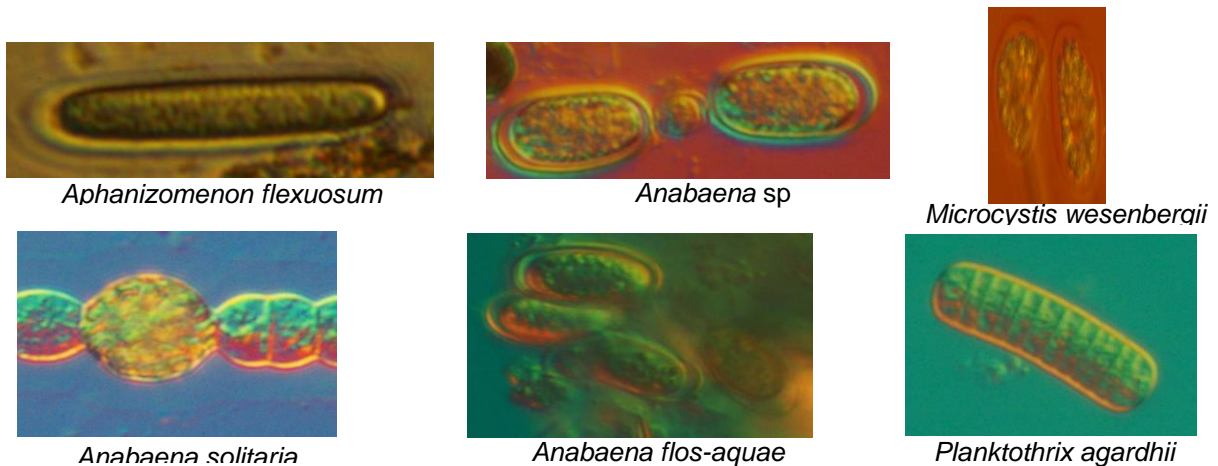


Figure 21 : Vacuoles de cyanobactéries remplies de gaz

- Elles ont la capacité d'emmagasiner de **phosphore** afin de le réutiliser plus tard. Par exemple, lorsqu'elles sont dans le fond du lac .en état de dormance, elles emmagasinent le phosphore relargué par les **sédiments**. Lorsqu'elles remontent vers les couches supérieures, moins riches en phosphore, pour accéder à la lumière, elles utilisent le phosphore qu'elles ont stocké pendant plusieurs générations.



Jourdain et al, 2008

Figure 22 : Des formes de cellules de résistance de cyanobactéries trouvées au lac Bromont

RÉFÉRENCES

- Caumont, Delphine. 2010. *Causes de l'eutrophisation du lac Bromont au Québec (Canada)*. Rapport de stage sous la direction de Dolores Planas dans le cadre de sa formation à l'IUT La Roche sur Yon, Département génie biologie.
- Favreau, Yvonnick. 2011. *Origines des nutriments responsables du développement des blooms de cyanobactéries nuisibles dans l'Estrie*. Rapport de stage sous la direction de Dolores Planas dans le cadre de sa formation à l'université de Rennes 1, France.
- McMeekin Kathleen, Planas, Dolores et Beisner, Beatrix, 2008. *Les Sources de phosphore du lac Bromont*. Colloque Préservons le lac Bromont, 14 juin 2008, Bromont, Québec.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) 2012. *Portrait de la qualité des eaux de surface au Québec 1999 - 2008*. ISBN 978-2-550-63649-6 (PDF) <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/portrait/eaux-surface1999-2008/chap3.pdf>.
- Müller, Talita. 2010. *Causes du développement des blooms de cyanobactéries nuisibles dans l'Estrie*. Rapport de stage sous la direction de Dolores Planas dans le cadre de sa formation à l'IUT La Roche sur Yon, Département génie biologie.
- Myriam Jourdain, Dolores Planas et Beatrix Beisner. 2008. *La lutte aux cyanobactéries : Il y a-t-il de la résistance dans mon lac?* Colloque Préservons le lac Bromont, 14 juin 2008, Bromont, Québec.
- Pannard, Alexandrine, Planas, Dolores, Beisner, Beatrix et Bird, David. 2008. *Les premiers sous-marins sont apparus il y a 3.8 milliards d'années* Colloque Préservons le lac Bromont, 14 juin 2008, Bromont, Québec.
- Prairie, Yves. 2008. *Utilisation des modèles d'eutrophisation pour une vigilance ciblée des cyanobactéries dans nos plans d'eau*. Colloque Les cyanobactéries: mieux connaître pour mieux gérer?. L'Institut Hydro-Québec en environnement, développement et société. 24 janvier 2008. Université Laval, Québec.