

## **2. Concepts généraux**

### **2.1 Eutrophisation**

#### **2.1.1 Définition, symptômes et conséquences**

L'eutrophisation réfère généralement au processus d'enrichissement en nutriments des milieux aquatiques. Elle se traduit par une croissance plus importante des algues et des macrophytes (Smith et al. 1999). Elle favorise également la prolifération des cyanobactéries souvent sous forme d'efflorescences (ou « blooms ») à la surface de l'eau (Smith 1990). L'augmentation de la productivité primaire dans les lacs entraîne une plus grande accumulation de matière organique à la surface des sédiments. Il en résulte une accentuation des processus de décomposition bactérienne et, par conséquent, une diminution de la concentration en oxygène dans l'hypolimnion. L'augmentation de l'abondance du phytoplancton diminue également la transparence de la colonne d'eau (Wetzel 2001). La pénétration de la lumière dans l'eau est donc réduite. Les changements associés à l'eutrophisation provoquent une foule de perturbations écologiques majeures au sein des écosystèmes aquatiques (Mason 1996; Dorgham 2014). De plus, plusieurs types de cyanobactéries produisent des toxines qui donnent un goût et/ou une odeur désagréable à l'eau et qui sont néfastes pour la santé humaine (Codd et al. 1999). C'est pourquoi l'eutrophisation représente souvent un frein majeur aux activités récréotouristiques, telles que la pêche, la baignade et le nautisme. De ce fait, elle peut également entraîner des conséquences économiques importantes (Dodds et al. 2009).

#### **2.1.2 Facteurs en cause**

Le phosphore (P) et l'azote (N) sont les nutriments clés à la base de la problématique d'eutrophisation. Ces éléments comptent parmi les constituants fondamentaux des êtres vivants et sont nécessaires à la productivité primaire. Or, leur concentration dans les environnements aquatiques est généralement beaucoup plus faible que les besoins des organismes photosynthétiques, ce qui limite leur développement et leur multiplication (Istvánovics 2009). En particulier, le phosphore est généralement le principal agent limitant

dans les lacs (Schindler 1977) et c'est pourquoi il joue un rôle crucial dans l'eutrophisation (Correll 1998).

L'eutrophisation est un processus normal dans le cycle de vie de la plupart des lacs et survient habituellement de manière graduelle sur une longue période de temps. Par ailleurs, le phosphore et l'azote sont naturellement présents dans l'environnement et sont transportés dans les lacs via l'atmosphère, les eaux souterraines et le ruissellement à la surface des sols, par exemple. Il arrive cependant que les activités humaines telles que les rejets d'eaux usées (source ponctuelle) et les activités agricoles (source diffuse) résultent en un accroissement massif des apports en nutriments. Par conséquent, les lacs subissent un enrichissement rapide et, donc, une eutrophisation accélérée (ou vieillissement prématuré). On parle alors d'eutrophisation culturelle (Smol 2008). Plus rarement, une eutrophisation accélérée peut également être entraînée par des facteurs naturels, tels que des changements climatiques (e.g., Brüchmann et Negendank 2004) ou des épisodes importants de feux de forêt (e.g., Hickman et al. 1990; Enache et Prairie 2000) ou de morts massives d'arbres (e.g., Boucherle et al. 1986; St. Jacques et al. 2000).

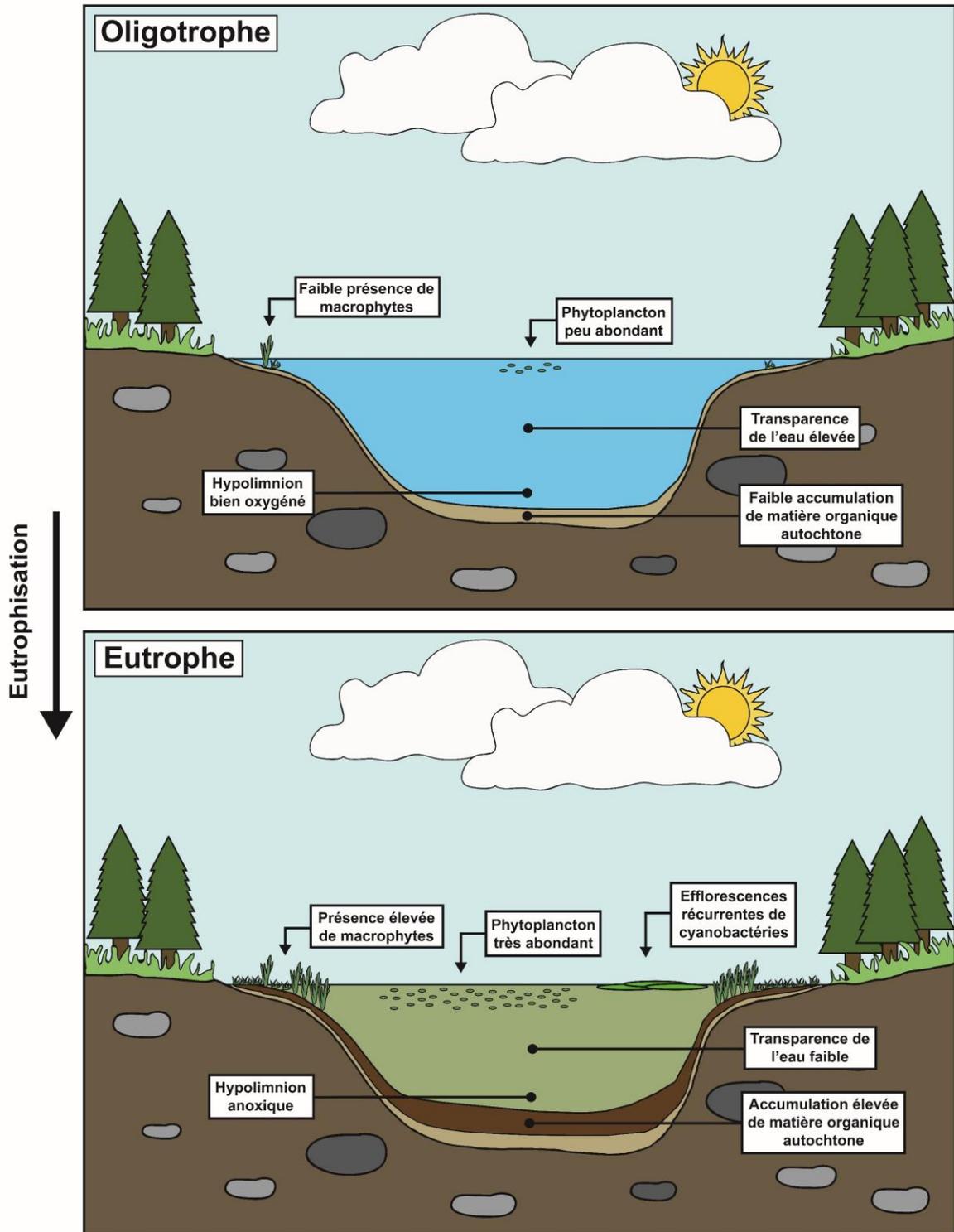
### **2.1.3 Classification trophique des lacs**

Les lacs sont généralement classés sous différentes catégories d'état trophique en fonction de leur concentration en phosphore total (PT) et en chlorophylle *a* (chl *a*) et de la profondeur observable du disque de Secchi, permettant d'estimer le degré de transparence de la colonne d'eau (OECD 1982). Le tableau 1 présente les intervalles de valeurs utilisés pour ces paramètres par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) afin de définir les différentes classes trophiques.

De manière générale, les lacs oligotrophes sont caractérisés par une faible concentration en nutriments et productivité primaire, un hypolimnion bien oxygéné et des eaux claires et diluées (Figure 1). À l'opposé, les lacs eutrophes possèdent une concentration en nutriments

**Tableau 1.** Classes trophiques des lacs selon les intervalles de valeurs utilisés par le MDDELCC (2018) pour les paramètres de concentration en phosphore totale et en chlorophylle *a* de l'eau et de profondeur observable du disque de Secchi (m). Les valeurs réfèrent aux moyennes estivales (période de stratification thermique de la colonne d'eau).

Classes trophiques		Phosphore total (µg/L)	Chlorophylle <i>a</i> (µg/L)	Secchi (m)
Classe principale	Classe secondaire			
Ultra-oligotrophe		< 4	< 1	> 12
Oligotrophe		4 - 10	1 - 3	12 - 5
	Oligo-mésotrophe	7 - 13	2,5 - 3,5	6 - 4
Mésotrophe		10 - 30	3 - 8	5 - 2,5
	Méso-eutrophe	20 - 35	6,5 - 10	3 - 2
Eutrophe		30 - 100	8 - 25	2,5 - 1
Hyper-eutrophe		> 100	> 25	< 1



**Figure 1.** Représentation schématique de l'eutrophisation et des caractéristiques typiquement associées aux lacs oligotrophes et eutrophes.

et une productivité primaire élevées, un hypolimnion anoxique et des eaux turbides. Les lacs mésotrophes présentent des conditions intermédiaires entre ces deux états trophiques (Mason 1996; Schindler et Vallentyne 2008).

## **2.2 Paléolimnologie**

### **2.2.1 Principes théoriques**

Les sédiments des lacs sont formés de matériel allochtone et autochtone. La matière allochtone est produite à l'extérieur du lac et consiste, par exemple, en des particules érodées et transportées par les cours d'eau affluents ou en des poussières directement déposées via l'atmosphère. À l'inverse, la matière autochtone est formée à l'intérieur du lac et provient principalement de la décomposition des macrophytes, algues et autres organismes aquatiques et de la formation de précipités chimiques créés selon des processus naturels dans l'eau (O'Sullivan 2003; Smol 2008). Par conséquent, les caractéristiques des sédiments sont représentatives des conditions environnementales prédominantes au niveau du lac et de son bassin versant (Håkanson et Jansson 1983). Or, les milieux lacustres représentent généralement des environnements de faible énergie et sont donc favorables au dépôt et à l'accumulation temporelle des sédiments selon le principe de superposition des couches stipulant que pour une séquence sédimentaire non perturbée, les sédiments en profondeur sont plus vieux et ceux en surface plus récents (Wetzel 2001; Barker 2009). En étudiant les archives sédimentaires, il est donc possible de reconstituer l'évolution temporelle d'un plan d'eau et de son milieu environnant.

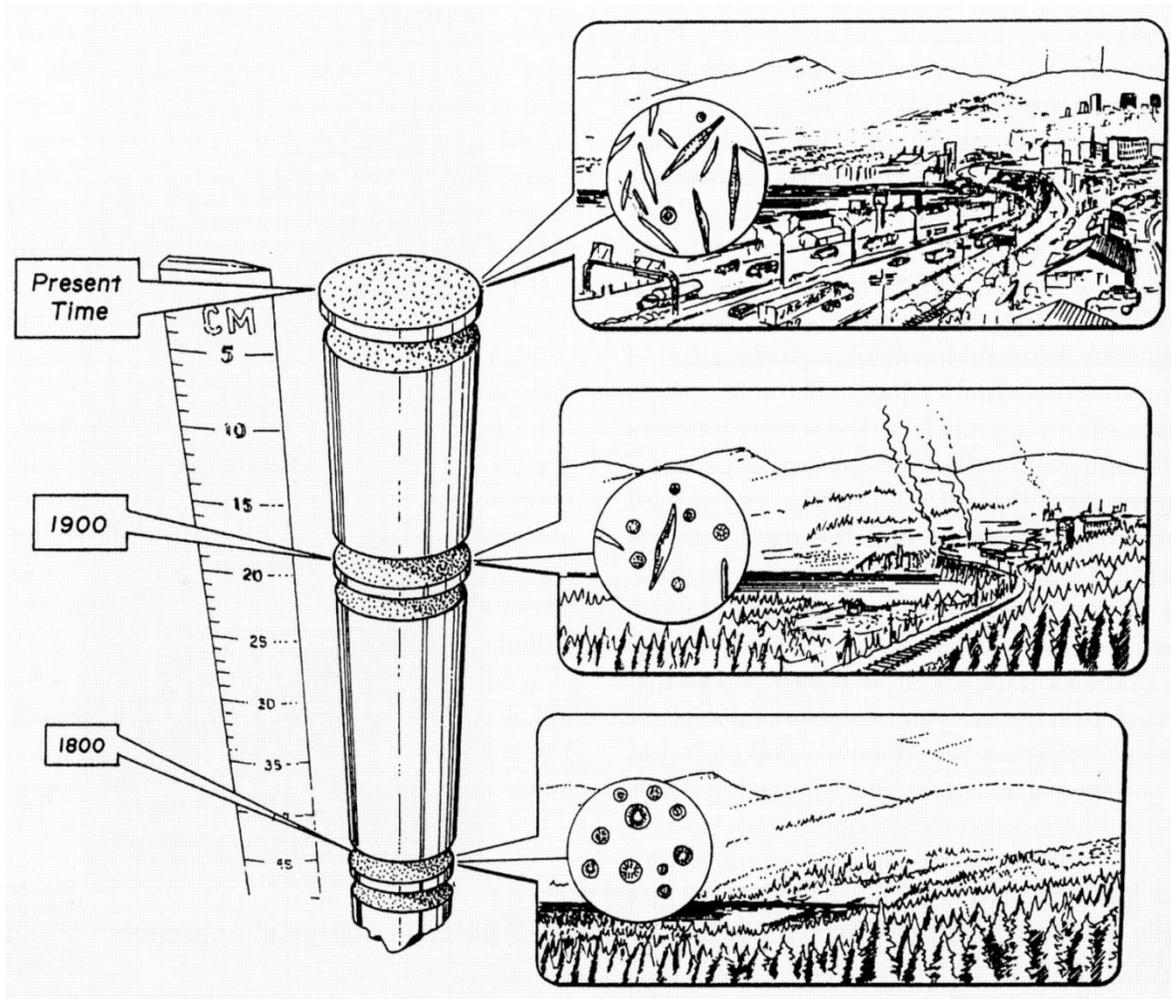
La paléolimnologie se base sur ces principes afin de retracer, par exemple, les changements climatiques historiques régionaux et planétaires, ou encore l'historique de la pollution dans certains milieux lacustres (Cohen 2003; Smol 2008). Elle a notamment permis de mettre en évidence à plusieurs reprises l'impact des activités humaines, telles que les rejets d'eaux usées (e.g., Levine et al. 2012), la déforestation et les activités agricoles (e.g., Pan et Brugam 1997), ainsi que les activités industrielles (e.g., Guilizzoni et al. 2001) et minières (e.g., Kerfoot et al. 1999) sur l'évolution de la qualité de l'eau des lacs. L'approche paléolimnologique consiste typiquement à prélever une ou plusieurs carottes de sédiments

au fond d'un lac et à étudier les propriétés physiques, géochimiques et biologiques des différentes couches. Les sédiments en profondeur reflètent son état passé, alors que les sédiments en surface sont représentatifs de sa condition récente (Figure 2). La chronologie de la séquence sédimentaire peut être établie de manière précise à l'aide de diverses méthodes de datation (Last et Smol 2001).

### **2.2.2 Indicateurs physiques**

La variation de la couleur du matériel sédimentaire peut fournir un premier aperçu de structures et de zones stratigraphiques importantes dans une carotte de sédiments. La teinte des sédiments est généralement représentative du contenu en matière organique d'un échantillon (e.g., Soiniemi 1972), mais peut également indiquer des différences au niveau de la teneur en carbonate, de la concentration en fer ou de l'état d'oxydoréduction, notamment (Kemp et al. 2001). L'identification des horizons clés est souvent facilitée ou confirmée à l'aide de mesures quantitatives de la variation du contenu en eau et en matière organique des sédiments basées sur des méthodes physiques d'analyse (séchage et combustion).

Le contenu en eau des sédiments varie verticalement dans un lac en fonction du degré de compaction, mais peut aussi être influencé par différents facteurs, tels que la nature du matériel sédimentaire, ainsi que les taux de sédimentation et niveaux de bioturbation actuels et passés (Håkanson et Jansson 1983). La variation du contenu en matière organique dans une carotte de sédiments est un paramètre important et peut indiquer plusieurs modifications dans la condition historique d'un lac et de son bassin versant. Elle peut, notamment, suggérer des changements évolutifs au niveau de la productivité primaire de l'écosystème. En effet, la plus importante source de matière organique dans les lacs provient souvent de la mort du phytoplancton, bien que les débris organiques en provenance du bassin versant peuvent aussi apporter une contribution importante (Meyers 1997). Le pourcentage de matière organique est également influencé par la quantité de matériel minéral entrant dans le lac (Rowan et al. 1992) et peut donc indiquer une plus forte érosion au niveau des berges ou du bassin versant, par exemple (e.g., Almquist-Jacobson et al. 1992; Brown et al. 2000).



**Figure 2.** Représentation schématique de l'approche paléolimnologique. Les tranches de sédiments prélevées à différents niveaux de profondeur sont caractérisées par des indicateurs biologiques représentatifs des conditions environnementales actuelles (« present time ») et anciennes dans le bassin versant (tiré de Smol 2008; utilisé avec permission).

La texture des sédiments, telle que définie par les caractéristiques des grains (taille, forme, arrangement) dont ils sont formés, est également un indicateur physique clé. Elle peut révéler des détails importants concernant la source du matériel sédimentaire, les mécanismes responsables de son transport et les conditions environnementales physiques, chimiques et limnologiques passées au site de déposition dans le lac, ainsi que paléoclimatiques et paléohydrologiques dans le bassin versant (Last 2001). Une augmentation de la taille des grains dans une carotte de sédiments peut, par exemple, indiquer une période de plus forte érosion dans le milieu environnant (e.g., Koinig et al. 2003). La densité, la composition minéralogique et la susceptibilité magnétique des sédiments sont d'autres indicateurs physiques qui sont également parfois utilisés afin d'approfondir les analyses paléolimnologiques.

### **2.2.3 Indicateurs géochimiques**

Divers indicateurs géochimiques peuvent fournir des détails supplémentaires concernant l'évolution des écosystèmes lacustres et de leur milieu environnant. En particulier, la variation de la concentration élémentaire de certains métaux dans les sédiments peut témoigner de modifications au niveau des processus érosifs ou encore de la condition des sols et du couvert végétal dans le bassin versant d'un lac. Elle peut également suggérer des changements au niveau de la productivité primaire d'un plan d'eau ou indiquer l'apparition de sources polluantes.

Les éléments détritiques, tels que le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le titane (Ti), proviennent de la dégradation de la roche mère où ils sont typiquement abondants. Ces éléments sont généralement peu altérés dans les environnements lacustres et peuvent donc être utilisés afin d'évaluer le lessivage, le développement des sols et l'érosion dans le bassin versant d'un lac (Engstrom et Wright 1984). L'intensité des processus érosifs varie selon les activités qui se déroulent sur un territoire et les caractéristiques du sol et de la végétation qui le recouvre. Un sol mature et couvert résultera en un transport plus faible d'éléments détritiques vers le lac. À l'inverse, un sol exposé permettra une plus grande érosion et engendrera des apports plus élevés de métaux dans l'eau et les sédiments.

Une augmentation de la concentration de silicium (Si) et d'aluminium (Al) peut également être indicatrice d'une plus grande érosion (Cohen 2003). Cependant, une bonne proportion du silicium retrouvé dans les sédiments a plutôt une origine biogénique, c'est-à-dire qu'il provient d'organismes vivants tels que les diatomées, les chrysophycées et les éponges (voir section 2.2.4). C'est pourquoi celui-ci peut également être un indicateur de la productivité primaire (Croudace et al. 2006). Par ailleurs, l'abondance de l'aluminium dans les sédiments est également en partie dépendante de l'acidité de l'eau alors que la solubilité de cet élément augmente considérablement à un pH inférieur à 5 (Wetzel 2001). Une variation de la concentration de l'aluminium dans les sédiments peut donc aussi être indicatrice de modifications importantes au niveau de l'acidité de l'eau (Boyle 1994).

Le fer (Fe) et le manganèse (Mn) sont deux autres éléments très importants en paléolimnologie et peuvent témoigner de changements au niveau du potentiel d'oxydoréduction d'un lac ou du type de végétation présente dans son bassin versant. Le manganèse et, encore davantage, le fer sont très peu solubles en conditions oxydantes. Ils auront donc tendance à s'accumuler dans les sédiments de lacs bien oxygénés. Cependant, au fur et à mesure qu'un lac s'enrichit en nutriments et progresse vers un état trophique supérieur, la concentration en oxygène à l'interface des sédiments diminue et, par conséquent, le fer et le manganèse s'accumulent plus difficilement dans les sédiments où ils sont même libérés, puis dissous dans l'eau (Wetzel 2001). La variation de leur concentration et de leur ratio (Fe/Mn) dans les sédiments peut donc potentiellement s'avérer un outil intéressant afin de documenter l'évolution de l'état trophique d'un lac (Smol 2008). Par contre, une transition vers de plus grandes concentrations en fer et en manganèse peut également être indicatrice de modifications au niveau du type de végétation dominante dans un bassin versant (e.g., Engstrom et Hansen 1985). Par exemple, les sols formés par une végétation de type coniférienne sont propices au développement d'un horizon organique épais. De tels sols riches sont acides et pauvres en oxygène et ont donc tendance à favoriser la mobilité du fer et du manganèse qui redeviennent insolubles lorsqu'ils atteignent les eaux d'un lac bien oxygéné (Engstrom et Wright 1984). Dans de telles conditions, leur concentration dans les sédiments est plus importante, mais peut être modifiée si des changements importants surviennent au niveau de la végétation dominante.

Les métaux lourds, tels que le chrome (Cr), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le plomb (Pb), présentent un intérêt particulier puisque leur grande abondance dans les sédiments d'un lac dérive souvent d'activités anthropiques (Håkanson et Jansson 1983). Les processus industriels et les rejets d'eaux usées et de déchets peuvent introduire des concentrations importantes de ces éléments dans l'eau. L'augmentation de la concentration en métaux lourds dans les sédiments de plusieurs lacs origine d'ailleurs du début de l'ère industrielle (e.g., Thomas 1972; Aston et al. 1973). Les activités minières sont également souvent reliées à une augmentation des métaux lourds dans les écosystèmes aquatiques (Förstner et Wittmann 1979).

Enfin, l'analyse de la concentration de certains éléments non métalliques peut également s'avérer pertinente. Mesurer directement la concentration en carbone (C) et en azote (N) des sédiments offre notamment un portrait plus précis de la variation de la concentration en matière organique dans une carotte de sédiments que les méthodes physiques d'analyse par combustion. De plus, l'analyse du ratio C/N permettra de mieux détecter les changements dans l'état trophique des lacs. Effectivement, le carbone et l'azote représentent des composantes fondamentales chez tous les organismes vivants. Ils peuvent cependant être retrouvés dans des proportions différentes. Le phytoplancton possède notamment un ratio C/N plus faible que les plantes vasculaires des milieux terrestres. En analysant les variations du ratio dans une séquence sédimentaire, il est donc possible d'évaluer les changements au niveau de la contribution relative de chaque source de matériel organique dans un lac (Meyers 2009). Par exemple, une diminution du ratio C/N dans les sédiments témoignera d'une plus grande contribution de la biomasse algale et suggérera donc une hausse de la productivité primaire (e.g., Antoniadou et al. 2011). D'autres indicateurs géochimiques, tels que la composition isotopique des sédiments, peuvent également être étudiés en parallèle aux autres analyses et fournir de plus amples détails sur l'évolution des écosystèmes lacustres.

#### **2.2.4 Indicateurs biologiques**

Les lacs représentent un riche milieu de vie qui inclut une multitude d'organismes de taille faible ou microscopique qui jouent un rôle clé au sein des écosystèmes. Plusieurs d'entre

eux croissent uniquement sous des conditions limnologiques spécifiques. À la fin de leur existence, les restes de certains demeurent préservés dans les sédiments lacustres. L'examen de ces archives offre un énorme potentiel afin de retracer l'évolution des conditions environnementales dominantes au sein d'un lac et de son bassin versant.

Les diatomées (classe Bacillariophyceae) sont des organismes photosynthétiques unicellulaires microscopiques formant une composante majeure des communautés d'algues d'eau douce. Elles sont abondantes, omniprésentes et diversifiées dans les environnements aquatiques où elles occupent des microhabitats spécifiques et se reproduisent rapidement. Pour ces raisons, elles forment de bons indicateurs des conditions écologiques au sein d'un écosystème et peuvent être utilisées afin d'étudier les variations de la qualité de l'eau et de l'environnement (Smol et Stoermer 2010). De plus, leur exosquelette silicieux est bien préservé dans les archives sédimentaires, ce qui permet leur utilisation afin de reconstituer les conditions limnologiques du passé (Battarbee et al. 2001). En particulier, les diatomées représentent de puissants indicateurs de l'eutrophisation (Hall et Smol 2010). Chaque taxon de diatomées peut être classé en fonction de ses préférences en lien avec l'état trophique des lacs (e.g., van Dam et al. 1994). En examinant la succession des taxons dominants préservés dans les sédiments, il est donc possible de documenter l'évolution de l'état trophique d'un lac. Plus encore, certains modèles basés sur la composition des assemblages de diatomées permettent de reconstituer quantitativement l'évolution de la concentration de phosphore total de l'eau (e.g., Hall et Smol 1996; Tremblay et al. 2014). La variation de la proportion d'espèces benthiques et planctoniques peut également être utilisée afin d'évaluer les modifications au niveau de la productivité primaire (e.g., Schelske et al. 1999). Par ailleurs, les diatomées peuvent aussi permettre la détection de changements au niveau de l'acidité de l'eau (Battarbee et al. 2010) ou encore de la disponibilité de microhabitats (e.g., Reavie et al. 1998), notamment.

Les chrysophycées sont un autre type d'algue silicieuse dont les kystes sont préservés dans les sédiments et peuvent être étudiés afin de caractériser l'évolution des bassins lacustres (Smol 1988). En particulier, le ratio de frustules de diatomées en rapport avec la concentration des kystes de chrysophycées peut s'avérer un bon indicateur d'eutrophisation

(Smol 1985). Les restes de plusieurs autres organismes, tels que les cladocères, les chironomides et les éponges d'eau douce, de même que les pigments photosynthétiques préservés dans les sédiments, peuvent également être utilisés afin de procéder à des reconstitutions paléolimnologiques.