

le naturaliste canadien

LA SOCIÉTÉ PROVANCHER
D'HISTOIRE NATURELLE
DU CANADA

Revue de diffusion des connaissances en sciences naturelles et en environnement

Tiré à part

Impacts de l'activité minière et des eaux usées sur la santé du lac Dauriat à Schefferville : données paléolimnologiques

*Laurence Laperrière, Reinhard Pienitz, Marie-Andrée Fallu,
Sonja Hausmann et Derek Muir*

Volume 133, numéro 2 – Été 2009

Page 83-95

Impacts de l'activité minière et des eaux usées sur la santé du lac Dauriat à Schefferville : données paléolimnologiques

Laurence Laperrière, Reinhard Pienitz, Marie-Andrée Fallu, Sonja Hausmann et Derek Muir

Résumé

Des analyses qualitatives et quantitatives de diatomées fossiles et des éléments géochimiques préservés dans les sédiments du lac Dauriat (Québec subarctique) ont permis de reconstituer l'évolution de son état trophique et d'évaluer les impacts des activités minières et de l'expansion de la ville de Schefferville sur la qualité de l'eau du lac. La présence de taxons typiques de milieux pollués (p. ex. *Cyclotella choctawhatcheeana*, *Nitzschia gracilis*, *Nitzschia perminuta*) et le faible pourcentage de chrysophycées témoignent du statut d'eutrophie avancée du lac lors de l'apogée des activités minières et mettent en évidence l'influence néfaste des rejets de déchets municipaux sur la qualité de l'eau du lac Dauriat. Les éléments analysés dans les sédiments, notamment le fer, l'arsenic et le zinc, indiquent des concentrations maximales entre les années 1930 et 1960. Ces changements dans les sédiments reflètent trois époques distinctes dans l'histoire récente de cet écosystème : a) préminière (1882-1939) non perturbée, b) minière (1939-1977) perturbée avec eutrophisation (vieillessement) accélérée du lac, et c) postminière (1977-1999) avec un signe de récupération naturelle du système après l'installation d'une usine d'épuration des eaux usées en 1975 et la fermeture des mines en 1983, suivie de l'exode de la population. Malgré une tendance vers un retour aux conditions naturelles du lac, l'impact des perturbations anthropiques était encore présent 20 ans après la fermeture de la mine et la désertion de la ville.

Introduction

La construction de la ville de Schefferville a débuté au début des années 1950 dans le but de développer une des plus importantes mines de fer du Nord québécois (Canada) (Dufour, 1981; Dimroth, 1981). Avant, on y trouvait seulement la réserve amérindienne de Matimekosk et celle des Naskapis. C'est au cours de l'année 1954 que le chemin de fer reliant Sept-Îles à Schefferville fut terminé et que les travaux miniers démarrèrent (Dionne, 2005). Par contre, le début des activités de prospection minière et de forage, qui favorisent l'érosion des sols et le ruissellement des eaux, a précédé l'ouverture de la mine et la création de la ville.

Parallèlement à la construction d'un chemin de fer et l'ouverture des mines, la ville de Schefferville a subi une explosion démographique massive de sorte que sa population est passée de quelques centaines de personnes en 1954 à 4 129 habitants en 1979 (Choulik et Moore, 1992 : tiré de Archer, 1983). Jusqu'en 1975, on ne trouve aucun système d'épuration des eaux usées alors que ces dernières sont rejetées sans traitement dans le lac Dauriat, situé au cœur de la ville. L'année 1975 marque l'installation d'une usine de filtration des eaux usées. En 1981, à la suite d'une demande en fer devenue très faible, on ne compte plus que 2 700 résidents et, en 1989, il n'en reste que 600 (Choulik et Moore, 1992 : tiré de Archer, 1983). C'est en 1983 que les mines ferment définitivement leurs portes.

La présente étude paléolimnologique du lac Dauriat permet de retracer l'histoire de la pollution et l'évolution accélérée du processus d'eutrophisation et, par conséquent,

le vieillissement de ce lac. Les diatomées (Bacillariophyceae) sont des algues unicellulaires composées d'une coquille siliceuse qui permet leur fossilisation dans les sédiments. La composition des assemblages de diatomées varie selon les modifications des conditions physiques et chimiques dans les lacs, ce qui en fait d'excellents bio-indicateurs de la qualité du milieu aquatique. Les assemblages de diatomées sont utilisés couramment afin de reconstituer l'évolution de la qualité de l'eau des écosystèmes lacustres (p. ex. Karst et Smol, 1998; Guilizzoni et collab., 2001; Saulnier-Talbot et collab., 2003), et plus spécifiquement pour déterminer le niveau trophique des lacs (p. ex. Anderson et collab., 1990; Hall et collab., 1997; Hausmann et collab., 2002; Pienitz et collab., 2006). Les chrysophycées (Chrysophyceae) sont aussi des algues siliceuses dont les restes sont préservés dans les sédiments. Le pourcentage de ces organismes par rapport

Laurence Laperrière a fait sa maîtrise sous la supervision du professeur Reinhard Pienitz au Laboratoire de paléocéologie aquatique du Centre d'études nordiques de l'Université Laval; elle travaille maintenant au Cégep François-Xavier-Garneau. Marie-Andrée Fallu a complété ses études doctorales sous la supervision du professeur Reinhard Pienitz au Centre d'études nordiques et occupe maintenant un poste d'agente de liaison scientifique à l'Université du Québec à Trois-Rivières alors que Sonja Hausmann faisait un stage postdoctoral au Centre d'études nordiques au moment de l'étude. Enfin, Derek Muir est chercheur au Laboratoire des essais environnementaux d'Environnement Canada à Burlington, ON.

Reinhard.Pienitz@cen.ulaval.ca

au nombre total de diatomées donne un indice du degré d'eutrophisation d'un lac (Smol, 1985); plus leur importance relative est grande, plus le vieillissement du lac est avancé.

Plusieurs études ont aussi tenté d'évaluer les impacts anthropiques de l'exploitation minière sur les écosystèmes aquatiques (p. ex. Kerfoot et collab., 1994, 1999). Dans la région de Schefferville, l'étude de Dubreuil (1981) avait pour but de reconstituer l'adaptation d'un cours d'eau affecté par les activités minières. Elle conclut que «... les caractéristiques physico-chimiques de l'eau du ruisseau Kata (situé à environ 13 km à l'ouest de Schefferville) sont apparemment revenues à la normale, en autant que la conductivité et les solides en suspension sont concernés. Cependant, il appert que la faune et la flore répondent beaucoup plus lentement à l'amélioration de la qualité de l'eau... ». L'étude de Hausmann et collab. (2002) montre que plus de 88 ans se sont écoulés pour que le lac Seebergsee, dans les Alpes suisses, atteigne à nouveau un état oligotrophe à la suite d'une période d'hypertrophie provoquée par l'utilisation excessive du pâturage et de fertilisants dans le bassin versant du lac.

Utilisant une approche multidisciplinaire (biostratigraphie et géochimie), la présente étude décrit l'impact et les conséquences des activités minières et de l'explosion démographique de la ville de Schefferville sur la qualité de l'eau et le statut trophique du lac Dauriat, en milieu boréal subarctique.

Site d'étude

Le lac Dauriat (54° 48' N; 66° 49' O) est situé à 550 m d'altitude a.d.n.m. au centre de la ville de Schefferville, au Québec nordique (figure 1). La superficie du lac est de 0,56 km² et sa profondeur maximale mesurée est de 4,5 m. Le temps de renouvellement de l'eau du lac est de 60 jours en hiver et de 2 jours pendant la période de fonte de la neige. (Drake et Freund, 1980). Comme l'accumulation de neige en hiver est élevée pour cette région, soit 330 cm, cela provoque un important volume d'eau de fonte au printemps (Drake et Freund, 1980). Selon la classification de Wetzel (2001) et l'étude menée par Choulik et Moore (1992), le lac Dauriat aurait été dans un état de mésotrophie avancée en 1992. Les concentrations de phosphore total et de chlorophylle *a* (Chl *a*) mesurées indiquent des valeurs plus faibles après 1975 (figure 2; Choulik et Moore, 1992).

Le lac Dauriat fait partie d'une chaîne de lacs soit, d'amont en aval, le lac Knob, le lac Dauriat, le lac Juin et le lac LaCosa, dont le drainage se fait du sud vers le nord (figure 1). Les bassins versants de cette région se drainent vers la baie d'Ungava, par la rivière Caniapiscou. Étant donné sa situation géographique, ce lac a servi d'égout à la ville de Schefferville pendant l'époque de l'extraction minière. Le lac Knob, situé en amont, représente quant à lui la source d'eau potable du village et a aussi été utilisé à des fins récréatives.

Géologiquement, Schefferville se situe dans la fosse du Labrador, sur le Bouclier canadien. La fosse du Labrador est située à l'ouest de la Province géologique de Churchill et aux

limites de la Province géologique du Supérieur. Le sous-sol y est constitué de roches sédimentaires peu métamorphisées et composées de calcaires et de dolomies de plate-forme qui sont riches en fer (Landry et Mercier, 1992). La géologie de la région de Schefferville se caractérise principalement par la présence de calcaires et l'abondance d'oxyde et hydroxyde de fer, dont l'hématite rouge, la limonite, et la goethite.

Le climat subarctique de la région de Schefferville est marqué par des hivers froids et des étés courts (Le grand Atlas du Canada et du monde, 2002). La température moyenne annuelle de Schefferville est de -5 °C, avec une précipitation annuelle moyenne de 793,6 mm, dont 415 cm sous forme de neige (Environnement Canada, 1993). La région possède une moyenne de 190 jours avec des températures maximums au-dessus de 0 °C (Environnement Canada, 1993).

La forêt ouverte (pessière à lichens) du domaine subarctique est répartie de façon continue et caractérise la végétation du bassin versant du lac Dauriat. On y trouve en majorité l'épinette noire (*Picea mariana*), mais aussi le pin gris (*Pinus banksiana*), le sapin baumier (*Abies balsamea*) et quelques arbres feuillus comme le bouleau pleureur (*Betula pendula*) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) (Environnement Canada, 2003).

Méthodes et Résultats

Carottage-lithostratigraphie

Le lac Dauriat a été carotté successivement les 24 et 27 avril 1999 à deux endroits séparés d'environ deux mètres l'un de l'autre. Les deux carottes ont été extraites à l'aide d'un carottier de type Kajak-Brinkhurst de 6,5 cm de diamètre. La première carotte (carotte A), d'une longueur de 41 cm, a été sous-échantillonnée au 1 cm et les sédiments ont été envoyés aux laboratoires d'Environnement Canada (Laboratoire national des essais environnementaux), à Burlington (Ontario), pour l'analyse des éléments chimiques. La deuxième carotte (carotte B) avait une longueur de 40 cm et elle a été échantillonnée au 0,5 cm et analysée au Laboratoire de paléoécologie aquatique de l'Université Laval (Québec).

De 40 cm à 33 cm de profondeur (carotte A), on observe des sédiments brun-ocre, avec une teinte devenant de plus en plus pâle vers le haut de la carotte. De 32,5 cm à 6 cm, la boue organique (gyttja) est noire et comprend de l'huile (visible lors de l'échantillonnage). De 6 cm à la surface, les sédiments sont brun-ocre avec une légère transition vers un brun plus foncé commençant à 5 cm.

Datation au ²¹⁰Pb

Dix-huit échantillons de la carotte B ont été séchés à 70 °C pendant 18 h et six parmi eux ont été envoyés au laboratoire du GEOTOP à l'Université de Montréal afin de mesurer la radioactivité rémanente des sédiments. Les échantillons envoyés sont représentatifs de niveaux où des changements avaient été observés dans les assemblages de diatomées. Le modèle de «Constant Rate of Supply (CRS)» de Binford (1990) a été utilisé pour calculer les taux de sédimentation.

La désintégration de l'activité du ^{210}Pb dans les sédiments en relation avec le taux de sédimentation est montrée dans la figure 3. L'âge de la base de la carotte A est estimé à 1882 AD. L'époque préminière (années 1882 à 1939) est

caractérisée par un taux de sédimentation constant, soit de $0,10\text{ g cm}^{-2}$ et d'une radioactivité plus faible, c'est-à-dire des valeurs comprises entre 3 et 6 dpm g^{-1} . Durant les années 1939 à 1977, correspondant à l'époque minière, le taux de sédimentation a plus que doublé, alors qu'il est passé de $0,13\text{ g cm}^{-2}$ à $0,28\text{ g cm}^{-2}$. Cette augmentation se fait de façon continue. La radioactivité se situe autour de 7 dpm g^{-1} . Le taux de sédimentation tend à diminuer de manière continue après 1977, date correspondant au début de l'époque postminière (1977 à 1999). Le taux passe du maximum de $0,28\text{ g cm}^{-2}$ en 1981 à $0,18\text{ g cm}^{-2}$ en 1999. Cette diminution s'accélère entre 1988 et 1999. L'activité du ^{210}Pb se situe entre 8 et $22\text{ dpm g}^{-1}\text{ cm}^{-2}$.

Perte-au-feu

Afin de déterminer le contenu en matière organique dans les sédiments du lac Dauriat, les échantillons de la carotte B ont été traités selon la méthode standard de la perte-au-feu de Dean (1974). Quarante échantillons ont été analysés, soit à chaque $0,5\text{ cm}$ de la carotte B. Les échantillons ont d'abord été chauffés à $100\text{ }^\circ\text{C}$ pendant 19 h. Ils ont ensuite été brûlés à $550\text{ }^\circ\text{C}$ pendant six heures.

De 40 cm à 32 cm (époque préminière; figure 4), le pourcentage de matière organique est resté presque constant à environ 7%. Parmi les trois époques, celle-ci se distingue par le contenu le plus faible. C'est dans les sédiments de l'époque minière (1939 à 1977; figure 4) que l'on trouve les valeurs de matière organique les plus élevées. À 31 cm , le contenu de matière organique est d'environ 9%, alors qu'il augmente rapidement par la suite, pour atteindre un maximum d'environ 32% à $20,5\text{ cm}$ de profondeur. L'époque postminière (1977 à 1999, figure 4) se caractérise par une diminution rapide de la matière

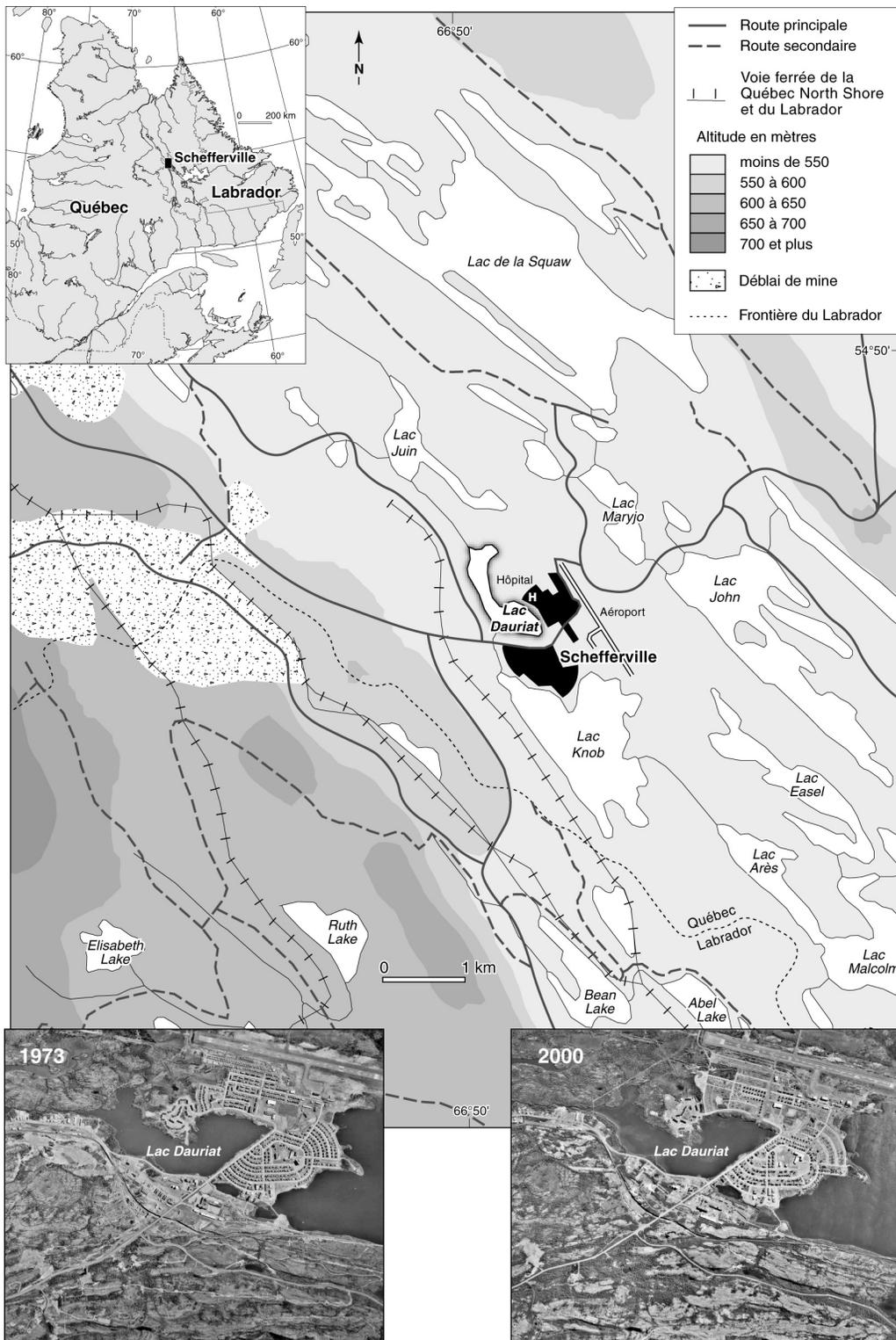
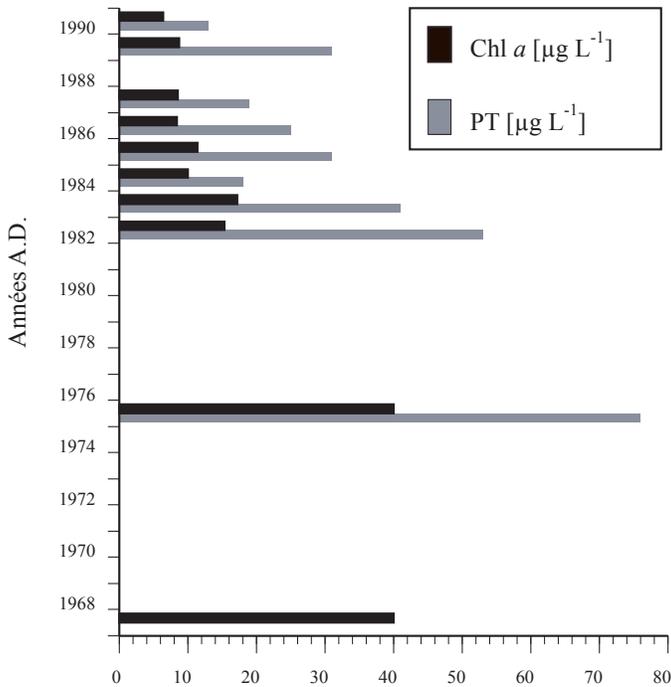


Figure 1. Carte topographique des environs de la ville de Schefferville et du lac Dauriat. Photographies aériennes de Schefferville (1973 et 2000) au 1 : 50 000 (approximativement). (Source : Ressources naturelles du Québec, Canada).



Concentrations de chlorophylle *a* (Chl *a*) et de phosphore total (PT)
Figure 2. Fluctuation des concentrations de phosphore total et de Chl *a* mesurées dans le lac Dauriat (modifié de Choulik et Moore, 1992).

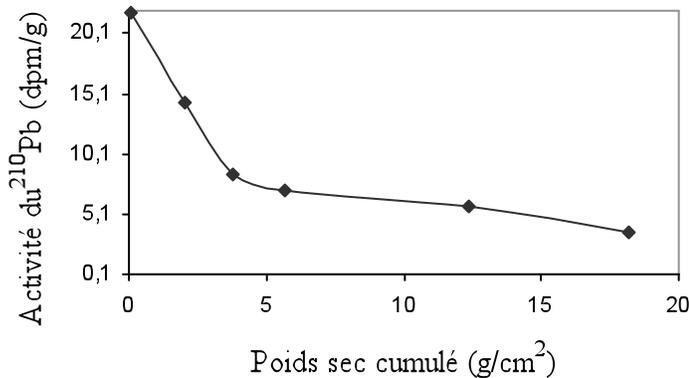


Figure 3. Désintégration de l'activité du ^{210}Pb en relation avec la profondeur dans la carotte sédimentaire du lac Dauriat.

organique entre 18 et 15 cm et ensuite par une diminution lente, mais soutenue, avec une alternance de petits pics et creux, variant entre 23 % et 15 %. Le contenu est plus élevé qu'à l'époque préminière et les concentrations les plus fortes se trouvent entre 18 et 17,5 cm.

Fossiles siliceux

Chaque échantillon a été traité avec un mélange (1 : 1) d'acide sulfurique et d'acide nitrique pendant 24 h. Les flacons ont été déposés dans un bain d'eau chaude (~ 80 °C) pendant deux heures et ont ensuite été rincés à l'eau distillée à chaque jour pendant une semaine afin d'atteindre le pH neutre de l'eau distillée. Les lames de microscope ont été

montées à l'aide de la résine Naphrax®. Quarante lames ont été préparées selon les méthodes standard (Pienitz et collab., 1995), et ce, à tous les centimètres. Finalement, le comptage des diatomées au microscope s'est fait à un grossissement de 1000X sous immersion d'huile. Un minimum de 500 valves a été identifié pour chaque lame. L'identification des espèces s'est principalement faite à partir des ouvrages de Krammer et Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, b) et de Fallu et collab. (2000). Un total de 168 espèces de diatomées a été identifié dans les sédiments de la carotte et les espèces les plus souvent notées sont présentées à l'appendice 1 et à la figure 8. Trois zones distinctes ont été définies dans les assemblages de diatomées selon la méthode de la partition optimale de la somme des écarts à la moyenne à l'aide du logiciel Zone version 1.2 (Juggins, 1991; figure 4). Les kystes et les écailles de Chrysophyceae ont été comptés dans le but de calculer le pourcentage de ceux-ci par rapport au nombre total de diatomées comptées (Smol, 1985).

Zone 1 : Époque préminière (1882 à 1939) (40 cm à 32 cm)

Cette zone est représentée en majorité par les espèces *Fragilaria pinnata* (5 à 30 %), *Gyrosigma acuminatum* (2 à 25 %), *Achnanthes nodosa* (2 à 10 %), *Navicula aboensis* (2 à 5 %), *F. construens* (2 à 20 %), *F. brevistriata* (7 à 25 %), *Cyclostephanos invisitatus* (7 à 20 %) et *Achnanthes minutissima* (7 à 10 %). À la base de la carotte (ca. 1882), *F. pinnata* compose jusqu'à 30 % des assemblages diatomifères et on trouve jusqu'à 20 % de *F. construens*. La présence de *G. acuminatum* est spécifique à cette zone de la carotte et, vers 1890, elle atteint près de 20 % d'abondance relative. Quant à *F. construens* et *F. brevistriata*, elles sont plus abondantes à la fin de cette zone. Les pourcentages des kystes et des écailles de chrysophycées varient respectivement entre 0,8 et 4,5 % et 0 et 0,6 %.

Zone 2 : Époque minière (1939 à 1977) (32 cm à 18 cm)

La transition entre les zones 1 et 2 est très marquée. On observe une « explosion » du taxon *Cyclostephanos invisitatus*, alors que plusieurs autres espèces de la zone 1 disparaissent totalement. Cette zone est très particulière, car elle reflète une quasi-monoculture de *C. invisitatus*: on trouve jusqu'à 80 % de ce taxon entre 1950 et 1965, soit autour de 28 cm de profondeur. De plus, on remarque la présence beaucoup plus discrète d'autres taxons tels que *Nitzschia acicularis*, *N. perminuta*, *Diatoma tenuis*, *Cyclotella pseudostelligera* et *Asterionella formosa* (toutes avec moins de 20 %). Le pourcentage des kystes de chrysophycées est encore plus faible dans cette zone que dans la précédente, n'excédant pas 2,7 %. Quant aux écailles de chrysophycées, elles sont plus abondantes que dans la zone précédente, mais n'excédant pas 3,4 %.

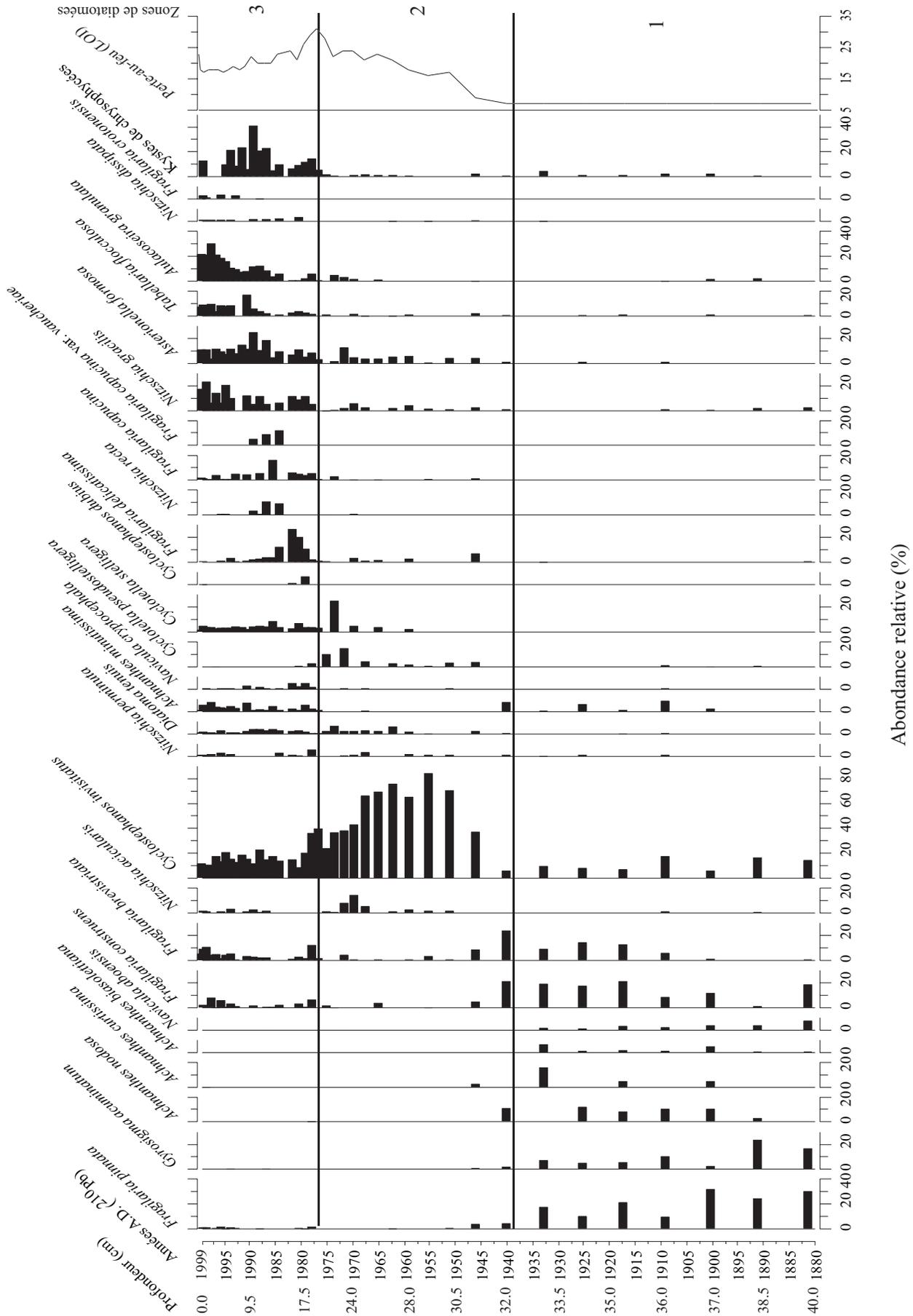


Figure 4. Profils d'abondance relative des taxons de diatomées les plus communs ($\geq 2\%$ dans au moins un niveau) et du contenu de matière organique brûlée dans les sédiments (par la perte-au-feu). La limite des zones a été déterminée à l'aide du logiciel Zone (voir le texte pour explications).

**Zone 3 : Époque postminière
(1977 à 1999) (18 cm à 0 cm)**

À partir de 1980, l'abondance de *Cyclostephanos invisitatus* chute brusquement à environ 20 % et demeure ainsi jusqu'à la surface de la carotte. *Asterionella formosa* augmente progressivement jusqu'à 10 % au début de cette période et atteint un maximum de près de 30 % vers 1990. On remarque une croissance de *Aulacoseira granulata* au milieu des années 1980 allant jusqu'à 30 % en 1997. Mis à part quelques taxons (p. ex. *Fragilaria construens* et *F. brevistriata* présents à moins de 10 %), les taxons dominants auparavant dans la zone 1 sont presque totalement absents et remplacés par *F. delicatissima* (10 à 20 %), *Asterionella formosa* (5 à 25 %), *Tabellaria flocculosa* (environ 10 %), *Nitzschia gracilis* (10 à 20 %) ainsi que *Aulacoseira granulata* (10 à 30 %). Le pourcentage des kystes et des écailles de chrysophycées est généralement supérieur par rapport aux zones précédentes, variant respectivement entre 0 % et 10,5 % et entre 0 et 29,3 %.

Reconstitution du phosphore total

Afin de quantifier les variations dans les conditions limnologiques du passé, un modèle d'inférence de phosphore total (PT) a été utilisé. La géologie du bassin versant du lac Dauriat étant à dominance calcaire, une fonction de transfert basée sur une série de lacs suisses ayant une géologie similaire était préférable à une série de lacs localisés au Québec nordique avec une géologie à dominance granitique. Le degré de similarité entre les assemblages fossiles du lac Dauriat et les assemblages modernes des lacs de la Suisse (Hausmann et Kienast, 2006), du Labrador (Fallu et collab., 2002) et du nord du Québec (Fallu et Pienitz, 1999) a été examinée à l'aide de la méthode d'analyse des correspondances redressées, une méthode d'ordination indirecte. L'analyse a montré que les assemblages fossiles de diatomées du lac Dauriat ressemblaient le plus aux assemblages des lacs en provenance des régions géologiques semblables (calcaire) (figure 5). Le modèle d'inférence du PT de la Suisse a donc été utilisé (Hausmann et Kienast, 2006).

De 1880 à 1940, le PT inféré à partir des diatomées fossiles montre des concentrations autour de 30 µg L⁻¹ (figure 6). Ces concentrations augmentent jusqu'à 140 µg L⁻¹ vers 1950, chutent à environ 60 µg L⁻¹ autour de 1970 et augmentent à 170 µg L⁻¹ en 1975. Elles diminuent ensuite pour atteindre des concentrations d'environ 30 µg L⁻¹, semblables aux concentrations à la base de la carotte. La courbe de PT inférée est fortement corrélée avec l'abondance de *Cyclostephanos invisitatus* (r² = 0,91). Le PT inféré par les diatomées montre des valeurs proches de celles du PT mesuré entre les années 1977 et 1990 (figure 6). La moyenne résiduelle entre

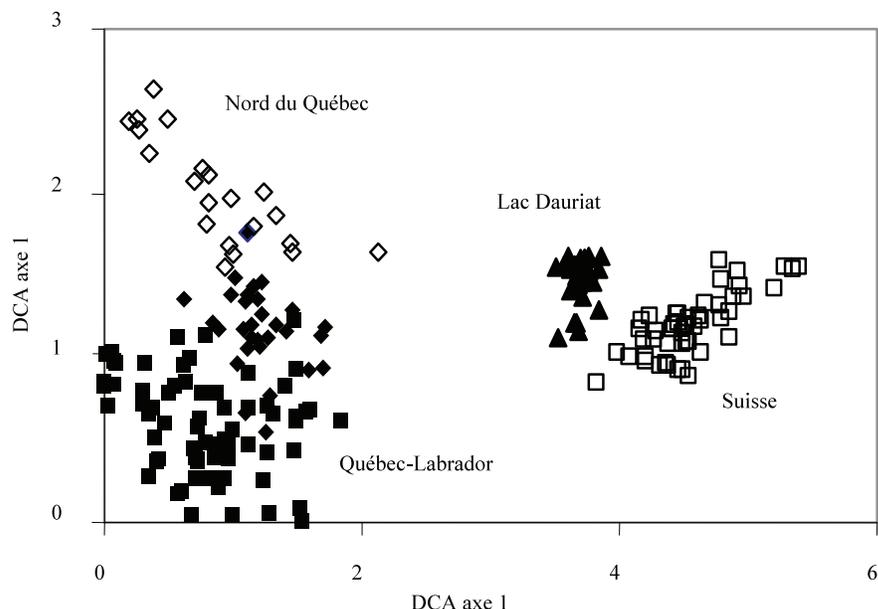


Figure 5. Comparaison des assemblages de diatomées préservées dans les sédiments de surface des lacs du nord du Québec (losanges vides), du Québec-Labrador (carrés pleins) et de la Suisse (carrés vides) avec les assemblages de diatomées fossiles du lac Dauriat (triangles), à l'aide d'une analyse des correspondances redressées (DCA).

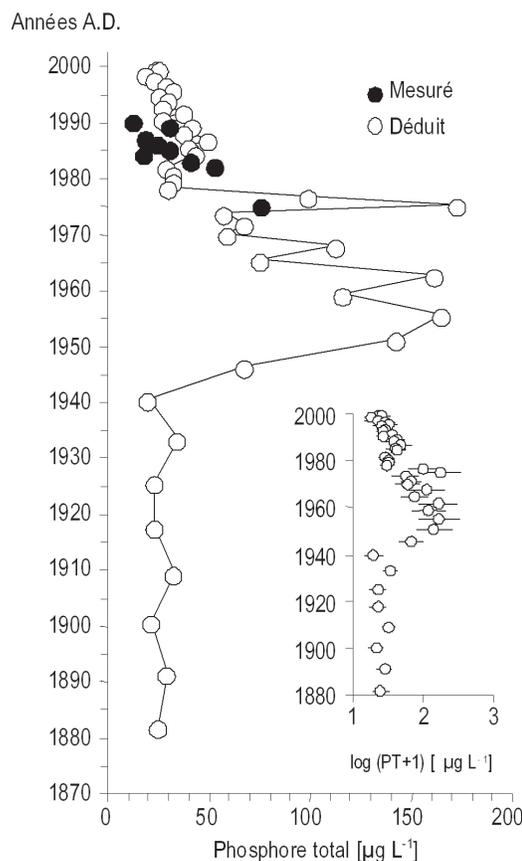


Figure 6: (a) Reconstitution du phosphore total inféré par les assemblages de diatomées et le phosphore total mesuré (Choulik et Moore, 1992) entre 1975 et 1990. (b) Valeurs log(x + 1) du phosphore total inféré par les assemblages de diatomées avec leurs erreurs.

le PT inféré et le PT mesuré est de $14 \mu\text{g L}^{-1}$ ($n = 15$; écart type = $10 \mu\text{g L}^{-1}$).

Géochimie élémentaire

La carotte A envoyée à Environnement Canada en 1999 a été analysée dans le but de connaître les concentrations de 32 éléments présents dans les sédiments du lac Dauriat.

La figure 7 présente les profils pour la majorité des différents éléments analysés dans la carotte A. Toutefois, plusieurs des éléments (Be, Cd, Cr, Ga, Mo, Na, Pd, Pt, Rb, Rh, Sb, U) n'apparaissent pas dans la figure puisqu'ils étaient tous très stables tout au long de la carotte et de faible concentration. Na montre une concentration $< 500 \text{ mg kg}^{-1}$ tout au long de la carotte, alors que les concentrations de tous les autres éléments mentionnés précédemment sont beaucoup plus faibles ($< 100 \text{ mg kg}^{-1}$).

À la base de la carotte, entre les années 1860 et 1890, les éléments Al, Fe, K, Mg et Mn sont très abondants (figure 7). Leurs concentrations respectives sont en moyenne $> 30\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Al, $> 10\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Fe, entre $7\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ et $10\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour K, et entre $5\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ et $6\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Mg.

Entre les années 1930 et 1960, une forte augmentation dans les concentrations de presque tous les éléments présentés sur la figure 7 est évidente. En 1950, les concentrations de Al, Ca et Fe atteignent respectivement $63\,200 \text{ mg kg}^{-1}$, $3\,690 \text{ mg kg}^{-1}$, et $143\,000 \text{ mg kg}^{-1}$. Les concentrations de As et Zn atteignent les plus hautes valeurs entre les années 1930 et 1950. Entre 1933 et 1960, le mercure total augmente pour atteindre $6,38 \text{ mg kg}^{-1}$ en 1943, alors qu'il demeure en dessous de 2 mg kg^{-1} dans le reste de la carotte de sédiment et P atteint $6\,010 \text{ mg kg}^{-1}$ en 1948 (figure 7).

Enfin, les éléments Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn et Sr se trouvent en forte abondance près de la surface de la carotte (1984-1999). Leurs concentrations sont de $> 30\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Al, $> 2\,500 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Ca, $> 170\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Fe, $> 4\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour K, $> 3\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Mg, $> 2\,000 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Mn et $> 20 \text{ mg kg}^{-1}$ pour Sr (figure 7).

Discussion

Zone 1 : Époque préminièrre, de 1882 à 1939 (40 cm à 32 cm)

De 1882 à 1939, les assemblages de diatomées ainsi que les profils des différents éléments de la figure 7 montrent que le milieu aquatique a été faiblement touché par la pollution minièrre et les rejets municipaux. À cette époque, la population de la région était composée d'autochtones de la communauté de Matimekosk et de celle des Naskapis. Quelques activités de prospection minièrre de faible envergure ont eu lieu avant les années 1950 (Louis-Edmond Hamelin, communication personnelle). Ces travaux impliquant la déforestation du bassin versant et favorisant le ruissellement, ainsi que la construction du chemin de fer, ont probablement amorcé le processus d'eutrophisation vers la fin des années 1930. Ces facteurs ont vraisemblablement favorisé

l'augmentation du Fe dans le lac, car, dès le début des années 1930, on note une augmentation dans la concentration du Fe, laquelle demeure élevée par la suite (figure 7). Parallèlement, on remarque une augmentation dans les concentrations des éléments As, Cu, Hg total, La, Mn et Zn, probablement aussi favorisée par les travaux de construction en cours. D'ailleurs, ces différents éléments sont souvent plus abondants en présence d'activités humaines, telle l'exploitation minièrre (Lennotech, 2006). Le sol est riche en fer dans la région de Schefferville, ce qui favorise au départ la rétention du P (Chouliquet et Moore, 1992). On trouve d'ailleurs des assemblages de diatomées témoignant d'un milieu oligo-mésotrophe, soit d'un plan d'eau relativement riche en P, dès 1880, soit *Fragilaria pinnata*, *F. contruens*, et *Cyclostephanos invisitatus*. L'optimum de PT pour le taxon *Cyclostephanos invisitatus* se situe à $150 \mu\text{g L}^{-1}$, ce qui témoigne aussi d'un milieu mésotrophe (Hausmann et Kienast, 2006).

La présence des différents taxons qui possèdent une tolérance élevée à la pollution organique, tels que *F. pinnata*, *F. brevistriata* et *Achnanthes minutissima*, suggèrent un pH élevé des eaux du lac avant le développement de la mine et de la ville (Académie des sciences de Philadelphie, 2004). Ces trois espèces vivent aussi dans des milieux légèrement salés (0,9 ‰) et bien oxygénés (Académie des sciences de Philadelphie, 2004). *F. pinnata* et *A. minutissima* peuvent tolérer des concentrations élevées en azote organique et sont toutes deux bêta-mésosaprobies (Lecoite et collab., 1993), c'est-à-dire qu'elles tolèrent moyennement la présence de matière organique dans l'eau. Quant à *F. brevistriata*, elle est qualifiée d'oligosaprobique, c'est-à-dire qu'elle tolère peu la présence de matière organique. Les assemblages de *F. construens* et *F. brevistriata* sont aussi des témoins de milieux alcalins. L'optimum de PT pour *F. brevistriata* est de $75 \mu\text{g L}^{-1}$ et celui de *F. pinnata* est de $55 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hausmann et Kienast, 2006).

Le faible pourcentage de kystes et d'écaillés de chrysophycées réfère également à un environnement mésotrophe pour la période comprise entre 1882 et 1939, car les chrysophycées sont des organismes planctoniques qui survivent rarement dans des eaux polluées, riches en nutriments et en phosphore (Duff et collab., 1995; Quinlan et collab., 1998). D'ailleurs, en 1914, les concentrations en phosphore sont inférieures à 800 mg kg^{-1} , mais elles septuplent en 1927 pour atteindre $5\,970 \text{ mg kg}^{-1}$ (figure 7). La faible abondance de kystes de chrysophycées témoigne du processus d'eutrophisation qui s'amorce.

Les assemblages de diatomées, la présence de kystes et d'écaillés de chrysophycées et la faible quantité des éléments présents dans cette zone montrent que le lac est légèrement touché par les activités minièrres. L'eutrophisation du lac n'étant pas encore avancée, il est normal que, comme en témoigne la perte-au-feu (figure 4), le contenu des sédiments en matière organique soit plus faible que dans les deux zones suivantes. Toutefois, les travaux de construction du chemin de fer et de la ville de Schefferville ont pu contribuer au début du processus d'eutrophisation.

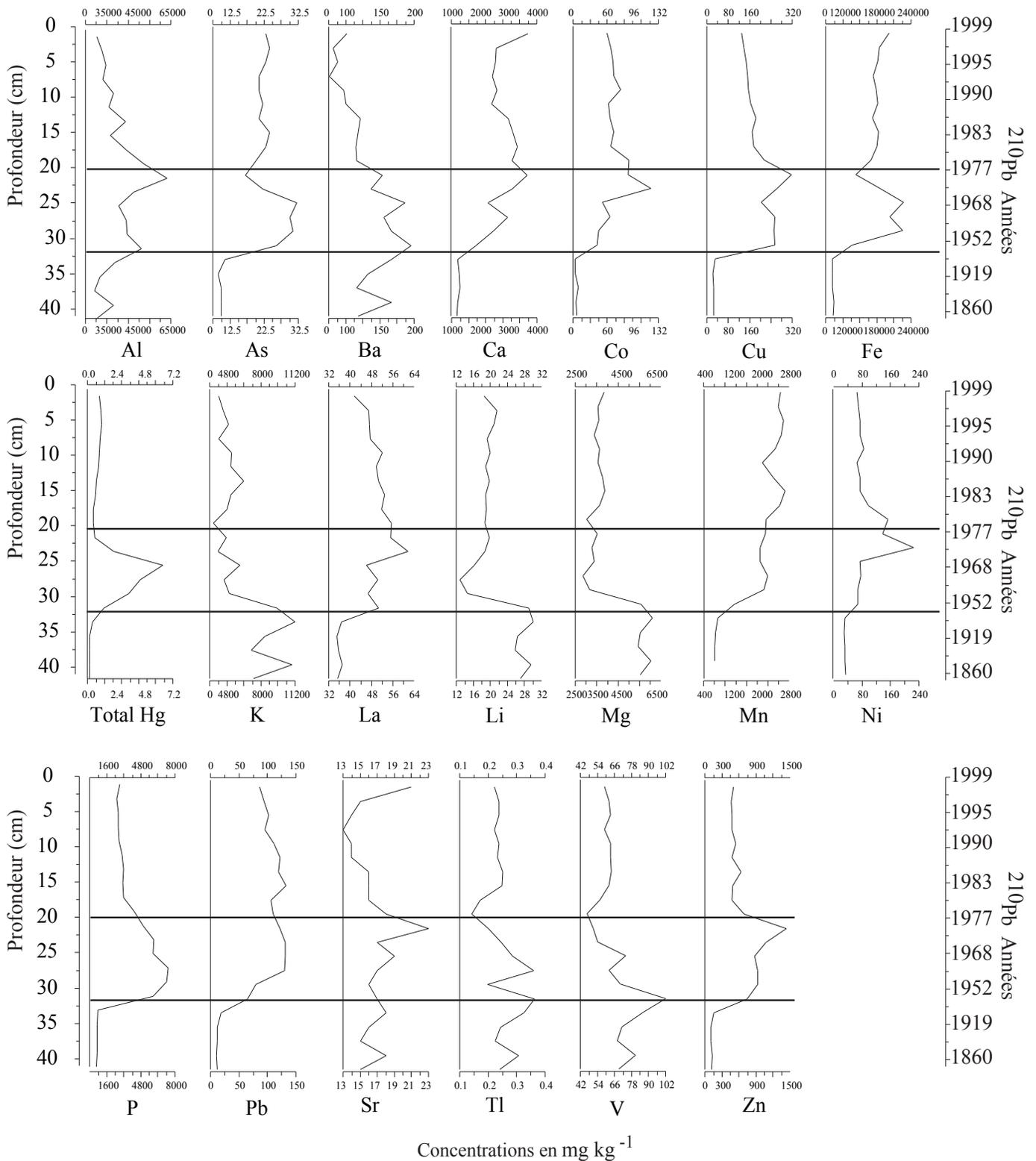


Figure 7. Profils d'abondances absolues des éléments trouvés dans les sédiments du lac Dauriat. Noter que l'échelle des concentrations (toutes en mg kg^{-1}) est propre à chacun des éléments et que le trait en pointillé représente la concentration moyenne pour chaque élément.

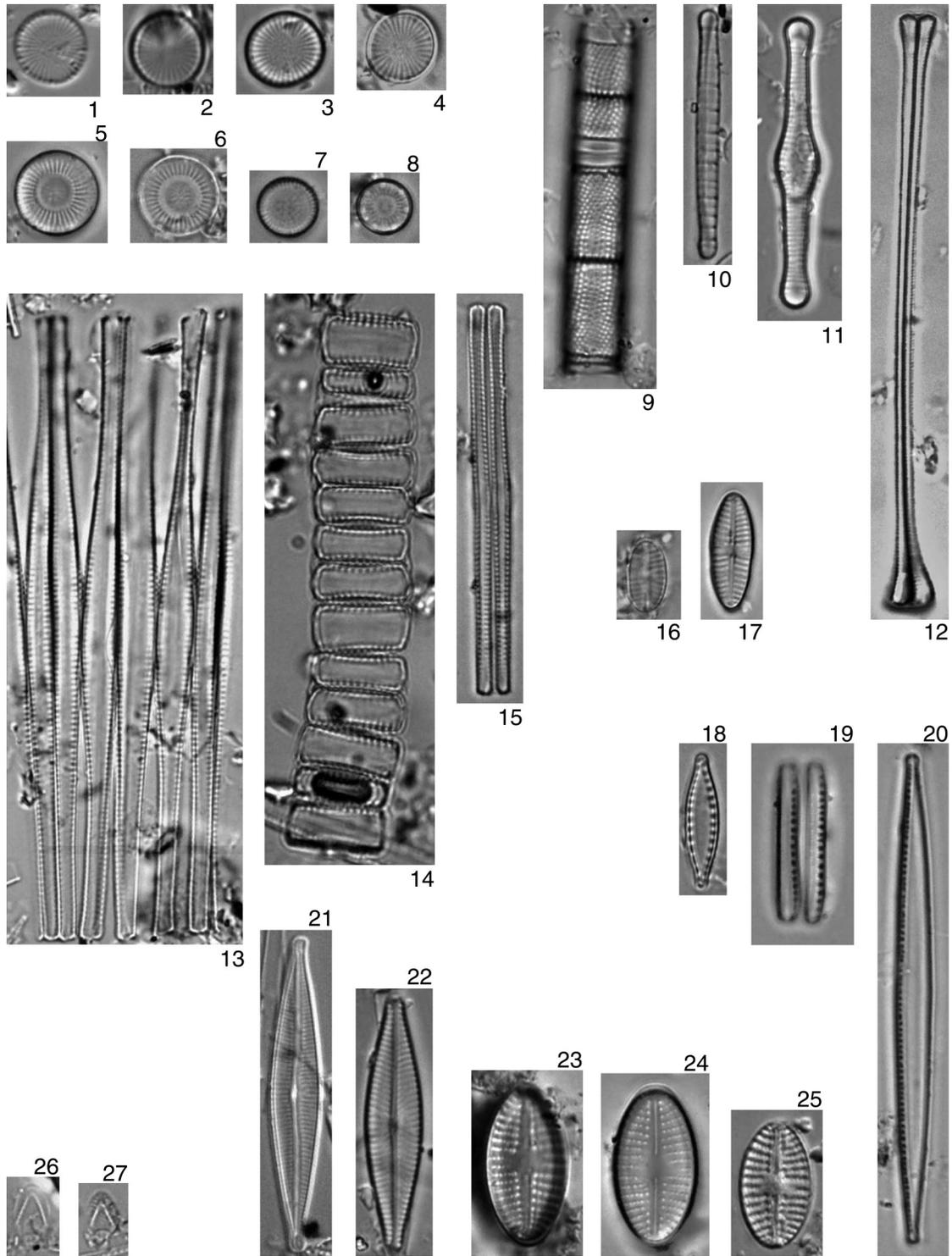


Figure 8. Valves et écailles des espèces de diatomées dominantes dans les sédiments du lac Dauriat et écailles de chrysophycées (grossissement X 1000). Voir l'appendice 1 pour le nom des espèces.

**Zone 2 : Époque minière,
de 1939 à 1977 (32 cm à 18 cm)**

De 1956 à 1976, la population de la ville de Scheferville passe de 1632 à 4025 (Choulik et Moore, 1992 : tiré de Archer, 1983). Jusqu'en 1975, aucun moyen de filtration des eaux usées n'existe. La décharge des égouts dans les eaux

du lac Dauriat est vraisemblablement la cause principale de l'eutrophisation accélérée du lac. Cette décharge est riche en éléments nutritifs tels le phosphore et l'azote et fournit des éléments essentiels à la croissance des algues, incluant les diatomées. Cette croissance massive crée des conditions d'anoxie (rareté d'oxygène) et provoque une sélection des

espèces pouvant tolérer ces conditions extrêmes de vie. D'ailleurs, des problèmes liés à la croissance massive d'algues ont été observés dans le lac à la fin de l'été, après une saison où les eaux de fonte furent très abondantes (Drake et Freund, 1980). On a remarqué une augmentation dans la concentration du phosphore dès 1927 (figure 7) et dès 1940 pour le phosphore total inféré (figure 6). Ces concentrations restent élevées jusqu'à la fin des années 1970 (figures 6 et 7). D'ailleurs, c'est dans la zone 2 (figure 4) que se trouvent les assemblages de diatomées typiques d'un milieu fortement pollué, soit une quasi-monoculture de *Cyclostephanos invisitatus*. Cette espèce dominante est présente à plus de 80 % des assemblages pour la période comprise entre 1950 et 1965 (figure 4).

Le contenu en Chl *a* se situait à $> 40 \mu\text{g L}^{-1}$ durant la période comprise entre 1967 et 1975 (Choulik et Moore, 1992; figure 2). Cette concentration élevée témoigne de l'apport excessif de matière organique dans le lac. Les concentrations de PT atteignirent aussi un pic en 1975 (Choulik et Moore, 1992; figure 2). Puisque la pollution organique était élevée dans le lac, la décomposition bactérienne s'est probablement accélérée, ce qui a pu contribuer à une forte concentration de nutriments provoquant une prolifération des algues et une augmentation de la biomasse. En effet, 32,5 % des sédiments étaient composés de matière organique à 20,5 cm de profondeur. Cette couche coïncide aussi avec des sédiments plus foncés entre 1950 et 1977, où le contenu en matière organique atteignit son plus haut niveau (figure 4).

Les espèces du genre *Cyclostephanos* répondent positivement à une augmentation de phosphore (Anderson, 1990). On remarque d'ailleurs que les concentrations en phosphore augmentent rapidement au milieu des années 1930, parallèlement à l'augmentation de l'espèce *Cyclostephanos invisitatus* (figure 7). Cette dernière est une espèce cosmopolite et planctonique qui dispose d'une tolérance élevée à la pollution (Krammer et Lange-Bertalot, 1991a). Elle est très répandue, tant dans les eaux courantes que stagnantes. Elle cohabite souvent avec l'espèce *Stephanodiscus hantzschii* (absente de notre carotte, mais aussi difficile à différencier de *C. invisitatus*) et elle se rencontre souvent dans les milieux saprobes, riches en matière organique (Krammer et Lange-Bertalot 1991a). *C. invisitatus* tolère une forte concentration de nutriments, tels que le milieu décrit dans cette zone (Håkansson, 2002). *Asterionella formosa*, *Nitzschia perminuta* et *Diatoma tenuis*, aussi présentes dans cette zone, sont quant à elles témoins d'environnements alcalins et tolèrent une eutrophisation soutenue (Krammer et Lange-Bertalot, 1988, 1991a). Entre 1948 et 1966, les concentrations en Ca sont les plus élevées; elles excèdent toutes 3000 mg kg^{-1} . L'optimum de PT pour *Asterionella formosa* se situe à $130 \mu\text{g L}^{-1}$ (Hausmann et Kienast 2006). *Diatoma tenuis* est une espèce alpha-mésosaprobe, c'est-à-dire qu'elle tolère de fortes teneurs en matière organique (Base de données *Omnidia*; Lecointe et collab., 1993). *Gyrosigma acuminatum* diminue habituellement en abondance avec la pollution (Krammer et Lange-Bertalot, 1986), ce qui est

apparent dans cette zone de la figure 4. Les autres espèces qui étaient présentes dans la zone 1 et qui étaient peu tolérantes à la présence de matière organique sont ici faiblement représentées. Ainsi, depuis la zone 1 (1882 à 1939), l'eutrophisation s'est fortement accélérée à la suite des rejets intenses et continus de matières fécales.

Le pourcentage de kystes et d'écaillés de chrysophycées reste très faible durant l'époque minière, ce qui témoigne de l'enrichissement accéléré des eaux en nutriments et de l'eutrophisation marquée du lac Dauriat. Puisque le lac a servi d'égout pendant cette période, les rejets municipaux ont probablement presque totalement éliminé la présence de chrysophycées.

Les concentrations sédimentaires de Ca, Co, Mn, Sr et Fe augmentent après les années 1950 (figure 7). Les années 1950 marquent aussi le début des travaux d'excavation minière (Hilton, 1968). À la fin des années 1950, les concentrations en Fe sont de l'ordre de $180\,000 \text{ mg kg}^{-1}$. Le Co et le Sr sont présents naturellement dans l'environnement, mais l'augmentation de leurs concentrations est favorisée par les activités humaines tels les exploitations minières et les incinérateurs (Lenntech, 2006).

À partir de 1976, le contenu de matière organique diminue progressivement (figure 3). De plus, l'abondance de l'espèce indicatrice d'une forte pollution *Cyclostephanos invisitatus* s'est amoindrie pour laisser la place à d'autres espèces, telles que *Achnanthes minutissima*, *Cyclotella stelligera* et *Asterionella formosa* (figure 4). Quoique *Achnanthes minutissima* puisse soutenir un niveau élevé d'azote organique, le retour ou l'apparition de ces dernières espèces montrent que le milieu semble s'améliorer (Lecointe et collab., 1993). Ces changements soudains dans la composition des assemblages de diatomées paraissent directement associés à l'installation d'une station de filtration des eaux usées en 1975, démontrant ainsi la réponse immédiate de la communauté des diatomées. Puisque les diatomées sont des algues excessivement sensibles aux conditions du milieu, les variations floristiques aussi remarquables que celles observées dans cette zone de la carotte du lac Dauriat ne sont pas surprenantes. De plus, l'intervalle de temps pendant lequel s'est produite l'explosion de *Cyclostephanos invisitatus* est relativement court, environ une trentaine d'années.

Zone 3 : Époque postminière, de 1977 à 1999 (18 cm à 0 cm)

En 1979, la population de Schefferville atteint son maximum de 4 129 habitants (Choulik et Moore, 1992; tiré de Archer, 1983). Une forte diminution des rejets de nutriments dans le lac serait survenue après 1975, à la suite de l'ouverture d'une usine de filtration des eaux usées, mais aussi à la suite de l'exode de la population après 1979 et de la fermeture de la mine en 1983. Dès 1982, la concentration en Chl *a* diminué de façon draconienne à $15,3 \mu\text{g L}^{-1}$ et elle n'est plus qu'à $6,4 \mu\text{g L}^{-1}$ en 1990 (figure 2; Choulik et Moore, 1992). Tous ces changements démontrent que les apports en nutriments (provenant des rejets de matières fécales) ont

considérablement baissé dans le lac Dauriat et expliquent la diminution d'espèces adaptées aux conditions extrêmes de pollution et l'augmentation du pourcentage des kystes de chrysophycées. Les concentrations en phosphore, après 1977, sont toutes inférieures à 3 000 mg kg⁻¹ (figure 7). La présence croissante de *Cyclotella stelligera*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria delicatissima* et *F. capucina* pourrait témoigner d'un changement progressif des eaux alcalines vers un pH plus neutre à légèrement acide. L'altération dans les nutriments, telle la diminution du phosphore, pourrait aussi expliquer le retour de certains taxons. Toutefois, *Aulacoseira granulata* est présente en forte abondance près de la surface, ce qui indique généralement un environnement riche en nutriments, soit eutrophe (Jenny et collab., 2002). L'abondance de *Cyclostephanos invisitatus* varie autour de 20 % dans la zone 3 (figure 4), pourcentage comparable à celui de la zone 1. Toutefois, le pourcentage de la matière organique dans le lac est encore plus que le double de celui du début des années 1870 (figure 4). La persistance de nouvelles espèces comme *Aulacoseira granulata* montre que le lac n'a pas encore retrouvé son équilibre naturel.

Quoique le temps de renouvellement de l'eau du lac Seebergsee, situé dans les Alpes suisses, ne soit pas connu, il est probable que lac Dauriat ait un temps de renouvellement plus rapide puisque ce dernier fait partie d'une chaîne de lacs et qu'il n'est pas un lac de tête comme le lac Seebergsee. Ce dernier a pris plus de huit décennies avant de retrouver un état oligotrophe (Hausmann et collab., 2002) et le lac Dauriat est toujours dans un état mésotrophe après plus de 20 ans.

Le pourcentage de kystes et d'écailles de chrysophycées est considérablement supérieur à celui des autres zones et témoigne d'une eau moins eutrophe puisque les chrysophycées ne tolèrent pas ces environnements (Duff et collab., 1995; Smol 1995).

Les éléments tels Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn et P trouvés dans le lac montrent encore des concentrations élevées après 1977 jusqu'en 1999, mais ces concentrations demeurent assez stables. Il semble que l'apport massif de ces éléments dans le lac ait diminué subséquemment à l'installation de l'usine de traitement des eaux usées et à l'exode de la population. L'eutrophisation du lac est donc ralentie et le statut trophique du lac Dauriat semble stabilisé.

Conclusions

Les assemblages de diatomées ainsi que la quantité de chrysophycées, de matière organique et des éléments dans les sédiments ont permis de déterminer trois époques de conditions limnologiques très contrastées au cours de l'histoire récente du lac Dauriat. Ces changements sont facilement liés aux événements historiques qui se sont déroulés dans son bassin versant lors des époques préminière, minière, et postminière.

Le lac Dauriat présente actuellement des signes d'amélioration, mais son équilibre naturel de l'époque préminière n'a pas été atteint. On remarque un pourcentage de matière organique plus élevé en 1999 que pendant la période

préminière ainsi qu'un taux de sédimentation plus élevé. Le contenu en phosphore total a nettement diminué, d'abord à la suite de l'installation de la station de filtration des eaux usées en 1975, et puis à la suite de la fermeture des mines en 1983 et l'exode de la population. Les assemblages fossiles de diatomées témoignent d'un milieu mésotrophe avancé en 1999. Les espèces *Cyclostephanos invisitatus*, *Aulacoseira granulata*, *Nitzschia gracilis* et *Asterionella formosa* sont toujours majoritaires et s'adaptent à des environnements riches en matière organique. La disparition presque totale de certains taxons (p. ex. *Gyrosigma acuminatum*, *Achnanthes nodosa*, *Navicula aboensis*) pendant la période minière, et l'apparition simultanée de nouvelles espèces (p. ex. *Nitzschia recta*, *Fragilaria capucina*, *Aulacoseira granulata*) montrent l'adaptation rapide des diatomées aux changements physiques et chimiques dans les lacs. À la suite d'un événement de pollution et de fertilisation tel que survenu dans le lac Dauriat, plusieurs années seront nécessaires avant que le lac ne retrouve son état écologique initial. Les conséquences néfastes de la pollution se font toujours sentir 20 ans après la fermeture de la mine, et le lac Dauriat n'a toujours pas atteint l'état qu'il possédait avec l'exploitation minière.

Remerciements

Nous souhaitons remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour la subvention accordée à Reinhard Pienitz, ainsi qu'une bourse d'été du CRSNG accordée à Laurence Laperrière. Nous tenons aussi à remercier le Centre d'études nordiques pour son support logistique, Ian R. Walker pour son aide sur le terrain et Serge Duchesneau pour sa collaboration à la cartographie. Aussi, nous remercions Gino Sardella, Fang Yang et Xiaowa Wang (NWRI) pour les analyses géochimiques. Nous remercions finalement les membres du Laboratoire de paléocéologie aquatique et deux membres du comité de rédaction de la revue, Michel Crête et Jean Hamann, pour leurs précieux conseils. ◀

Références

- ACADÉMIE DES SCIENCES DE PHILADELPHIE, 2004. Diatom paleolimnology data Cooperative, Philadelphie. Disponible en ligne à : diatom.acnatsci.org/dpdc/. [Visité le 05-06-15].
- ANDERSON, N.J., B. RIPPEY et A.C. STEVENSON, 1990. Change to a diatom assemblage in a eutrophic lake following point source nutrient re-direction: a palaeolimnological approach. *Freshwater Biology*, 23: 205-217.
- ANDERSON, N.J., 1990. The biostratigraphy and taxonomy of small *Stephanodiscus* and *Cyclostephanos* species (Bacillariophyceae) in a eutrophic lake, and their ecological implications. *European Journal of Phycology*, 25: 217-235.
- ARCHER, K., 1983. The dynamics of economic growth and decline in the Québec-Labrador resource-based region. *McGill Subarctic Research Paper*, 38: 19-40.
- BINFORD, M.W., 1990. Calculation and uncertainty analysis of ²¹⁰Pb dates for PIRLA project lake sediment cores. *Journal of Paleolimnology*, 3: 253-267.
- CHOULIK, O. et T.R. MOORE, 1992. Response of a subarctic lake chain to reduced sewage loading. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49: 1236-1245.

- DEAN, W.E., Jr., 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss-on-ignition: Comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44: 242-248.
- DIMROTH, E., 1981. La géologie. Dossier sectoriel 2.2. Profil du Nord du Québec. OPDQ/UQAC, Chicoutimi, 224 p.
- DIONNE, A., 2005. Schefferville: au point de rencontre du Québec et du Labrador. Ministère des Affaires indiennes et du Nord Canada, Ottawa. Disponible en ligne à: aicc-inac.gc.ca/qc/aqc/art/montagnais_f.html#txt8. [Visité le 05-06-15].
- DRAKE, J.J. et I.J. FREUND, 1980. The fate of sewage phosphorus input to a subarctic lake chain. *Water Air and Soil Pollution*, 14: 331-337.
- DUBREUIL, M.A., 1981. Some aspects of the recovery of a stream from iron ore mining activities near Schefferville, Québec. *McGill Subarctic Research Paper*, 32: 32-55.
- DUFOUR, J., 1981. Les mines. Dossier sectoriel 5.3. Profil du Nord du Québec. OPDQ/UQAC, Chicoutimi, 84 p.
- DUFF, K.E., B.A. ZEEB et J.P. SMOL, 1995. Atlas of chrysophycean cysts. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 189 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1993. Normales climatiques au Canada, 1961-1990, Québec. Publication du Programme climatologique canadien, Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa, ON, 76 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2003. Centre de ressources en impacts et adaptation au climat et à ses changements (CRIACC), Québec. Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa, ON. Disponible en ligne à: criacc.qc.ca/index_e.html.
- FALLU, M.-A. et R. PIENITZ, 1999. Diatomées lacustres de Jamésie-Hudsonie (Québec) et modèle de reconstitution des concentrations de carbone organique dissous. *Écoscience*, 6: 603-620.
- FALLU, M.-A., N. ALLAIRE, et R. PIENITZ, 2000. Freshwater diatoms from northern Québec and Labrador (Canada): species-environment relationships in lakes of boreal forest, forest-tundra and tundra regions. *Bibliotheca Diatomologica*, Vol. 45. J. Cramer, Berlin, Stuttgart, 200 p.
- FALLU, M.-A., N. ALLAIRE, N. et R. PIENITZ, 2002. Distribution of freshwater diatoms in 64 Labrador (Canada) lakes: species-environment relationships along latitudinal gradients and reconstruction models for water colour and alkalinity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 329-349.
- GUILIZZONI, P., A. LAMI, A. MARCHETTO, P. APPLEBY et F. ALVISI, 2001. Fourteen years of paleolimnological research of a past industrial polluted lake (L. Orta, northern Italy): an overview. *Journal of Limnology*, 60: 249-262.
- HÅKANSSON, H., 2002. Compilation and evaluation of species in the general *Stephanodiscus*, *Cyclostephanos* and *Cyclotella* with a new genus in the family Stephanodiscae. *Diatom Research*, 17: 1-139.
- HALL, R.I., P.R. LEAVITT, J.P. SMOL, et N. ZIRNHELT, 1997. Comparison of diatoms, fossil pigments and historical records as measures of lake eutrophication. *Freshwater Biology*, 38: 401-417.
- HAUSMANN, S., A.F. LOTTER, J.F.N. VAN LEEUWEN, C. OHLENDORF, G. LEMCKE, E. GRÖNLUND et M. STURM, 2002. Interactions of climate and land use documented in the varved sediments of Seebensee in the Swiss Alps. *Holocene*, 12: 279-289.
- HAUSMANN, S. et F. KIENAST, F. 2006. Optimisation of transfer functions by homogenisation of environmental variables: A validated case study for Greifensee in central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 233: 96-112.
- HILTON, D.K., 1968. The Iron Mining Communities of Québec-Labrador: A study of a resource frontier. Thèse de maîtrise, McGill University, Montréal, QC, 187 p.
- JENNY, B., B.L. VALERO-GARCÉS, R. URRUTIA, K. KELTS, H. VEIT, P.G. APPLEBY et M. GEYH, 2002. Moisture changes and fluctuations of the Westerlies in Mediterranean Central Chile during the last 2000 years: The Laguna Aculeo record (331500S). *Quaternary International*, 87: 3-18.
- JUGGINS, S. 2002. Palaeo data plotter, Beta test version 1.0. Programme non publié. Disponible en ligne à: staff.ncl.ac.uk/staff/stephen.juggins/software.html. [Visité le 09-03-04].
- KARST, T. et J.P. SMOL, 1998. Tracking the cultural eutrophication history of Collins Lake (southeastern Ontario, Canada) using paleolimnological techniques. *Journal of Lake Research and Management*, 14: 456-465.
- KERFOOT, W.C., G. LAUSTER et J.A. ROBBINS, 1994. Paleolimnological study of a copper mining around Lake Superior: Artificial varves from Portage Lake provide a high resolution record. *Limnology & Oceanography*, 39: 649-669.
- KERFOOT, W.C., J.A. ROBBINS et L.J. WEIDER, 1999. A new approach to historical reconstruction: Combining descriptive and experimental paleolimnology. *Limnology & Oceanography*, 44: 1232-1247.
- KRAMMER, K. et H. LANGE-BERTALOT, 1986. Bacillariophyceae, part 1, Naviculaceae. Dans: *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, et D. Mollenhauer (édit.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York, 876 p.
- KRAMMER, K. et H. LANGE-BERTALOT, 1988. Bacillariophyceae, part 2, Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Dans: *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, et D. Mollenhauer (édit.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York, 596 p.
- KRAMMER, K. et H. LANGE-BERTALOT, 1991a. Bacillariophyceae, part 3, Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Dans: *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, et D. Mollenhauer (édit.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena, 576 p.
- KRAMMER, K. et H. LANGE-BERTALOT, 1991b. Bacillariophyceae, part 4, Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. Dans: *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig, et D. Mollenhauer (édit.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena, 437 p.
- LANDRY, B. et M. MERCIER, 1992. Notions de géologie. 3^e édition. Modulo, Mont-Royal, Québec, 565 p.
- LECOINTE, C., M. COSTE et M. J. PRYGIEL, 1993. Omnidia: software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia*, 269/270: 509-513.
- LE GRAND ATLAS DU CANADA ET DU MONDE, 2002. De Boeck Wesmael, The Netherlands, Bruxelles, 184 p.
- LENNTECH, 2006. Traitement de l'eau et de l'air. Tableau périodique des éléments. The Netherlands. Disponible en ligne à: lenntech.com/fran%20E7ais/tableau-periodique.htm. [Visité le 06-09-29].
- PIENITZ, R., J.P. SMOL, et H.J.B. BIRKS, 1995. Assessment of freshwater diatoms as quantitative indicators of past climatic change in the Yukon and the Northwest Territories. *Journal of Paleolimnology*, 13: 21-49.
- PIENITZ, R., K. ROBERGE et W.F. VINCENT, 2006. Three hundred years of human-induced change in an urban lake: paleolimnological analysis of Lac Saint-Augustin, Québec City, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 84: 303-320.
- QUINLAN, R., J.P. SMOL et I.R. HALL, 1998. Quantitative inferences of past hypolimnetic anoxia in south-central Ontario lakes using fossil midges (Diptera: Chironomidae). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55: 587-596.
- SAULNIER-TALBOT, E., R. PIENITZ et W.F. VINCENT, 2003. Holocene lake succession and palaeo-optics of a subarctic lake, northern Québec, Canada. *The Holocene*, 13: 517-526.
- SMOL, J.P., 1985. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index. *Hydrobiologia*, 123: 199-208.
- TER BRAAK, C.J.F. et C.W.N. LOOMAN, 1986. Weighted averaging, logistic regression and the Gaussian response model. *Vegetatio*, 65: 3-11.
- TER BRAAK, C.J.F. et P. ŠMILAUER, 1998. CANOCO reference manual and user's guide for Canoco for Windows. Software for Canonical Community Ordination (version 4). Microcomputer Power, Ithaca, NY, 351 p.
- WETZEL, R., 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. Academic Press, San Diego, CA, 1006 p.

Appendice 1

Nom latin des diatomées dominantes dans les sédiments du lac Dauriat et écailles de chrysophycées (grossissement X 1000). Les chiffres correspondent aux valves et aux écailles des espèces photographiées à la figure 8.

1. *Cyclostephanos invisitatus* (Hohn & Hellerman) Theriot, Stoermer & Håkansson 1987
2. *Cyclostephanos invisitatus* (Hohn & Hellerman) Theriot, Stoermer & Håkansson 1987
3. *Cyclostephanos invisitatus* (Hohn & Hellerman) Theriot, Stoermer & Håkansson 1987
4. *Cyclostephanos invisitatus* (Hohn & Hellerman) Theriot, Stoermer & Håkansson 1987
5. *Cyclotella stelligera* (Cleve & Grunow) Van Heurck 1882
6. *Cyclotella stelligera* (Cleve & Grunow) Van Heurck 1882
7. *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round 1987
8. *Cyclotella pseudostelligera* Hustedt 1939
9. *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979
10. *Diatoma tenuis* Agardh 1812
11. *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing 1844
12. *Asterionella formosa* Hassall 1850
13. *Fragilaria crotonensis* Kitton 1869
14. *Fragilaria brevistriata* Grunow in Van Heurck 1885
15. *Fragilaria capucina* Desmazières 1925
16. *Achnanthes nodosa* A. Cleve 1900
17. *Achnanthes biasolettiana* Grunow in Cleve & Grunow 1880
18. *Nitzschia perminuta* (Grunow) Peragallo 1903
19. *Nitzschia perminuta* (vue connective) (Grunow) Peragallo 1903
20. *Nitzschia gracilis* Hantzsch 1860
21. *Navicula cryptocephala* Kützing 1844
22. *Navicula cryptocephala* Kützing 1844
23. *Navicula aboensis* (Cleve) Hustedt 1952
24. *Navicula aboensis* (Cleve) Hustedt 1952
25. *Navicula aboensis* (Cleve) Hustedt 1952
26. Écailles de chrysophycées (*Mallomonas* spp.)



**PRO
FAUNE**

- Caractérisation des écosystèmes
- Écoingénierie
- Aménagement d'habitats fauniques
- Mesures de compensation
- Suivi environnemental

2095, rue Frank-Carrel, bureau 217, Québec (QC) G1N 4L8 tél.: (418) 688-3898 téléc.: (418) 681-6914
 site Internet : www.profaune.com sans frais : 1-800-561-3898 courriel : info@profaune.com

Sélection
Laminard inc.

Diane Lemay et Pierre Savard, prop.

- Encadrement
- Laminage
- Matériel d'artiste
- Cours de peinture
- Galerie d'art

254, rue Racine
Loretteville (Québec)
G2B 1E6
Tél. : (418) 843-6308
Fax. : (418) 843-8191
Courriel : selection.laminard@videotron.ca
www.selectionart.com