



Le cycle géochimique des métaux de surface en période d'exploitation minière: Étude isotopique des sédiments lacustres de Schefferville (rapport final)

Stéphane Aebischer¹, Jean Carignan[†], Christophe Cloquet¹, Charles Maurice², Reinhard Pienitz¹

GM 67112

Ministère des Ressources Naturelles

¹Takuvik-CNRS-Ulaval
²Bureau de l'Exploration géologique du Québec

Énergie et Ressources naturelles
Direction de l'information géologique

MB 2013-08

2013

*Ressources
naturelles*
Québec 

Résumé

En période d'exploitation minière, le cycle de surface des métaux est perturbé par le changement d'occupation des sols et l'érosion qui y est associée, la disponibilité de nouvelles sources de métaux, les rejets secondaires aux activités anthropiques et l'évolution des conditions trophiques des systèmes aquatiques. Une étude préliminaire (Laperrière *et al.*, 2008, 2009) a montré une relation entre les activités d'exploitation minière de la région de Schefferville (formation de Fe rubané, mineraï sous forme d'oxyhydroxyde de Fe), et la baisse de biodiversité et l'augmentation des teneurs en métaux (entre autres Pb, Zn, Fe, Hg) des sédiments lacustres à proximité du camp minier. La période de cessation d'exploitation et du déclin démographique de Schefferville depuis le début des années 1980 est caractérisée par une diminution de la teneur en métaux des sédiments, ainsi qu'un retour vers les conditions trophiques de la période pré-mine. Cependant, cet "état naturel" n'est toujours pas atteint près de 30 ans après l'arrêt de l'exploitation minière. Par l'étude de la spéciation et la composition isotopique du Pb, Zn et Fe, notre projet vise à mieux comprendre la dynamique et la cinétique des changements environnementaux liés à l'exploitation minière d'un milieu subarctique fragile comme celui de la région de Schefferville. Ce projet tente de répondre aux questions suivantes: 1) quelles sont les sources des métaux dans les sédiments lacustres? 2) à quelles phases sédimentaires les métaux sont-ils liés? 3) comment s'opère la transition entre les régimes pré-mine et mine - post-mine? 4) pourquoi le régime stationnaire pré-industriel n'est pas atteint après près de 30 ans d'arrêt de l'exploitation minière? 5) est-il possible d'accélérer le retour à l'équilibre naturel?

Pour répondre à ces questionnements, un projet de recherche de maîtrise en sciences géographiques à l'Université Laval a été complété. Le présent rapport fait suite à une convention entre le ministère des Ressources naturelles et de la Faune et l'Université Laval en lien avec ces travaux. Les résultats de deux ans de travaux sont ici présentés.

Mots clefs: *isotopes; géochimie; exploitation minière; changements environnementaux; sédiments lacustres*

Localisation et contexte géo-environnemental

La région de Schefferville se situe dans l’Orogène du Nouveau-Québec (ONQ), aussi connu sous le nom de « Fosse du Labrador ». L’ONQ se situe à la marge est de la Province du Supérieur, dans la province géologique de Churchill (figures 1 et 2); Clark et Wares, 2004). L’ONQ est composé de roches du Protérozoïque Inférieur (ca 2,2 à 1,8 Ga) regroupant trois cycles volcano-sédimentaires. L’Orogène s’étend au Nord jusqu’à la Baie d’Ungava et au Sud jusqu’au Mont Wright (Humphrys, 1958). Il a une largeur maximale de 160 km et une longueur d’environ 1200 km.



Figure 1. Provinces géologiques du Québec et localisation de la ville de Schefferville.

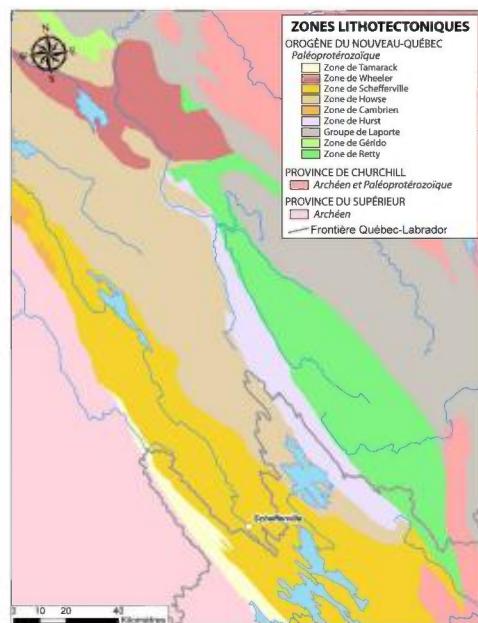


Figure 2. Zones lithotectoniques de l’Orogène du Nouveau-Québec.

Source: Clark et Wares, 2004

La région de Schefferville est composée de roches sédimentaires déposées dans des milieux marins et fluviatiles (Clark et Wares, 2004). Elle se situe en partie dans la formation de Sokoman et en partie dans la formation de Ruth. Durant la fin du Protérozoïque Inférieur, les roches du Sokoman et les roches sous-jacentes se sont faillées et plissées. Les roches de la région de Schefferville sont essentiellement composées de quartz, d’oxydes et de carbonates de fer qui ont précipité chimiquement. Lors de sa formation, le minerai de la région de Schefferville était un

mineraï de fer taconitique pauvre en fer (25 à 30 % Fe). Durant le Mésozoïque, les roches chertreuses auraient subi un lessivage météorique qui a eu comme conséquence la diminution des rapports Si/Fe et Si/Mn afin de le rendre exploitable (60% de Fe; Leslie et Bourque, 1984). Le mineraï de Schefferville est caractérisé par deux sortes de minérais: le mineraï dit « soft ore » et le mineraï blocailleux, « rubble ore ». Les deux sortes de minérais diffèrent par leurs caractéristiques géologiques. Le « soft ore » est constitué d'hydroxydes (limonite et goethite) qui rendent la roche de couleur brune ocre, fragile et poreuse. Le « rubble ore » est quant à lui constitué principalement de goethite provenant de la fragmentation et de la cimentation du mineraï « soft ore » (Leslie et Bourque, 1984).

Problématique et méthodologie

Les environnements subarctiques du nord du Québec (Nunavik) sont des environnements fragiles qui suscitent un intérêt grandissant de la part des compagnies minières. En effet, le réchauffement climatique fait que ces régions sont de plus en plus accessibles et donc plus facilement exploitables. De plus, la demande en métaux par les sociétés des pays industrialisés et des pays en émergence, est en constante augmentation, ce qui accélère le processus d'exploitation de ces régions (Jenkin, 2011).

Rendre l'exploitation minière une activité respectueuse de l'environnement naturel est un devoir et un défi majeur pour notre société. Mieux comprendre les impacts potentiels permettra une meilleure gestion de ces environnements fragiles. Par exemple, en ayant une meilleure connaissance du fonctionnement du cycle géochimique en période d'exploitation minière, il sera plus facile de permettre aux écosystèmes de revenir à l'état naturel plus rapidement et de diminuer les impacts négatifs sur l'environnement. De plus, ce sujet est d'actualité depuis que le gouvernement du Québec a lancé le « Plan Nord », récemment rebaptisé « Le Nord pour tous », qui a comme but principal l'occupation et l'exploitation du Nord québécois (Plan Nord, 2011).

La région de Schefferville, où la compagnie Iron Ore Compagny (IOC) a exploité le sol entre les années 1940 et 1982 pour son mineraï de fer (Fe), est une région d'étude très intéressante à l'égard de l'impact environnemental par les activités d'exploitation minière (Barbeau, 1987). En effet, les études paléolimnologiques des lacs environnants de la ville permettront de comparer la géochimie de la période avant, pendant et après l'exploitation minière

(Gallon *et al*, 2006). Ceci constitue un avantage crucial pour la compréhension de l'évolution des conditions limnologiques et de la qualité de l'eau de notre région d'étude.

Sources et cueillette des données

D'un point de vue régional, nous disposons des données provenant du Système d'information Géominière du Québec-SIGEOM (MRN). Le MRN a échantillonné une grande partie des lacs de l'Orogène du Nouveau-Québec et établi la composition chimique des lacs autour de la ville de Schefferville

Deux carottes de sédiments des lacs Dauriat ($54^{\circ}48'17.52''N$, $66^{\circ}49'27.31''O$) et Oksana ($54^{\circ}47'35.85''N$, $66^{\circ}47'16.05''O$; Figure 3) ont été prélevées en 1999 (Laperrière *et al.*, 2008). Ces deux lacs ont été ré-échantillonnés durant la campagne de terrain qui a été effectuée entre le 19 et le 23 mars 2012, afin de compléter l'historique des dix dernières années et ainsi évaluer la dynamique et cinétique de retour de l'écosystème vers un potentiel état naturel. Ces données ont été recueillies par l'échantillonnage de deux lacs supplémentaires (Ridge ($54^{\circ}51'9.04''N$, $66^{\circ}55'1.84''O$) et Matemace ($54^{\circ}54'09.45''N$, $66^{\circ}48'44.75''O$; Figure 3), pour mieux différencier les sources de métaux actuels (réseau hydrographique, atmosphérique et urbain). Durant cette expédition, nous avons prélevé une carotte de sédiment par lac à l'aide d'un carottier à percussion (Aquatic Research Instruments). Chaque lac a été choisi pour les critères suivants:

- 1- le lac Ridge, pour sa proximité aux exploitations minières de sorte que ce lac ait intégré principalement les impacts de la mine.
- 2- le lac Matemace pour son éloignement aux exploitations minières et à la ville de Schefferville de sorte que ce lac ait plutôt intégré les impacts de la pollution atmosphérique (moyennes-longues distances) et de manière limitée les pollutions locales.
- 3- le lac Oksana pour son éloignement relatif aux exploitations minières de sorte que ce lac ait plutôt intégré les impacts de la pollution atmosphérique (plutôt proximale aux activités minières),
- 4- le lac Dauriat pour sa proximité à la ville de Schefferville de sorte que ce lac ait plutôt intégré les impacts de la pollution de la ville (eaux usées, essence, déchets municipaux, etc...).

Afin de déterminer la composition chimique et isotopique de différentes sources potentielles des métaux dans les lacs de la région de Schefferville, nous avons analysé des lichens épiphytes poussant dans les arbres (signal atmosphérique actuel sur la région d'étude), du minerai et des déchets miniers (signaux anthropiques liés à l'exploitation minière).

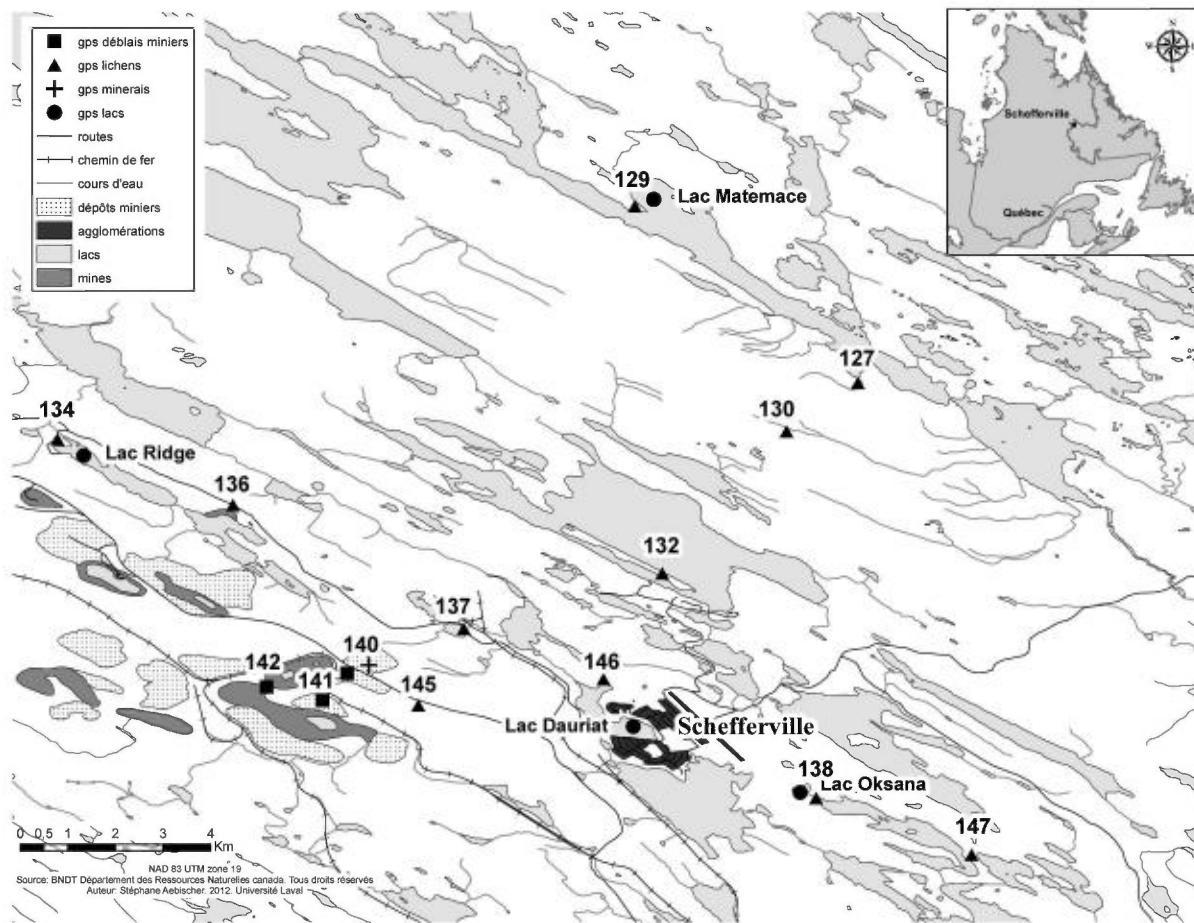


Figure 3. Ville de Schefferville avec la localisation des sites d'échantillonnage.

Analyses chimiques et isotopiques

Les analyses chimiques et isotopiques (Pb, Zn et Fe) ont été effectuées par le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS à Nancy (France). Les analyses chimiques ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre d'émission optique à couplage inductif (ICP-OES, Thermo Elemental IRIS radial pour les éléments majeurs)

et d'un spectromètre de masse à couplage inductif (ICP-MS Thermo Elemental X7) pour les éléments traces. Les analyses isotopiques ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre de masse à couplage inductif et multi-collection (MC-ICP-MS, Neptune Thermo Plus Scientific).

Avant l'analyse des éléments majeurs et traces, les échantillons ont été finement broyés (granulométrie inférieure à 80 microns) et soumis à une fusion alcaline au métaborate de lithium (LiBO_2) dans des proportions 200 mg (éch.) - 600 mg (LiBO_2) (Carignan et al, 2001). Le produit de fusion a par la suite été dissous dans une solution d'acide nitrique (1 molaire) jusqu'à une dilution d'un facteur 3000. Pour les analyses isotopiques, seul une attaque acide a été utilisée afin de minimiser les blancs de préparation. Les échantillons ont donc été dissous par différents acides (HNO_3 , HCl , HF et HBr) dans des bêchers en téflon et sur plaque chauffante à une température d'environ 100°C. Une fois dissous, les échantillons liquides sont passés à travers une colonne chromatographique contenant une résine échangeuse d'ions pour l'isolation des éléments traces d'intérêt (Pb, Zn, Fe). Après avoir été dissous et isolés, les éléments chimiques ont été introduits dans le spectromètre de masse MC-ICP-MS.

Le MC-ICP-MS permet de détecter les isotopes d'un ou plusieurs éléments d'un échantillon. Pour être introduit dans l'appareil, l'échantillon doit d'abord être sous forme liquide. Par la suite, un nébuliseur transforme la solution en aérosol, afin que celle-ci puisse être ionisée dans un plasma d'argon. Le plasma est généré dans une torche en quartz grâce à la circulation d'un courant alternatif de haute fréquence. Les ions de l'échantillon sont extraits de celui-ci pour être séparés en fonction de leur masse dans le secteur magnétique. C'est dans ce secteur que les ions sont séparés en fonction de leur rapport masse sur charge. Après avoir été sortis du secteur magnétique, les ions sont passés dans la partie du détecteur qui convertit les ions en signaux électriques, l'amplitude des signaux correspondant au nombre d'ions présents dans l'échantillon.

Comme pour l'ICP-MS, l'échantillon est généralement introduit dans l'ICP-OES sous forme liquide. Puis l'échantillon est transformé en aérosols via un nébuliseur et ionisé par un plasma d'argon. La technique d'analyse de l'ICP-OES est basée sur la détection et l'analyse de la radiation électromagnétique (ex: la lumière) qui est absorbée ou émise de l'ion ou de l'atome de l'élément d'intérêt. Une lentille convexe ou un miroir concave concentre les émissions et radiations émises du plasma à travers une fente, pour atteindre le dispositif de dispersion de longueur d'onde. Le dispositif de dispersion de longueur d'onde est généralement une grille faite de métal ou de verre. Cette grille comporte des rainures dont la densité varie de 600 à 4200 lignes

par millimètre. La lumière qui arrive sur cette grille avec un angle d'incidence (α) est diffractée en trois faisceaux avec des angles (β , θ et ω). Les radiations polychromatiques composées de plusieurs longueurs d'ondes émises par le plasma sont triées pour ne former qu'un faisceau monochromatique. Ce faisceau monochromatique est dirigé à travers diverses fentes pour éliminer toute longueur d'onde indésirable puis est capté par un détecteur (Cazes *et al.*, 2005).

Résultats et interprétation

Analyse des composantes principales des échantillons des lacs régionaux

Plus de 800 analyses de sédiments lacustres ont été extraits du SIGEOM dans un rayon de 50 km de la ville de Schefferville. Ces échantillons ont été prélevés en 1983 à l'aide d'une torpille s'enfonçant entre 20 et 50 cm de profondeur depuis l'interface eau-sédiments. L'échantillon est récupéré dans son entier et la composition chimique représente une fraction totale moyenne. Les données présentées ci-après proviennent des ré-analyses par ICP-MS des échantillons archivés (Maurice et Labbé, 2009).

Une analyse des composantes principales (ACP) a été effectuée sur la banque de données provenant du SIGEOM avec le logiciel statistique R (Figure 4).

L'analyse des composantes principales est une des méthodes d'ordination multi-variée utilisée en statistique. Le but des méthodes d'ordination est de représenter les données le long d'un nombre limité d'axes orthogonaux. Ces axes représentent les tendances principales des données, par ordre de décroissance. Comme pour les analyses de regroupement, les analyses d'ordination ne sont pas des vrais tests statistiques, dans le sens qu'aucune hypothèse n'est testée. Ce sont donc des méthodes descriptives. Les méthodes d'ordination sont pour la plupart basées sur la construction de vecteurs propres à partir d'une matrice d'association. Si l'on considère un jeu de données de $n \times p$ (n étant le nombre d'objets et p le nombre de variables), les n objets peuvent être représentés par un nuage de points dans l'espace de dimension p . Ce nuage de points ne présente en général pas une forme régulière mais plutôt allongée dans certains axes et aplati dans d'autres. L'orientation du nuage de points correspond à la direction où la variance est la plus grande, représentant le premier axe de l'ordination. Le prochain axe est celui avec la deuxième plus

importante variance, mais il faut également qu'elle soit orthogonale à la première, et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les axes aient été calculés (Brocard *et al.*, 2001).

L'ACP est une méthode d'ordination basée sur la méthode des vecteurs propres qui fonctionne sur des données brutes ou quantitatives. Elle indique les positions des objets dans un nouveau système de coordonnées (les composantes principales). Cette méthode fonctionne sur une matrice de dispersion qui peut être soit une matrice d'association incluant les variances et covariances ou les corrélations des variables. Dans une ACP, les variables sont représentées par des flèches (vecteurs propres) et les objets par des points. Finalement, étant donné que les variables du jeu de données sont exprimées dans différentes unités, l'ACP est effectuée sur une matrice de corrélation dont les variables ont été standardisées (Brocard *et al.*, 2001).

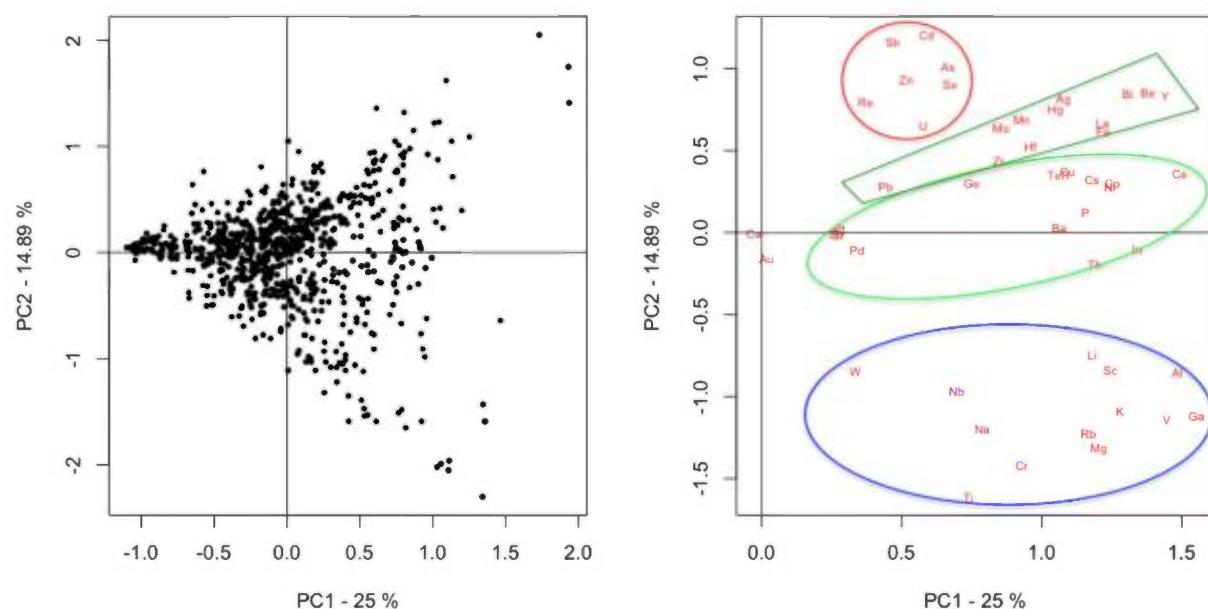


Figure 4 : Panneau de gauche : représentation des scores des 803 lacs des composantes principales un et deux. Panneau de droite : représentation des scores des éléments chimiques des composantes principales un et deux.

La représentation graphique des scores de la composante principale un et deux des 803 lacs (à gauche) et de leurs éléments chimiques (à droite), permet de classer les lacs en trois grands groupes (cadrant $++$ et $-/-$, $+-$ et $-/+$) et les éléments chimiques en trois groupes également (groupe 1 composé des éléments : Sb, Cd, Re, Zn, As, Se et U ; groupe 2 peut être divisé en deux sous-groupes. Sous-groupe 1 : Pb, Mo, Mn, Hg, Ag, Zr, Hf, Ge, La, Fe, Bi, Be, Y et sous-groupe 2 : Te, Tl, Cu, Cs, Co, Ni, Ge, Pd, P, Ba, In, Th, Sr, Sn et P. ; groupe 3 (Signature minérale

typique des argiles): W, Ti, Nb, Na, Cr, Rb, Mg, K, V, Ga, Al, Li et Sc. Le Ca et Au n'appartiennent à aucun groupe. Les éléments chimiques à l'intérieur de chaque groupe sont corrélés positivement entre eux. Par exemple, le Cd et le Zn (groupe 1) sont corrélés positivement, car ils sont chimiquement similaires. Les éléments chimiques du groupe deux sont corrélés positivement avec les éléments chimiques du groupe un, mais cette corrélation est moins prononcée avec les éléments du groupe trois. La corrélation entre les éléments des groupes trois et un est presque nulle, car l'angle des flèches des éléments de ces deux groupes est proche d'un angle orthogonal. Le Ca est corrélé négativement avec les éléments chimiques du groupe deux. De plus, la longueur de la flèche du Ca est plus courte que la majorité des autres éléments chimiques (excepté Au), ce qui montre sa plus faible importance pour l'ordination de sites dans le plan d'ordination.

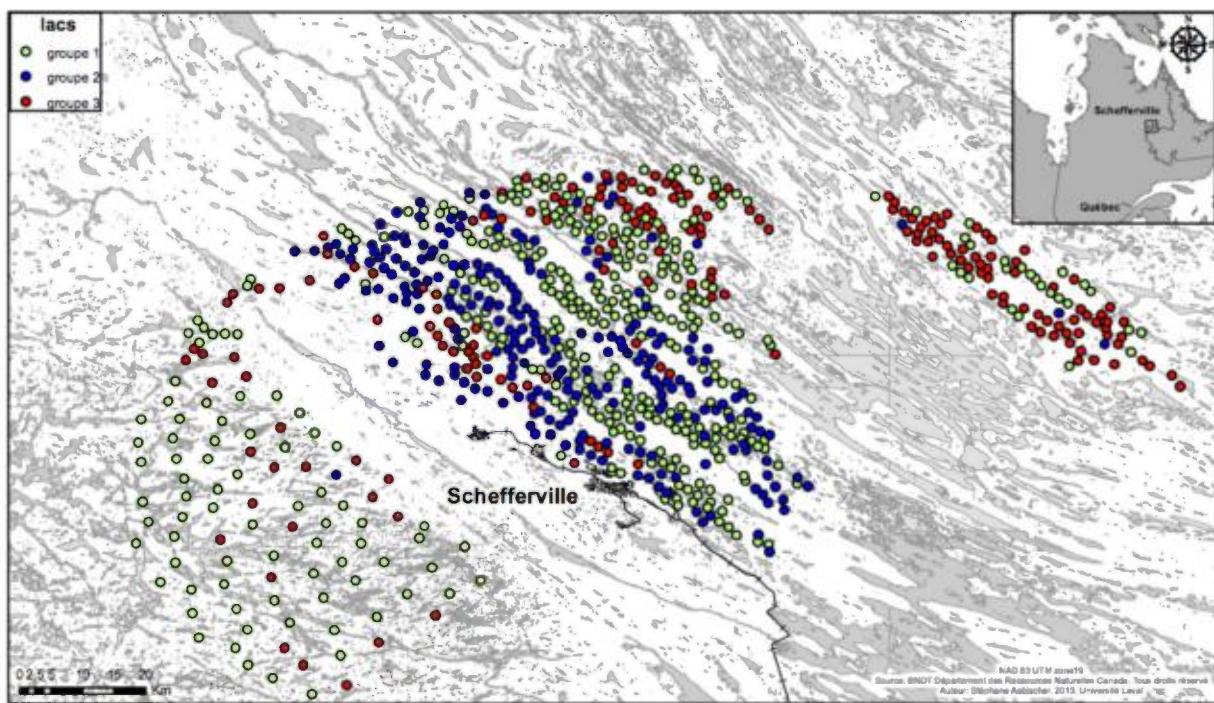


Figure 5: Visualisation des trois groupes de lacs, déterminés à l'aide de l'analyse ACP (Figure 4, panneau de gauche). Groupe bleu (+/-), groupe vert (+/+ et -/-) et groupe rouge (-/+). Le groupe en bleu est principalement présent dans la fosse du Labrador.

La représentation graphique des trois groupes de lacs identifiés grâce à l'ACP ne montre pas un effet anthropique minier sur la région de Schefferville (Figure 5). Ceci est probablement du à la méthode d'échantillonnage et à la nature d'échantillonnage régional. Le fait de prélever les

sédiments lacustres à l'aide d'une torpille où la totalité du sédiment récolté est mélangé rend impossible la conservation d'une chronologie sédimentaire. C'est la raison pour laquelle le groupe de lacs # 2 est localisé seulement dans la fosse du Labrador qui se distingue par une géochimie particulière liée à la nature du socle.

Les lichens épiphytes

Les lichens sont d'excellents indicateurs de la qualité de l'air et des sources de pollution, car les perturbations anthropiques ont un effet mesurable sur ces organismes. Ces effets se mesurent facilement, car ce sont des organismes avec un métabolisme lent qui gardent leurs "feuilles" (thalles) toute l'année (pérenne) et qui absorbent les particules atmosphériques de manière non sélective (Déruelle et Lallement, 1983). Dans cette étude, nous avons porté une attention particulière sur les lichens épiphytes (poussant sur un substrat végétal). Les lichens épiphytes se nourrissent exclusivement de poussières et d'eau atmosphérique. Ces lichens captent ces éléments grâce aux processus de dépositions sèches et humides (rosée et brouillard), de précipitations et d'absorptions gazeuses (Nash, 1996). Ne possédant ni cellulose ni stomates (contrairement aux plantes vasculaires), les lichens absorbent les éléments de l'atmosphère sur la totalité de leur surface. Les lichens captent les éléments nécessaires à leur croissance par des mécanismes de piégeage, d'absorption directe de gaz et d'échange d'ions (Nash, 1990).

Les lichens épiphytes ont été échantillonnés avec des gants pré-nettoyés et par la suite ont été placés dans des sacs avec fermeture étanche. Seulement les lichens poussant sur des jeunes branches d'arbres ont été récoltés, l'objectif étant d'étudier les lichens qui ont été exposés aux impacts atmosphériques des dernières années seulement.

Géochimie des lichens

Le facteur d'enrichissement (FE) permet d'évaluer l'origine des éléments chimiques se trouvant dans des composés organiques et inorganiques et se calcul de la façon suivante (Klos *et al.*, 2011):

$$\text{FE-Pb}_{\text{lichens}} = (\text{Pb/Al})_{\text{lichens}} / (\text{Pb/Al})_{\text{croûte}}$$

La raison de la normalisation sur l'aluminium (qui peut être remplacé par un élément représentatif de la croûte terrestre) repose sur le fait que l'Al qui entre dans l'atmosphère est rarement d'origine anthropique.

Des valeurs de FE proches de 1 indiquent une origine géogénique, tandis que des valeurs supérieures à 10 indiquent que 90 % de l'élément est d'origine anthropique. Dans la table 1 (Annexe) se trouvent les valeurs des concentrations de Pb et des FE en Pb des lichens épiphytes. Les valeurs des FE sont toutes supérieures à 10, indiquant une origine en Pb anthropique.

Une tendance à la diminution des concentrations de Pb dans les lichens épiphytes est observable lorsque la distance avec la ville de Schefferville et avec les mines de Schefferville augmente (Figure 6). Ceci indique que les activités anthropiques et/ou minières créent une pollution de Pb autour des mines et de la ville de Schefferville.

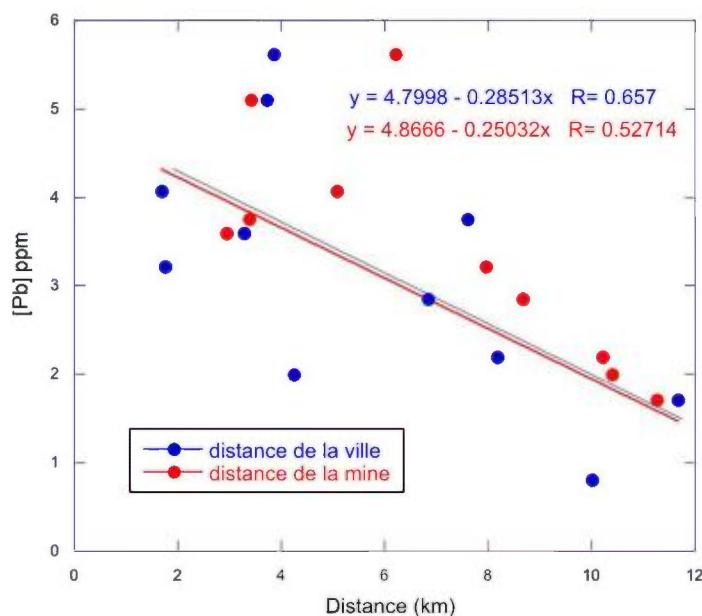


Figure 6: Concentration de Pb dans les lichens épiphytes en fonction de la distance avec la ville de Schefferville et des mines.

Isotopie des lichens

Les compositions isotopiques en $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ des lichens épiphytes de la région de Schefferville sont relativement homogènes (moyenne = 1.153 ; écart-type = 0.003), excepté les trois échantillons 127, 132 et 136 qui ont des valeurs de 1.21, 1.11 et 1.17, respectivement (voir Annexe, Tableau 1). L'homogénéité des valeurs isotopiques en Pb des lichens indique une source

constante en Pb. Les échantillons avec des valeurs extrêmes pourraient quand à eux, avoir subit une exposition aux aérosols différents des autres lichens échantillonnés (ex : couverture forestière, exposition aux vents, etc.) ou résulter d'un biais lié à l'âge des lichens. Une source ponctuelle locale pourrait également expliquer ces valeurs plus extrêmes. La valeur moyenne obtenue du rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ correspond à la valeur des émissions atmosphériques canadiennes provenant des industries ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1.150$; Carignan et Gariépy, 1995).

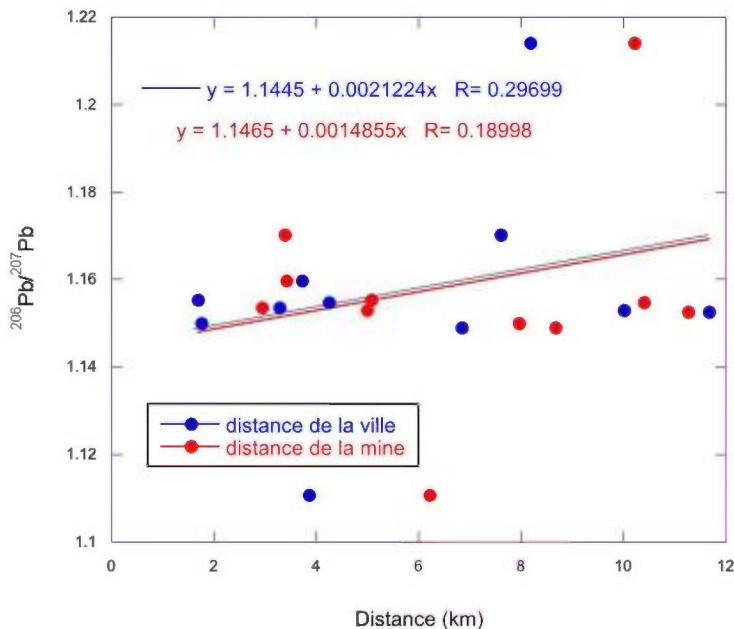


Figure 7: Rapport isotopique $^{206}/^{207}\text{Pb}$ dans les lichens épiphytes en fonction de la distance avec la ville de Schefferville et des mines.

La comparaison des valeurs du $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ des lichens épiphytes avec celles des sédiments du lac Oksana (Tableau 3) révèle que les rapports isotopiques du lac Oksana diminuent en remontant vers les couches sédimentaires les plus récentes, pour rapprocher les valeurs retrouvées dans les lichens épiphytes. Pour le lac Dauriat (Tableau 4), cette tendance est moins marquée, mais les valeurs isotopiques en Pb des sédiments de surface sont proches de celles obtenues pour les lichens épiphytes. Ceci indiquerait que durant la période post-mine (sédiments de surface), le Pb se trouvant dans les sédiments proviendrait principalement des dépositions atmosphériques.

Minerai et déblais miniers

Géochimie du minerai et déblais miniers

Les concentrations des éléments chimiques sont plus homogènes dans les déblais miniers que dans le minerai à cause des processus de broyage utilisés pour l'extraction du minerai (Table 2). Les concentrations en Fe du minerai sont très élevées entre 154'032 et 334'660 ppm, tandis que. Les déblais miniers ont des concentrations plus faibles (99'668 à 198'113 ppm). Les teneurs en Fe des sédiments lacustres des différents lacs étudiés sont inférieures à celles du minerai et des déblais miniers, sauf en période minière pour le lac Dauriat, où des concentrations maximales de 127'541 ppm ont été mesurées. Ceci s'explique par la proximité du lac Dauriat aux exploitations minières. Les teneurs en Fe des sédiments des lacs Oksana et Dauriat sont bien inférieures à celles en Fe des minerais et déblais miniers, variant entre 32'000 et 13'000 ppm et entre 60'000 et 43'000 ppm, respectivement.

Contrairement au Fe, les concentrations en Zn sont plus faibles dans le minerai (25 ppm ; parfois sous les limites de détections) et dans les déblais miniers (53-58 ppm) que dans les lacs étudiés (Tableaux 2, 3 et 4). Dans les sédiments du lac Dauriat, la teneur en Zn variait de 100 ppm en période pré-mine à 600 ppm en période minière, pour le lac Matemace la teneur en Zn variait de 1300 à 800 ppm, et pour le lac Oksana de 53 à 190 ppm. La teneur en Zn des sédiments lacustres est plus élevée que dans les roches locales (minerai) et les déblais miniers. L'érosion des roches et des déblais miniers en est probablement la cause principale, en lessivant principalement les métaux qui s'accumulent dans les lacs. L'accumulation du Zn par les organismes vivants peut également expliquer une teneur plus élevée du Zn dans les sédiments lacustres que dans les minerais et déblais miniers.

La concentration en Pb du minerai (3.45 – 7.95 ppm) est plus faible que celle mesurée dans les déblais miniers (15.76 – 21.56 ppm). Une hypothèse pouvant expliquer cette observation est qu'une partie une partie de Fe a été extraite du minerai, augmentant ainsi les concentrations des autres éléments chimiques dans les déblais miniers ;

Les teneurs en Pb des sédiments lacustres du lac Matemace sont proches de celles des déblais miniers et varient entre 17 et 21 ppm. Le lac Dauriat possède quand à lui des teneurs en Pb variant de façon considérable selon périodes. Durant la période pré-mine, les sédiments du lac

Dauriat montraient des valeurs (16 ppm) proches de celles des déblais miniers. En période minière, les concentrations en Pb étaient beaucoup plus élevées, avec un maximum de 140 ppm. En période post-mine, les teneurs diminuaient aux alentours de 100 ppm.

Isotopie du minerai et déblais miniers

Des analyses isotopiques en Pb ont été effectuées sur trois échantillons de minerais et trois échantillons de déblais miniers. Les valeurs en $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sont plus élevées dans les échantillons de déblais miniers ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 40.25 et 41.44) que dans les échantillons de minerais ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 37.37 et 37.97 (voir annexe, table 2)).

Les sédiments lacustres

Géochimie des sédiments lacustres

Le lac Dauriat a été choisi pour sa proximité par rapport à la ville de Schefferville. Les sédiments lacustres du lac Dauriat ont donc enregistré les perturbations anthropiques liées à la construction et au développement de la ville de Schefferville (Figure 8). Les concentrations (normalisées sur l'Al) de certains éléments chimiques (ex : Fe/Al, Pb/Al et Zn/Al) augmentent de manière importante en période minière (la normalisation par l'Al permettant de mieux mettre en évidence un effet anthropique, car l'aluminium a comme origine principale la lithosphère). A cette époque la ville ne disposait pas de système de traitement d'eaux usées. Ce déficit logistique serait une des causes principales de l'augmentation de la concentration des éléments chimiques en période minière. En période post-mine, les teneurs en métaux des sédiments lacustres diminuent mais sans atteindre les concentrations géogéniques, voire subissent d'autres augmentations, même après plus de 20 ans de cessation d'exploitation. Après l'exploitation, le retour au régime stationnaire de départ peut être variable avec une dynamique et une cinétique qui vont dépendre de plusieurs facteurs environnementaux (i.e. restauration des sites, conditions climatiques, géomorphologiques et végétation).

Le lac Oksana a été choisi pour sa proximité des exploitations minières. Les sédiments lacustres du lac Oksana ont donc enregistré les perturbations minières atmosphériques, liées à

l'extraction et aux transports du minerai de fer. La concentration de certains métaux augmente en période minière (ex : Zn/Al et Mg/Al). Ces augmentations proviennent en premier lieu des retombées atmosphériques minières. D'autres rapport élémentaires (ex : Fe/Al) diminuent en concentration en période minière, et d'autres restent stables (ex : Pb/Al). Pour les éléments dont les rapports restent stables, l'effet minier est peut-être caché par des teneurs élémentaires naturellement élevées.

Le lac Matemace a été choisi pour son éloignement de la ville de Schefferville et des exploitations minières. Les rapports des éléments chimiques (ex : Fe/Al, Pb/Al, Zn/Al et Mg/Al) ne varient pas ou peu (figure 8). Le lac Matemace semble donc être moindrement influencé par la ville et par les mines, comparé aux lacs Oksana et Dauriat.

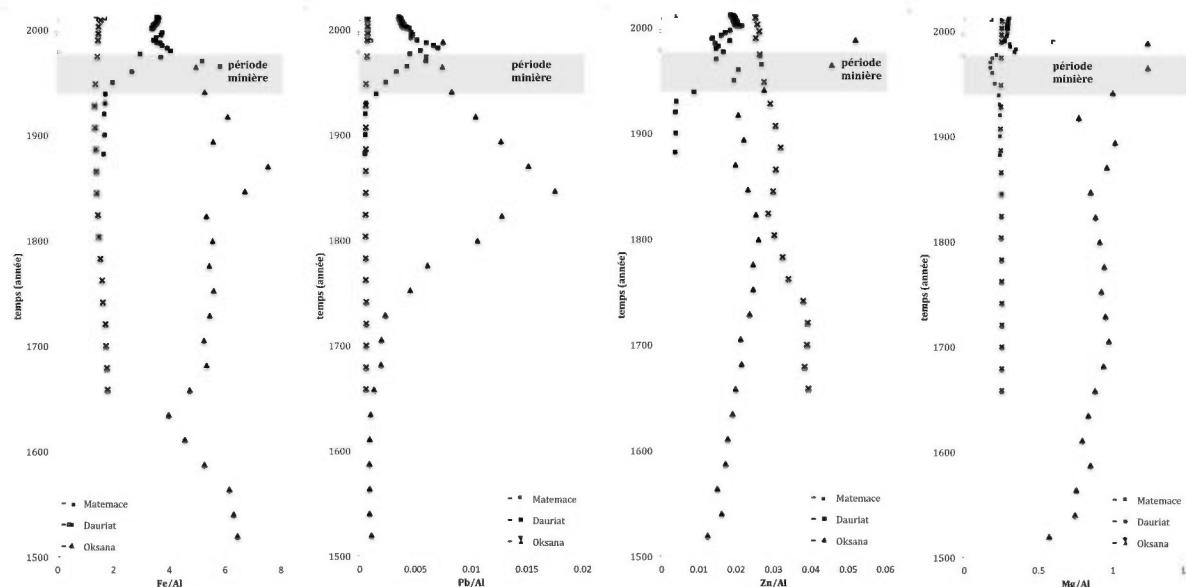


Figure 8 : Profils géochimiques (Fe/Al, Pb/Al, Zn/Al et Mg/Al) de quatre carottes sédimentaires provenant des lacs Dauriat (carré), Oksana (triangle), Matemace (croix).

En plus d'enregistrer des perturbations anthropiques différentes, les lacs sont géochimiquement différents. Les valeurs plus élevées des rapports Fe/Al, Pb/Al, Zn/Al et Mg/Al du lac Oksana sont la conséquence des concentrations plus faibles en Al des sédiments du lac Oksana, comparé aux autres lacs.

Le rapport Zr/Th renseigne principalement sur une variation des apports détritiques. Étant donné que le Zr et le Th sont tous deux des éléments contenus dans des minéraux d'origine détritiques, deux principaux changements d'apports semblent avoir eu un impact au cours des derniers 120

ans dans le lac Dauriat (Figure 9), le premier au début de la période minière et le deuxième vers la fin de la période minière. Ces changements en apports détritiques sont très probablement liés aux exploitations minières et à la construction et au développement de la ville de Schefferville. Les maximums/maxima observables entre les années 2000 à 2010 seraient probablement liés aux activités anthropiques de la ville de Schefferville (rénovation des routes, écoulement urbain, etc.).

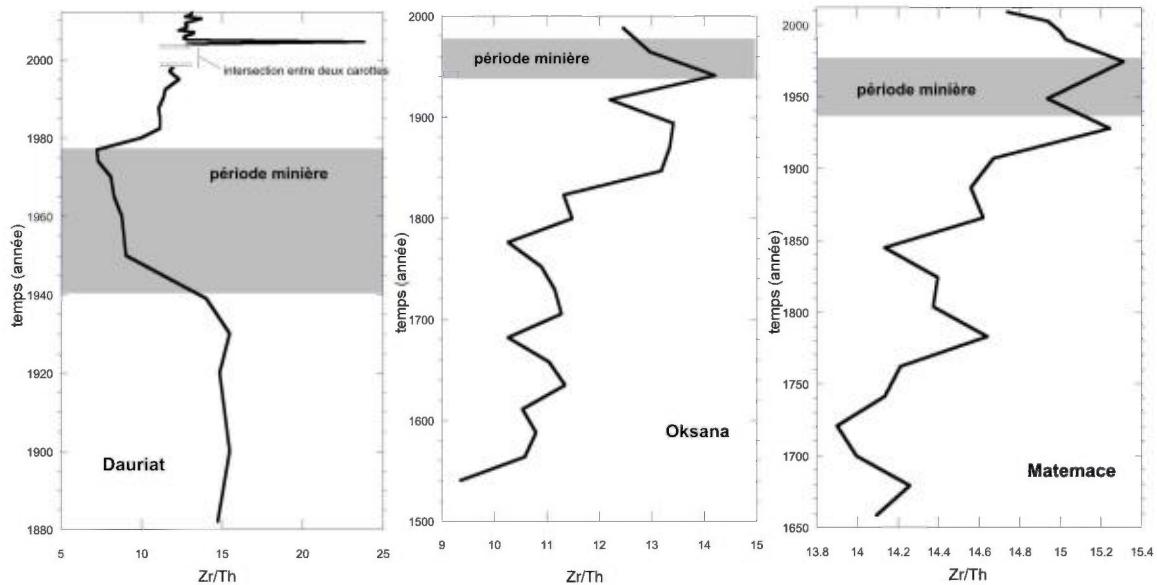


Figure 9 : Profils des rapports (Zr/Th) de quatre carottes de sédiments lacustres provenant des lacs Dauriat, Oksana, Matemace et Ridge.

Les profils des rapports de Zr/Th dans les sédiments des lacs Oksana et Matemace se ressemblent beaucoup (Figure 9). Au fil des années, plusieurs événements d'origine naturelle ont créé des variations dans les apports détritiques de ces deux lacs. Dans les deux profils est également visible la période minière, durant laquelle le rapport Zr/Th atteint sont maximum pour ensuite diminuer en période post-mine.

Pour chaque lac (Dauriat, Oksana, Matemace et Ridge) nous avons effectué des ACP sur les concentrations d'une cinquantaine d'éléments chimiques mesurés dans les carottes de sédiments. Les scores de la composante principale 1 de ces ACP ont été représentés graphiquement en fonction de la profondeur (Figure 10). Une modification de l'orientation de la courbe indique que la géochimie du lac a changé soit par un phénomène naturel (érosion accrue, feux de forêt, etc.) soit par des perturbations anthropiques (construction d'une route, pollution, etc.). Dans les profils des quatre lacs étudiés, la période de transition entre la période pré-mine à

mine est bien évidente. Par contre, la transition entre la période mine à post-mine est moins visible, ce qui indique que le milieu limnologique n'est pas encore revenu à son état naturel, mis à part pour le lac Dauriat où une légère augmentation de la CP1 est observable. Un "effet mine" résultant des retombées atmosphériques est donc bien visible dans les sédiments lacustres de la région de la ville de Schefferville.

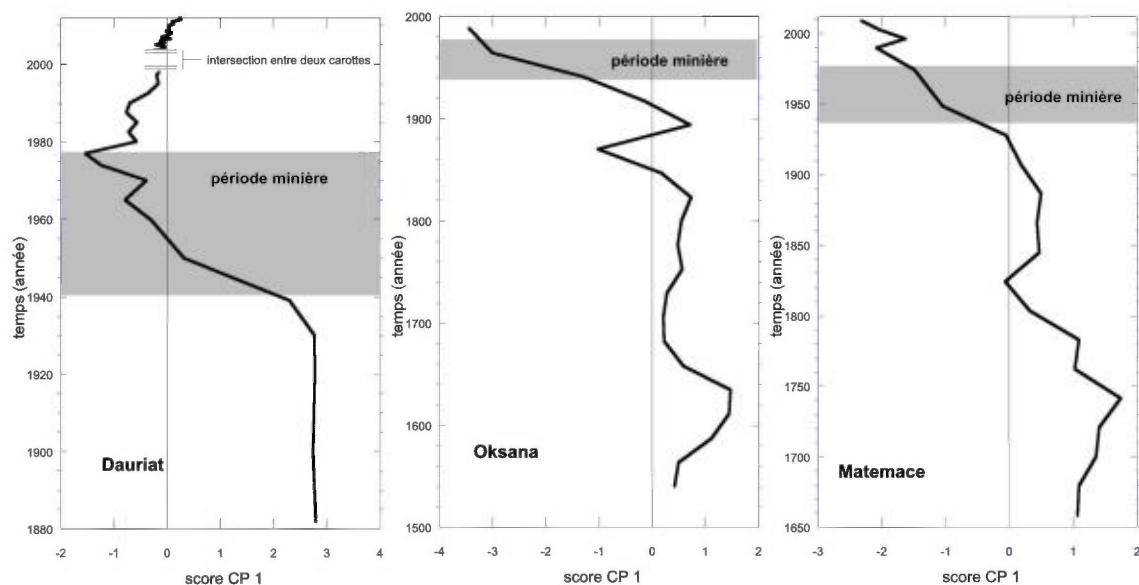


Figure 10 : Scores de la composante principale 1 obtenue à partir d'une ACP effectuée sur les concentrations d'éléments chimiques, exprimés en fonction de la profondeur pour les lacs Dauriat (à droite), Oksana (au milieu) et Matemace (à gauche).

Géochimie isotopique (Pb, Zn et Fe) des sédiments lacustres (fractions totales)

Isotopes du Pb

Le Pb possède quatre isotopes majeurs de masses 208, 206, 207 et 204 ayant des abondances de 52, 24, 23 et 1 %, respectivement. L'isotope de masse 204 est le seul isotope stable dont l'abondance ne change pas. Les isotopes de masse 206, 207 et 208 sont des isotopes radiogéniques issus de la chaîne de désintégration radioactive de l'uranium 238 et 235 et du thorium 232, respectivement. L'analyse isotopique du Pb est un moyen efficace pour déterminer les sources et les voies empruntées par les polluants, car la composition isotopique du Pb ne subit pas de fractionnement significatif durant les processus physico-chimiques habituels.

Les analyses des sédiments des lacs Dauriat et Oksana montrent des variations isotopiques du Pb le long de la carotte de sédiment, ceci démontrant bien la contribution de différentes sources au cours du temps dans les deux lacs (Figure 11). La variation du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des permet de documenter des changements des sources sédimentaires (Figure 11). Une diminution marquée du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est mise en évidence au début de la période d'exploitation minière pour le lac Dauriat. Cette diminution s'explique par l'apport d'une nouvelle source en Pb qui provient de la ville de Schefferville (source urbaine minière, incluant eaux usées, machines, essences, etc.). Ce nouvel apport est aussi illustré par l'augmentation du flux de Pb durant cette période, tel qu'illustré par l'augmentation du rapport Pb/Al.

Une diminution, rapidement suivie d'une augmentation du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est observable dans la carotte du lac Dauriat, juste au début de la période post-mine. Ce creux dans le profil du $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ indique un changement court et rapide de source en Pb. Les valeurs en $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de cette période (1960-1980) sont relativement faibles ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.381 \pm 0.067$, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1.138 \pm 0.001$) et sont proches des valeurs mesurées à la fonderie de Rouyn-Noranda (R-N ; $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} \approx 0.993$). Toutefois le plomb provenant de cette usine n'a pas été détecté dans un lac situé à 300 km de la fonderie (Gallon *et al.*, 2006). La ville de Schefferville étant située à plusieurs centaines de kilomètres de R-N. Ce plomb proviendrait plutôt des activités anthropiques liées à la ville de Schefferville, mais ne serait pas de même origine que le Pb de la ville de Schefferville en période minière.

La forte augmentation du rapport Pb/Al pendant la période minière et durant le début de la période post-mine est suivi d'une diminution importante dans les sédiments de surface. Ce pic de Pb/Al marque l'apogée du Pb atmosphérique au début des années 1980, alors que la décroissance s'explique par l'interruption de l'ajout de Pb dans l'essence automobile en Amérique du Nord. Pendant cette période post-mine, le rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des sédiments de surface reste inchangé ou ne se modifie pas, indiquant une source stable en Pb indépendamment du flux sédimentaire. Les valeurs isotopiques en Pb des sédiments de surface du lac Dauriat ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{Dauriat}} = 37.727 \pm 0.011$) sont comparables aux valeurs des dépositions atmosphériques de longue distance du Pb, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.666$; Pb industriel canadien) mesurées dans les lichens échantillonnés dans d'autres régions du nord du Québec (Carignan *et al.*, 2002).

Une augmentation marquée du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ à la base de la carotte du lac Oksana indique un changement de source sédimentaire en Pb, notamment d'une source géogénique locale (primaire) à une source d'origine inconnue, possiblement une autre source géogénique locale (secondaire) associée à des processus d'érosion.

En période minière, le rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ne change pas dans les sédiments du lac Oksana indiquant une source stable en Pb. Les valeurs isotopiques en Pb des sédiments de surface (1850-2000) du lac Oksana ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{Oksana}} = 37.900 \pm 0.026$) sont comparables aux valeurs des dépositions atmosphériques de longue distance du Pb. L'impact des retombées atmosphériques minières est soit masqué par le Pb atmosphérique de longue distance, soit indécelable dans nos analyses à cause d'une résolution temporelle trop grossière.

La forte augmentation du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dans les premiers centimètre de sédiments de surface (2000-2012) du lac Oksana indique un nouveau changement de source sédimentaire.

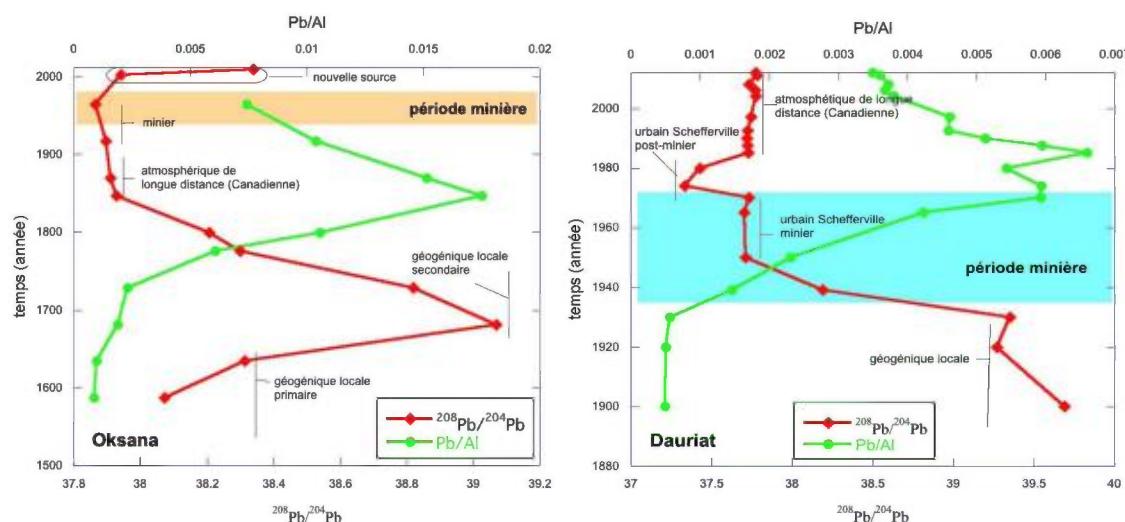


Figure 11. Variation de la composition chimique (Pb/Al) et isotopique ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) dans les sédiments des lacs Dauriat et Oksana en période pré-mine, mine et post-mine. Le panneau de gauche est celui du lac Oksana, celui de droite du lac Dauriat.

Les variations des rapports $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $1/\text{Pb}$ des sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat permettent d'identifier huit sources; quatre sources différentes de Pb pour chaque lac (Figure 12). Dans ce diagramme, un mélange de deux sources de compositions distinctes forme une ligne droite.

Les échantillons se situant au milieu de cette droite, auront une composition isotopique qui résulte d'un mélange de deux sources (compositions isotopiques différentes). Ces deux sources sont représentées aux extrémités de cette droite.

Dans le cas du lac Oksana, un apport de Pb géogénique local primaire durant la période pré-mine (de composition différente du lac Dauriat) est suivi d'un apport de Pb géogénique local secondaire. Le Pb retrouvé en période minière provient d'un mélange de Pb provenant, des dépositions atmosphériques de longue distance et des mines (même composition isotopique que le mineraï, mais de concentration plus élevée). En période post-mine, le Pb provient des retombées atmosphériques de longue distance.

Dans la carotte du lac Dauriat, les valeurs du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de la période pré-mine sont identiques à celles mesurées dans les pollutions atmosphériques émanant de la combustion du charbon et du bois, qui étaient la source principale de Pb dans l'atmosphère entre les années 1850 et 1930 (Gallon *et al.*, 2005). Si le Pb retrouvé en période pré-mine dans les sédiments du lac Dauriat provenait de la combustion du charbon et du bois, la même source aurait du être retrouvée durant la période correspondante dans le lac Oksana. Or, ce n'est pas le cas, et il est donc plausible que le Pb analysé en période pré-mine dans le lac Dauriat proviendrait de sources géologiques locales. Du Pb d'origine urbaine minière (mélange mineraï et déblais miniers) a été identifié en période minière. En période post mine c'est un mélange de Pb provenant des retombées atmosphériques de longue distance et du Pb d'origine urbain post-minière qui a été identifié.

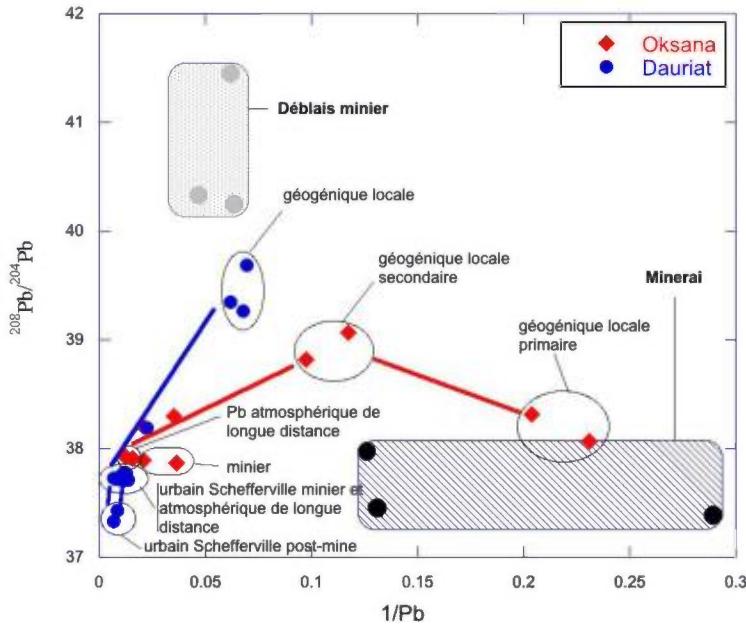


Figure 12. Variation dans les rapports $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $1/\text{Pb}$ du mineraï et déblais minier et dans les sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat.

Isotopes du Zn

La sphalerite (ZnS) et la smithsonite (ZnCO_3) sont les deux sources primaires de Zn dans la géosphère. Le Zn est également un élément important dans la biosphère, où il joue un rôle essentiel dans l'activité métabolique de certaines enzymes. Le Zn possède cinq isotopes stables de masse 64, 66, 67, 68 et 70 ayant des abondances de 48.63, 27.90, 4.10, 18.75 et 0.62 %, respectivement (Cloquet *et al.*, 2008).

Contrairement au Pb, le Zn subit des fractionnements isotopiques lors de processus physico-chimiques. Il est donc moins évident de retracer les sources de sédimentation, mais en couplant les analyses isotopiques du Pb avec celles du Zn, il est possible d'obtenir des informations pour retracer ces sources. Les valeurs isotopiques du Zn varient de façon moins systématique que celles du Pb. Les valeurs $\delta^{66}\text{Zn}$ des sédiments du lac Oksana sont plus positives que celles du lac Dauriat (Figures 13 et 14), une différence qui pourrait être expliquée par une variation dans la géologie locale des bassins versant des deux lacs. Même si les deux lacs sont

distant de seulement quelques km (≈ 4 km), l'orientation nord-nord-ouest des unité géologiques de l'ONQ fait en sorte que la composition des bassins versant de ces deux lacs est différentes.

Une diminution du $\delta^{66}\text{Zn}$ au début de la période minière dans les sédiments du lac Oksana démontre qu'il y a eu un changement de source sédimentaire en Zn durant l'exploitation minière (retombées atmosphériques). Il n'est toutefois pas possible d'identifier un changement de source sédimentaire à partir du profil du $\delta^{66}\text{Zn}$ dans la carotte du lac Dauriat, les barres d'erreurs se chevauchant. Pourtant, la comparaison des rapports en Zn/Al fait ressortir que l'écosystème du lac Dauriat est beaucoup plus perturbé que celui du lac Oksana à cause de sa localisation en plein milieu de la ville de Schefferville.

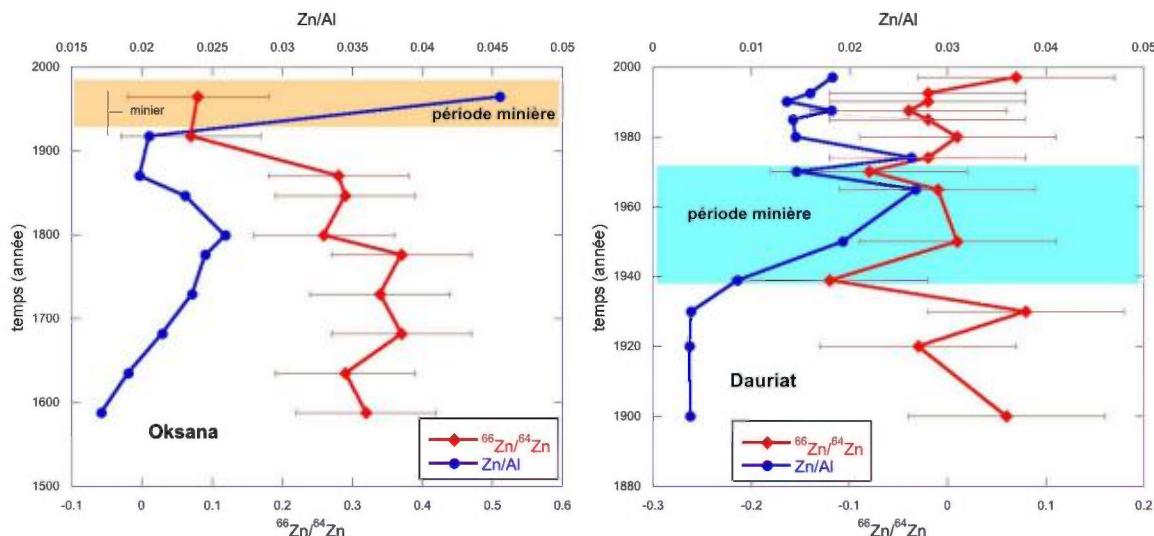


Figure 13. Variation de la composition chimique (Zn/Al) et isotopique ($\delta^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$) dans les sédiments des lacs Dauriat et Oksana en période pré-mine, mine et post-mine. Le panneau de gauche est celui du lac Oksana, celui de droite du lac Dauriat.

Différentes périodes peuvent être associées à différentes compositions isotopiques et concentrations en Zn (Figure 14). Dans le cas du lac Oksana, en période pré-mine la composition isotopique en Zn reflète la géologie locale et les dépositions atmosphériques de longue distance. En période minière, la composition isotopique en Zn est plus faible qu'aux autres profondeurs et reflète l'impact des mines (retombées atmosphériques). À l'opposé, au lac Dauriat une période pré-mine avec une composition isotopique reflétant une géologie locale différente est en contraste avec des périodes minière et post-mine qui se distinguent par une composition isotopique reflétant les perturbations anthropiques (mines) et urbaines.

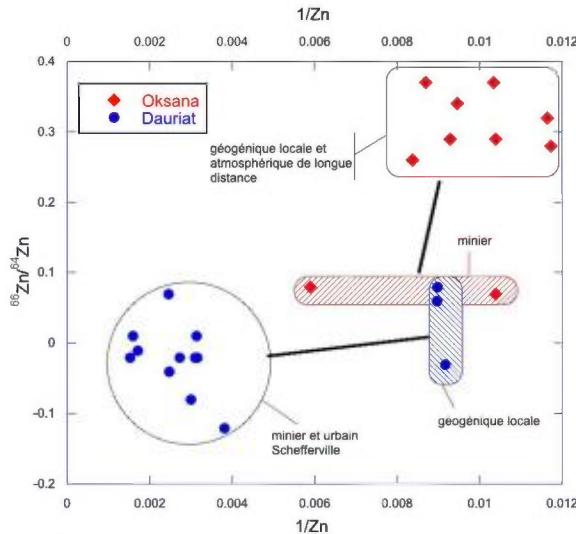


Figure 14. Variation des rapports $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ vs $1/\text{Zn}$ dans les sédiments lacustres des lacs Oksana (losange rouge) et Dauriat (rond bleu).

Isotopes du Fe

Le fer est le sixième élément le plus abondant dans l'univers et représente 35 % de la masse terrestre. Le cycle du fer est un cycle biogéochimique où sont couplées des réactions d'oxydo-réduction (Gargaud, 2011). Dans la nature, le fer se retrouve sous les états d'oxydation +2 et +3. Le Fe^0 n'existe pas naturellement, mais uniquement comme produit secondaire d'intervention humaine, comme les activités de fonderie de fer.

Le fer atmosphérique provient pour 95% des aérosols minéraux et des poussières du désert, les 5% restants étant fourni par l'industrie, les biocarburants et la combustion de biomasse. Les éruptions volcaniques représentent une source épisodique de fer atmosphérique. Comme pour le zinc et le plomb, le fer est retiré de l'atmosphère via des dépositions humides et sèches (Mahowald *et al.*, 2009).

Dans les environnements aquatiques, le fer se retrouve sous deux formes ioniques : Fe^{3+} (ions ferriques) lorsque le potentiel redox est élevé (conditions oxiques) et Fe^{2+} (ions ferreux) quand le potentiel redox est bas (conditions anoxiques). Lorsque les conditions du milieu aqueux passent d'anoxique à oxique, l'ion Fe^{2+} devient Fe^{3+} grâce à l' O_2 qui accepte des électrons. L'ion ferrique en milieux aqueux va se complexer avec un groupement hydroxyle pour former de l'hydroxyde de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), qui précipite rapidement (Chapelle, 2001).

Le Fe de numéro atomique 26 possède quatre isotopes stables de masse 54, 56, 57 et 58

ayant des abondances de 5.845, 91.754, 2.1191 et 0.2819 %, respectivement.

Comme pour le Zn, le Fe subit des fractionnements isotopiques lors de processus physico-chimiques. Retracer les sources de sédimentations est donc moins plus complexe, mais possible en corrélant les analyses de Fe avec celles du Pb.

Les valeurs isotopiques du Fe varient de manière plus marquée dans les sédiments du lac Dauriat que dans le lac Oksana (Figure 15). Une tendance à la diminution du rapport $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ est observable en période minière au lac Oksana (Figure 15). En période pré-mine, les variations isotopiques en Fe ne sont pas significatives ce qui rend donc impossible l'identification des différentes sources sédimentaires.

Comme pour le Zn, les valeurs $\delta^{56}\text{Fe}$ du lac Oksana sont supérieures à celles du lac Dauriat en raison des bassins versants de composition lithologique différente. Une diminution marquée du rapport $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ au lac Dauriat est observable en période minière, indiquant un changement de source de Fe entre la période post-mine à la période minière (Figure 15). La diminution du rapport $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ est corrélée avec l'augmentation du rapport Fe/Al et correspond à un apport important de Fe de la ville de Schefferville (eaux usées, machines, etc.). Le changement brusque d'orientation du rapport $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ en période post-mine est indicatif d'une nouvelle source de Fe dans le lac Dauriat, représentant possiblement les retombées atmosphériques de longue distance.

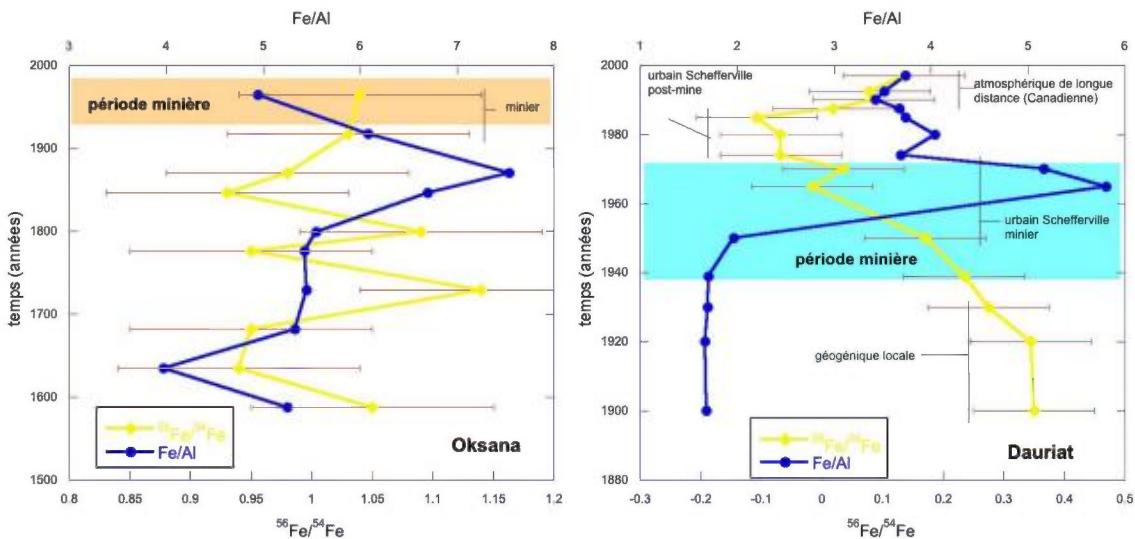


Figure 15. Variation de la composition chimique (Fe/Al) et isotopique ($^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$) dans les sédiments des lacs Dauriat et Oksana en période pré-mine, mine et post-mine. Le panneau de gauche est celui du lac Oksana, celui de droite du lac Dauriat.

Comme pour le Zn, il est possible de délimiter différentes périodes associées à différentes compositions isotopiques et concentrations pour le Fe (Figure 16). Des valeurs plus faibles en $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ au lac Dauriat sont observables en période minière, comparé aux valeurs obtenues en période pré-mine qui correspondent à la géologie locale. Il est impossible de détecter des changements de source sédimentaires dans le cas de la carotte du lac Oksana.

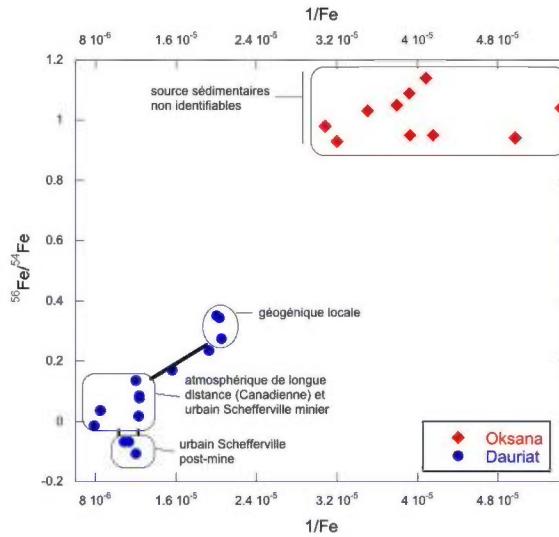


Figure 16. Variation des rapports $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ vs $1/\text{Fe}$ dans les sédiments lacustres des lacs Oksana (losange rouge) et Dauriat (rond bleu).

Interprétation sur la base des isotopes de Pb, Zn et Fe

Les trois diagrammes tri-isotopiques (Figure 17) ont été construits à partir de rapports isotopiques provenant de trois éléments chimiques (Fe, Pb et Zn) différents, permettant ainsi d'identifier les différentes sources de sédimentation. Pouvoir identifier les sources sédimentaires à l'aide de trois éléments chimiques permet de s'assurer de la validité des sources identifiées.

Quatre sources sédimentaires ont été identifiées pour le lac Oksana: une source géogénique locale primaire, une source géogénique locale secondaire, une source atmosphérique de longue distance provenant des industries canadiennes en période pré-mine (1587-1939), et une source minière en pleine période minière (1939-1977).

Quatre sources sédimentaires ont été identifiées pour le lac Dauriat : une source géogénique locale en période pré-mine (1900-1939), une première source urbaine en période minière (1939-1977), une deuxième source urbaine (source urbaine post-mine), et une source atmosphérique de longue distance en période post-mine (1977-1997).

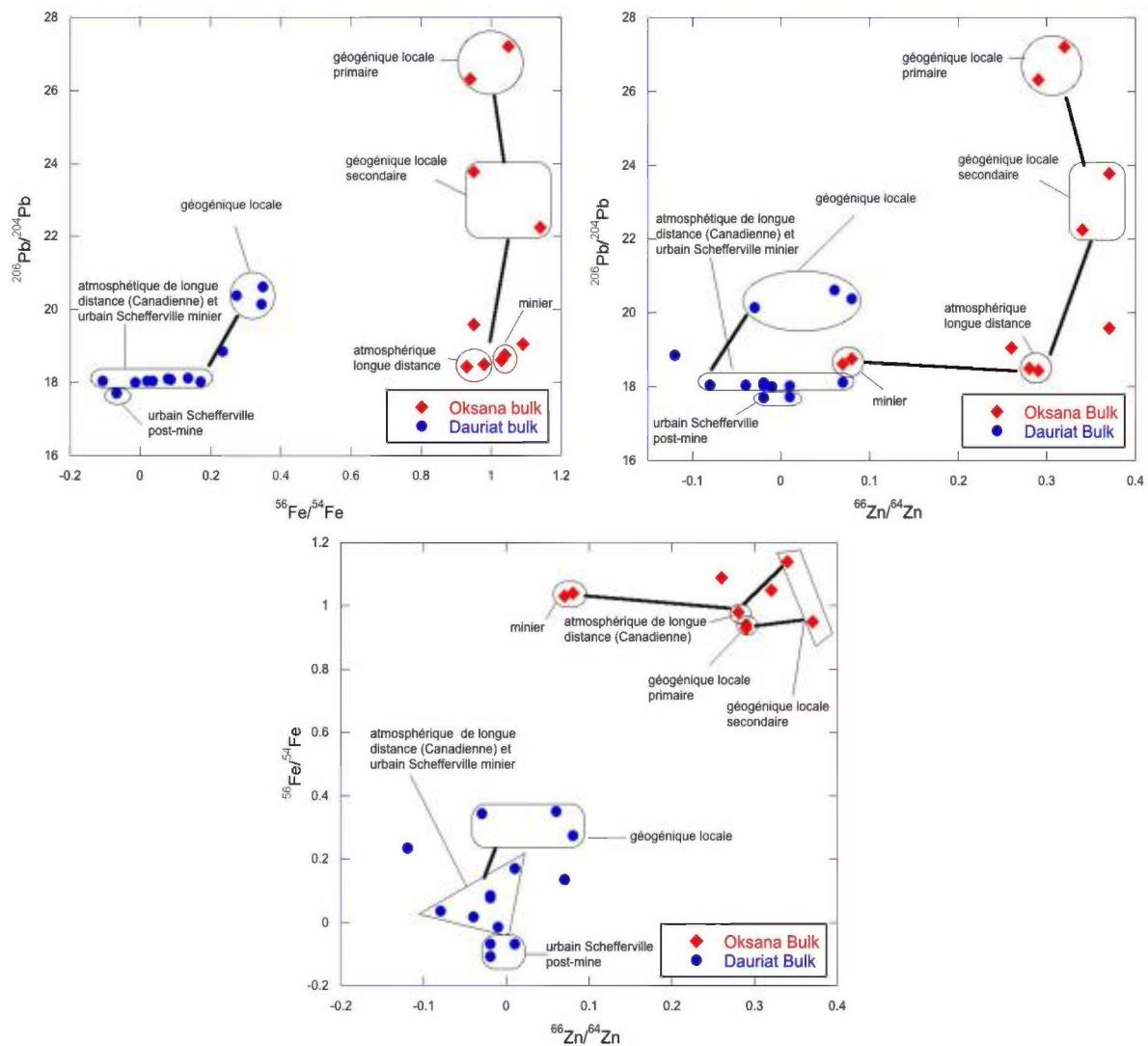


Figure 17 : Diagramme tri-isotopique $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ (en haut à gauche) et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ (en haut à gauche) et $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ vs $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ (en bas au centre).

Les analyses isotopiques (Fe, Pb et Zn) et géochimiques suggèrent que le lac Dauriat a principalement été perturbé par la construction et le développement de la ville de Schefferville. Les perturbations liées aux exploitations minières sont probablement masquées par les perturbations anthropiques urbaines. Dans le cas du lac Oksana, un effet des exploitations est visible en période minière mais plus faible qu'anticipé. Ces analyses démontrent également qu'il est difficile d'interpréter de manière précise les impacts des exploitations minières sur les lacs de

la région, étant donné les nombreuses conditions géologiques à prendre en considération reliées à la complexité de l'ONQ, conditions qui peuvent varier grandement d'un site à l'autre.

Les lixiviations

Géochimie isotopique (Pb, Zn et Fe) et géochimie des fractions sédimentaires lixivierées

Des expériences de lixiviations ont été effectuées sur les sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat. La lixiviation est une technique d'extraction séquentielle des ions métalliques provenant de différentes phases (Filgueiras, 2002).

Ces expériences de lixiviation nous ont permis de séparer ces métaux en cinq grands groupes: la fraction échangeable, la fraction carbonatée, la fraction liée aux hydroxydes de Fe-Mn, la fraction liée à la matière organique et la fraction résiduelle. Par manque de temps, seules les fractions liées à la matière organique (MO), aux oxydes de Fe-Mn (Ox) et résiduelles ont été analysées pour la géochimie et l'isotopie du Pb et Zn.

Les profils des bilans massiques du Pb du lac Oksana montrent que la phase Ox est plus riche en Pb que la phase MO (Figure 18). En période minière, le pourcentage de Pb se trouvant dans la phase MO diminue, mais augmente dans la phase Ox. Deux explications non exclusives peuvent être proposées : la MO est probablement moins présente ou moins active en période minière et la formation d'oxydes est favorisée en période minière. Une plus grande quantité de Pb est piégée par les oxydes, donc logiquement il reste moins de Pb disponible pour la MO.

Les bilans massiques ne devraient pas dépassé les 100 %, car seulement deux composantes du bilan massique ont été mesurées (MO et Ox). Le 100 % devrait être atteint en sommant la quantité de Pb se retrouvant dans les différentes fractions lixivierées (total = MO, Ox, résiduel, échangeable et carbonaté).

Les valeurs du bilan massique pour la fraction Ox et total (Ox + MO) à 3 cm ne sont pas à prendre en compte, car elles sont trop élevées (supérieur à 100 %). Ceci est certainement le résultat d'une erreur de manipulation ou d'une contamination.

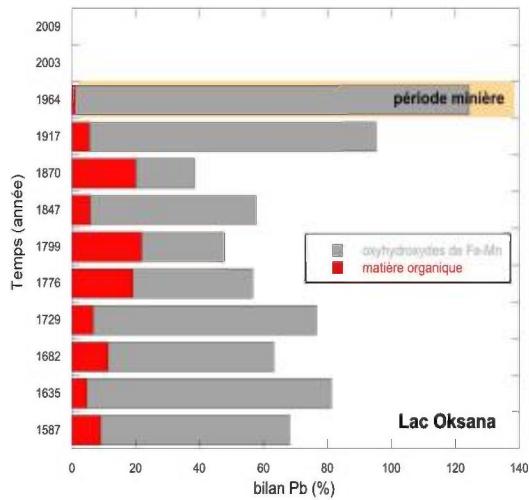


Figure 18 : Variation du bilan massique en Pb des fractions sédimentaires (matière organique, oxyhydroxydes de Fe-Mn) dans la carotte du lac Oksana.

Les profils des fractions sédimentaires (MO, Ox et total) du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ du lac Oksana suivent les mêmes tendances (Figure 19). De la surface jusqu'aux années 1800, les trois profils se chevauchent, indiquant une source constante en Pb (Pb d'origine atmosphérique). A partir de 1800, le profil de la fraction liée à la MO et celle liée aux Ox se décroche de la fraction totale et ceci de manière croissante jusqu'à la base de la carotte de sédiments. Ceci indique qu'avant 1800, les phases Ox et MO utilisent une source de Pb différente d'une ou de plusieurs autres phases sédimentaires (ex : carbonatée, échangeable et/ou résiduelle).

Par manque de temps et de matériel sédimentaire, seul une partie des résidus a pu être analysée. Les valeurs des résidus montrent un haut degré de cohérence avec les bilans de masses.

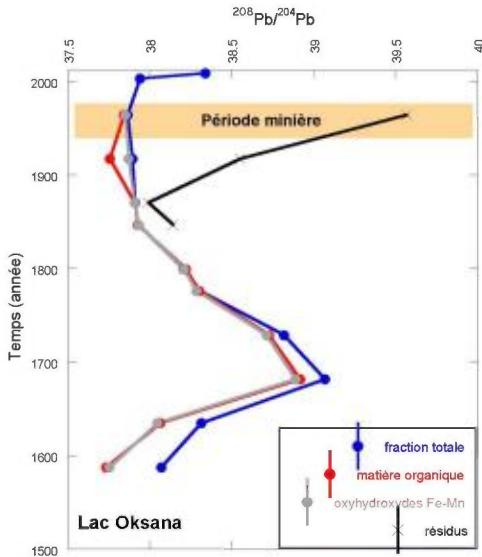


Figure 19 : Variation des rapports isotopiques $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de la fraction sédimentaire liée à la matière organique, aux oxyhydroxydes de Fe-Mn et de la fraction totale dans la carotte du lac Oksana.

Les profils des bilans massiques du Zn (MO et Ox) du lac Oksana suivent les mêmes tendances (Figure 20). Les bilans massiques de ces deux phases augmentent entre les années 1600 à 1870, pour ensuite diminuer en période minière durant laquelle le bilan massique du Zn de la phase MO est quasi nul. Il est possible que la forme sous laquelle se trouve le Zn ne puisse pas être absorbée par la MO.

Comme pour le Pb (Figure 18), la phase Ox est plus riche en Zn que la phase MO. On peut constater également qu'en 1870, une augmentation du bilan massique en Zn de la MO correspond à une diminution du bilan massique pour la fraction Ox. Ceci pourrait être le résultat d'une augmentation de la productivité biologique (phytoplancton lacustre) qui est en compétition avec le Zn capté par la phase Ox.

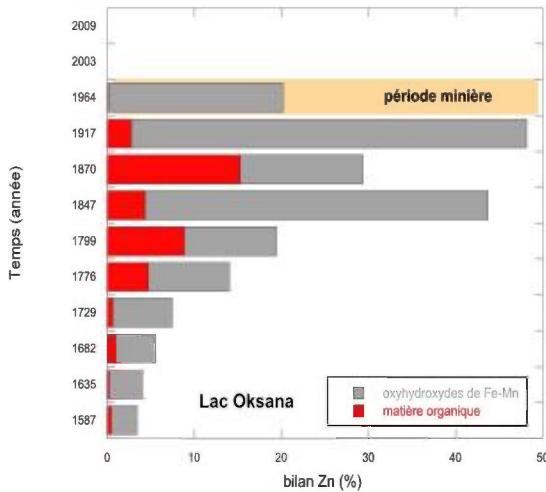


Figure 20 : Variation du bilan massique en Zn des fractions sédimentaires (matière organique, oxyhydroxydes de Fe-Mn) dans la carotte du lac Oksana.

Les profils du $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ des fractions sédimentaires (MO, Ox et total) du lac Oksana suivent les mêmes tendances (Figure 21). On constate une diminution du rapport isotopique $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ avant le début de la période minière indiquant un changement de source sédimentaire dans le lac Oksana. Ceci signifie qu'en période minière une nouvelle source de Zn provenant probablement des mines (atmosphérique miniers) affecte les processus de sédimentation dans le lac Oksana.

Le profil de la fraction liée à la MO est décalé d'environ 0.28 ‰ par rapport à celui de la fraction totale et celui lié aux Ox. La formation des oxydes créerait ainsi un fractionnement isotopique positif (préférant utiliser les isotopes lourds du Zn) et ferait en sorte que la fraction liée à la MO adsorberait du Zn plus léger. De plus, il est connu que l'activité biologique assimile de préférence les isotopes légers (Gelabert *et al.*, 2006), alors que les mécanismes d'adsorption en général privilégient l'adsorption des isotopes lourds (Cloquet *et al.*, 2008).

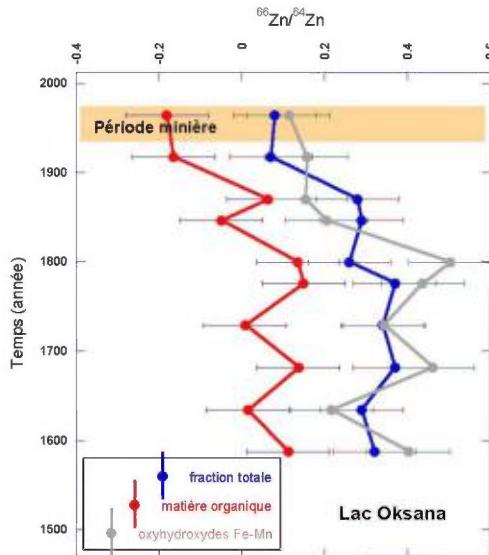


Figure 21 : Variation des rapports isotopiques $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ de la fraction sédimentaire liée à la matière organique, aux oxyhydroxydes de Fe-Mn et de la fraction totale dans la carotte du lac Oksana.

Le graphique des bilans massiques du Pb du lac Dauriat (Figure 22, à droite) montre qu'un apport important de Pb anthropique est survenu dans le lac Dauriat durant la période minière, sans avoir été incorporé dans la fraction sédimentaire appartenant à la MO et aux Ox. Ce plomb a probablement été incorporé dans la fraction échangeable ou résiduelle.

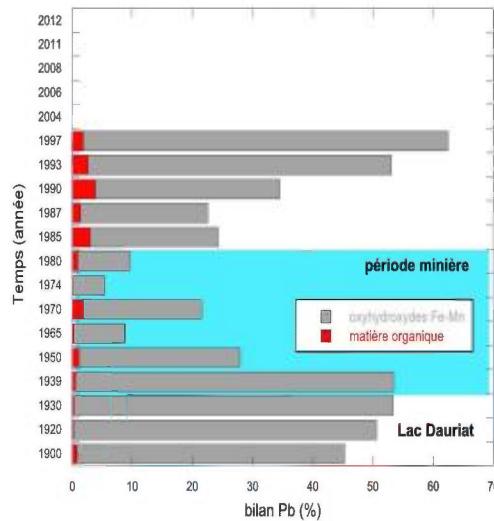


Figure 22 : Variation du bilan massique en Pb des fractions sédimentaires (à droite: matière organique, oxyhydroxydes de Fe-Mn) dans la carotte du lac Dauriat.

Les profils du rapport isotopique $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des fractions sédimentaires (MO, Ox et total) du lac Dauriat suivent les mêmes tendances (Figure 23). Les trois profils sont superposés de la surface jusqu'aux années 1980 ce qui indique une source constante en Pb depuis la fin de la période minière. En période minière (1940-1980), les profils de la MO et Ox se détachent de la fraction totale. Ce détachement indique que les fractions liées à la MO et aux Ox utilisent une source de Pb différente d'une ou plusieurs autres (échangeable, carbonatée et résiduelle). A priori, le Pb anthropique minier et/ou urbain ne serait que partiellement adsorbé par la phase MO et Ox dans le lac Dauriat.

En période pré-mine (1900-1940), les trois fractions sédimentaires sont détachées l'une de l'autre indiquant une source en Pb différente pour celles-ci.

Par manque de temps et de matériel sédimentaire, seul une partie des résidus a pu être analysée. Les valeurs des résidus semblent cohérentes avec les bilans de masse.

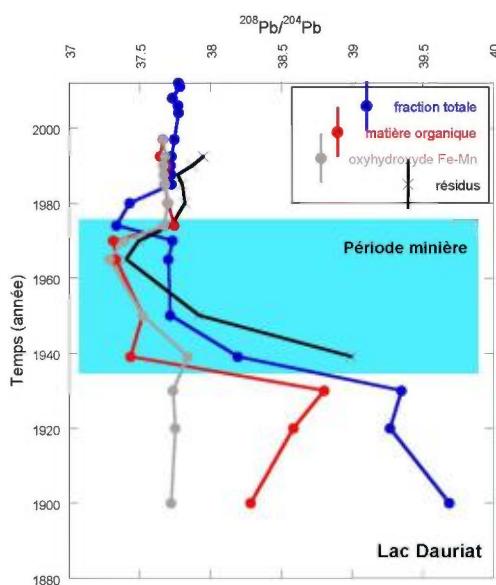


Figure 23 : Variation des rapports isotopiques $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de la fraction sédimentaire liée à la matière organique, aux oxyhydroxydes de Fe-Mn et de la fraction totale dans la carotte du lac Dauriat.

Le graphique des bilans massiques du Zn du lac Dauriat (Figure 24, à droite), montre qu'un apport important de Zn anthropique est survenu dans le lac Dauriat durant cette période, mais sans avoir été incorporé dans la fraction sédimentaire appartenant à la MO et aux Ox. Ce Zn a probablement été incorporé dans la fraction échangeable ou résiduelle. Comme pour le Pb, le

Zn d'origine anthropique minier (atmosphérique) et/ou urbain ne serait que partiellement adsorbé par la phase MO et Ox dans le lac Dauriat.

En 1970, on peut constater un creux dans le profil Zn/Al de la fraction totale qui provient d'une assimilation importante du Zn par les oxyhydroxydes de Fe-Mn et- dans un moindre degré- par la matière organique (bilan massique plus faible).

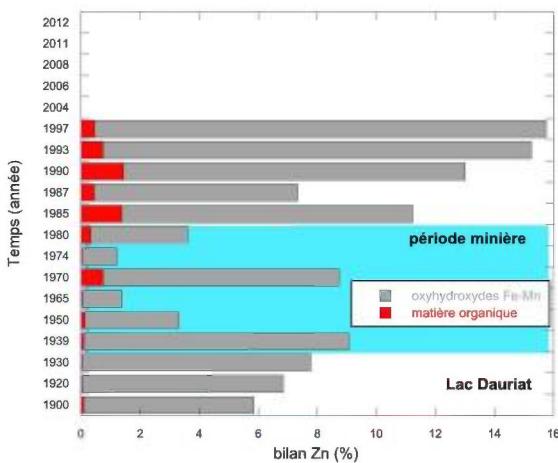


Figure 24 : Variation du bilan massique en Zn des fractions sédimentaires (matière organique, oxyhydroxydes de Fe-Mn) dans la carotte du lac Dauriat.

Les profils du $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ des fractions sédimentaires (MO, Ox et total) du lac Dauriat suivent les mêmes tendances (Figure 25). On constate une légère diminution du rapport isotopique $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ au début de la période minière indiquant un changement de sources sédimentaires dans le lac Dauriat, suivi d'une légère augmentation au début de la période post-mine représentatif d'un nouveau changement de source. Du zinc d'origine anthropique minier (atmosphérique) et/ou urbain s'est déposé dans les sédiments du lac Oksana durant la période minière.

Comme dans le cas du lac Oksana, le profil de la fraction liée à la MO est décalé d'environ 0.26 ‰ par rapport à celui de la fraction totale et celui lié aux Ox. L'explication est la même que celle avancée pour le lac Oksana. La formation des oxydes créerait un fractionnement isotopique positif (préférant utiliser les isotopes lourds du Zn) et ferait en sorte que la fraction liée à la MO adsorberait du Zn plus léger.

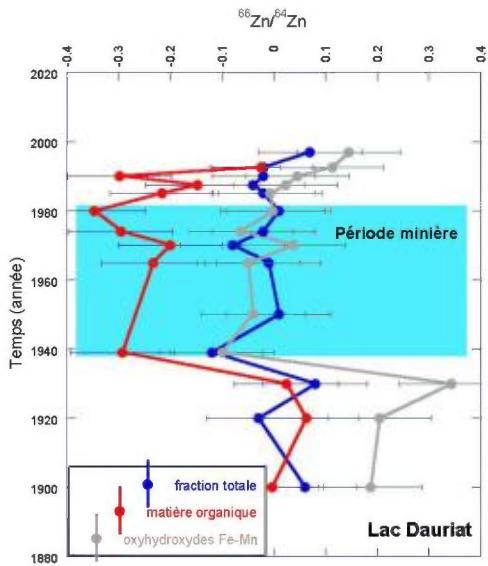


Figure 25 : Variation des rapports isotopiques $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ de la fraction sédimentaire liée à la matière organique, aux oxyhydroxydes de Fe-Mn et de la fraction totale dans la carotte du lac Dauriat.

Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés entre 2011 et 2013 ont permis de déterminer des variations de sources sédimentaires pour deux lacs (Dauriat, Oksana) de la région de Schefferville. L'analyse des carottes de sédiments démontre que le cycle géochimique de surface de la région de Schefferville a été perturbé durant la période de l'exploitation minière, et que le régime naturel pré-industriel n'est toujours pas atteint plus que 30 ans suivant la fin des activités minières.

Afin de déterminer la composition chimique et isotopique de différentes sources potentielles de métaux dans les lacs de la région de Schefferville, nous avons analysé des lichens épiphytes poussant dans les arbres (signal atmosphérique actuel sur la région d'étude), du minerai et des déchets miniers (signaux anthropiques liés à l'exploitation minière).

L'analyse des lichens épiphytes démontre que la ville de Schefferville et les activités anthropiques liées à l'exploitation minière relâchent du Pb dans l'atmosphère, car les concentrations de Pb dans les lichens diminuent progressivement avec la distance par rapport à la ville et les mines. Les valeurs des facteurs d'enrichissement (FE) en Pb des lichens épiphytes sont toutes supérieures à 10, avec des maxima de 155 et indiquant une origine anthropique. Les

valeurs élevées des FE-Pb sont expliquées par un apport de Pb émanant de la ville et des exploitations minières, mais également par un apport de Pb atmosphérique de longue distance provenant des industries canadiennes et américaines du Sud. La valeur moyenne $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ des lichens épiphytes est de 1.153 et correspond à la valeur des émissions atmosphériques canadiennes provenant des industries ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1.150$; Carignan et Gariépy, 1995).

L'analyse géochimique du mineraï et des déblais miniers montre que les concentrations des éléments chimiques sont plus homogènes dans les déblais miniers que dans le mineraï, probablement dû aux processus de broyage utilisés lors de l'extraction du mineraï. Les concentrations en Fe sont plus élevées dans le mineraï que dans les déblais miniers. L'inverse s'observe pour le Pb et le Zn. Les analyses isotopiques en Pb du mineraï et déblais minier démontrent que le Pb retrouvé en période minière dans les sédiments des lacs Oksana et Dauriat pourrait provenir du mineraï. Même si les concentrations sont plus élevées dans les sédiments, tous partagent le même signal isotopique.

L'analyse géochimique des carottes des lacs étudiés montre des variations de sources sédimentaires différentes pour chaque lac. L'analyse des sédiments lacustres du lac Dauriat, situé en plein milieu de la ville, démontre un effet des activités anthropiques liées à la ville de Schefferville. L'analyse géochimique des sédiments lacustres du lac Oksana, situé à proximité des exploitations minières, démontre quand à lui un effet des activités minières (extraction du mineraï de Fe). Par contre, aucun effet minier n'a été constaté dans les sédiments du lac Matemace, situé à une quinzaine de kilomètres des exploitations. Ceci démontre que l'extraction du mineraï de Fe a un effet sur l'environnement, mais que celui-ci reste local. Dans les sédiments des lacs affectés par les mines (Oksana) ou par la ville (Dauriat), les concentrations en période post-mine sont supérieures à celle mesurée en période pré-mine.

Les analyses isotopiques du Pb, Zn et Fe des sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat ont permis de préciser les différentes sources sédimentaires associées à la période minière. Quatre sources sédimentaires ont été identifiées pour le lac Oksana: une source géogénique locale primaire, une source géogénique locale secondaire, une source atmosphérique de longue distance provenant des industries canadienne et américaines en période pré-mine (1587-1939), et une source minière en période minière (1939-1977). Quatre sources sédimentaires ont été identifiées pour le lac Dauriat: une source géogénique locale (différente du lac Oksana) en période pré-mine (1900-1939), une première source urbaine en période minière

(1939-1977), une deuxième source urbaine (source urbaine post-mine), et une source atmosphérique de longue distance en période post-mine (1977-1997).

Les analyses isotopiques et géochimiques des fractions lixivierées (matière organique et oxyhydroxydes de Fe-Mn) des lacs Dauriat et Oksana ont démontré que la phase oxyhydroxydes de Fe-Mn est plus riche en Pb et en Zn que la phase liée à la matière organique. Ces analyses ont également permis de démontrer qu'en période minière, les apports en Zn et en Pb dans le lac Dauriat ont augmenté, mais que ce Pb et Zn n'est ni associé aux oxyhydroxydes de Fe-Mn ni à la matière organique. Cet excès en Pb et en Zn a probablement été incorporé dans la fraction échangeable ou résiduelle.

De cette étude il ressort que l'impact des exploitations minières sur les lacs de la région de Schefferville reste local et que la transition entre le régime stationnaire pré-industriel et le régime minier se fait de manière très rapide. La transition entre le régime minier et le régime post-mine se fait de manière plus lente et est masquée par les pollutions atmosphériques de longue distance provenant des industries canadiennes et américaines, qui font en sorte que les concentrations des métaux restent élevées en période post-mine. Un retour à l'équilibre naturel est donc délicat, mais pourrait être accéléré en initiant des mesures de restauration des sites miniers abandonnés.

Pour la suite du projet, une évaluation physico-chimique des conditions trophiques à l'aide des diatomées fossiles sera réalisée sur les sédiments de surface de la carotte du lac Dauriat prélevée lors de la mission de terrain en mars 2012, afin de compléter les données déjà existantes (1980-1999) générées par les travaux de Laperrière *et al.*, (2008, 2009).

Références :

- Barbeau MT. 1987. Schefferville: relations inter-ethniques et dynamique du développement en milieu nordique. L'université du Québec à Chicoutimi, 12-17 pp.
- Borcard D, Gillet F, Legendre P. 2011. *Numerical Ecology with R*, Use R, Springer Science+Business Media, LLC, 53-153 pp.
- Carignan J, Hild P, Mevelle G, Morel J, Yeghicheyan D. 2001. Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure on-line liquid chromatography coupled to ICP-MS: a study of reference materials BR, DR-N, UB-N, AN-G and GH. *Geostandard Newsletter: the Journal of Geostandards and Geoanalysis* 25: 187-198 pp.
- Carignan J, Simonetti A, Gariépy C. 2002. Dispersal of atmospheric lead in northeastern North America as recorded by epiphytic lichens. *Atmospheric Environment* 36:3759-3766 pp.
- Cazes J, Ewing GW. 2005. Ewing's an analytical instrumentation handbook. CRC Press, 57-73 pp.
- Chapelle FH. 2001. Ground-water microbiology and geochemistry. 2nd ed. New York: John Wiley & sons, 99 p.
- Clark T, Wares R. 2004. Synthèse lithotectonique et métallogénique de l'Orogène du Nouveau-Québec (Fosse du Labrador), Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; MM 2004-01, 182 p.
- Cloquet C, Carignan J, Lehmann MF, Vanhaecke F. 2008. Variation in the isotopic composition of zinc in the natural environment and the use of zinc isotopes in biogeosciences: a review. *Anal bioanal Chem.* 390:451-463 pp.
- Déruelle S, Lallement R. 1983. Les lichens témoins de la pollution. Librairie Vuibert. 54 p.
- Dimorth E. 1981. La géologie. Dossier sectoriel 2.2. Profil du Nord du Québec. OPD/UQAC, Chicoutimi, 224 p.
- Filgueiras AV, Lavilla I, Bendicho C. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *The Royal Society of Chemistry*, 4:823–857 pp.

- Gallon C, Tessier A, Gobeil C. 2006. Historical perspective of industrial lead emissions to the atmosphere from a Canadian smelter. *Environ. Sci. Technol.*, 40:741-747 pp.
- Gallon C, Tessier A, Gobeil C, Beaudin L. 2005. Sources and chronology of atmospheric lead deposition to a Canadian shield lake: Inferences from Pb isotopes and PAH profils. *Geochim Cosmochim Acta* 69:3199-3210 pp.
- Gargaud M. 2011. Encyclopedia of astrobiology, volume 1. Springer-Verlag Berlin, 849-851 pp.
- Gelabert A, Pokrovsky OS, Viers J, Schott J, Boudou A, Feurtet-Mazel A. 2006. Interaction between zinc and freshwater and marine diatom species: Surface complexation and Zn isotope fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70:839-857 pp.
- Humphrys G. 1958. Society Schefferville, Quebec: A New Pioneering TownAuthor. *Geographical Review*, 48:151-166 pp.
- Jenkin G. 2011. Beyond mining. *Nature geoscience*, 653 p.
- Klos A, Rajfur M, Waclawek M. 2011. Application of enrichment factor (EF) to the interpretation of results from the biomonitoring studies. *Ecological chemistry and engineerings*. 18:171-183 pp.
- Laperrière L, Pienitz R, Fallu MA, Hausmann S, Muir D. 2009. Impacts de l'activité minière et des eaux usées sur la santé du lac Dauriat à Schefferville : données paléolimnologiques. *Le Naturaliste Canadien*. Vol. 133, 2:83-95 pp.
- Laperrière L, Fallu MA, Hausmann S, Pienitz R, Muir D. 2008. Paleolimnological evidence of mining and demographic impacts on Lac Dauriat, Schefferville (subarctic Quebec, Canada) *J Paleolimnol.* 40: 309–324 pp.
- Leslie K, Bourque Y. 1984. Géologie et métallogénie de la Gaspésie et de la région de la Fosse du Labrador. *Le Manganèse dans la région de Schefferville*. Ministère de l'énergie et des ressources, 121-125 pp.
- Maurice C, Labbe JY. 2009. Ré-analyse de sédiments de fond de lac dans la partie nord-est du Québec (Sous-province d'Ashuanipi, Orogène du Nouveau-Québec et Province de Churchill Sud-Est. *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec*; PRO2009-09.
- Mahowald NM, Engelstaedter S, Luo C, Sealy A, Artaxo P, Benitez-Nelson C, Bonnet S, Chen Y, Chuang Yp, Cohen DD, Dulac F, Herut B, Johansen AM, Kubilay N, Losno R,

Maenhaut W, Paytan A, Prospero JM, Shank LM, Siefert RL. 2009. Atmospheric iron deposition: global distribution, variability, and human perturbations. *Annu. Rev. Marine Sci.* : 245-278

- Nash III T.H. 1996. *Lichen Biology*. Cambridge University Press, Cambridge, 303 p.
- Nash III T.H. 1990. Metal tolerance in Lichens. In; *Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects* (ed. A. J. Shaw). CRC Press.119-152 pp.
- Plan Nord, 2011. *Bibliothèque et archives nationales du Québec*. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, 66 p.
- Ressources Naturelles Canada. 2009. *Annuaire des minéraux du Canada (AMC)*. En ligne : <http://www.rncan.gc.ca/mineraux-metaux/industrie-marches/annuaire-mineraux-canada/revue-2009/3856>. Consulté le 31 juin 2012.

Annexe:

Table 1 : Concentration, facteur d'enrichissement et compositions isotopiques en Pb des lichens épiphytes.

Sample ID	Lat. N	Long. W	altitude (m)	Pb (ppm)	FE - Pb	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
127	54°52'16"	66°46'26"	471	2.187719	15.80393454	18.9079	15.5994	37.617	1.21407
129	54°54'21"	66°48'58"	479	1.703532	109.033451	18.1054	15.6745	38.075	1.15251
130	54°51'41"	66°47'30"	562	2.848822	68.6444949	17.8302	15.5135	37.523	1.14895
132	54°50'8"	66°48'43"	491	5.611877	155.2886001	17.2439	15.5208	36.941	1.11075
134	54°51'39"	66°55'42"	513	0.800813	32.41183692	17.8965	15.5164	37.632	1.15293
136	54°50'54"	66°53'50"	524	3.753623	26.83140156	18.2291	15.5777	37.867	1.17015
137	54°49'29"	66°51'8"	521	5.091649	54.5852886	18.0801	15.5916	37.777	1.15966
138	54°47'37"	66°47'15"	530	3.210858	88.59290874	17.9017	15.5659	37.612	1.14996
145	54°48'38"	66°51'36"	593	3.594119	78.72509112	17.9798	15.5846	37.69	1.15362
146	54°48'50"	66°49'31"	502	4.065863	55.72879368	18.0005	15.5797	37.698	1.15537
147	54°46'50"	66°45'20"	501	1.997706	67.89344865	17.9498	15.5457	37.686	1.15469
BCR 482						17.6051	15.5676	37.476	1.13089

Table 2. Concentrations de Pb, Zn, Fe et rapports isotopiques en Pb des déblais miniers et minéraux.

Réf	matériel	Lat.N	Long.W	altitude (m)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
140 (1)	minéral	54°29'8"	66°31'23"	607	154032.14	< L.D.	7.6450	37.4506	1.1549
140 (2)	minéral	54°29'8"	66°31'23"	607	334660.13	< L.D.	3.4588	37.3731	1.1395
140 (3)	minéral	54°29'8"	66°31'23"	607	212049.92	25.63	7.9536	37.9748	1.2219
140	déblais miniers	54°29'8"	66°31'23"	607	189860.48	58.39	21.5665	40.3277	1.5522
141	déblais miniers	54°29'2"	66°31'26"	615	99668.88	54.42	15.7653	40.2535	1.4813
142	déblais miniers	54°29'6"	66°31'55"	616	198113.76	53.84	16.1208	41.4411	1.5424

Table 3. Concentrations de Pb et rapports isotopiques en Pb des sédiments lacustres du lac Oksana (le fond gris correspond aux valeurs de la période minière).

Ref Echantillon	Z (cm)	Pb (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
Lac Oksana	0.5	-	18.7769	15.8008	38.3384	2.0418	0.8415	1.1882
Lac Oksana	1.5	-	18.6849	15.6489	37.9409	2.0306	0.8375	1.1940

Lac Oksana	4.9	27.5586	18.7521	15.6375	37.865	2.0192	0.8339	1.1992
Lac Oksana	8.9	48.7114	18.6142	15.6176	37.896	2.0357	0.8390	1.1919
Lac Oksana	12.9	65.149	18.5054	15.6074	37.911	2.0486	0.8434	1.1857
Lac Oksana	14.9	81.7232	18.438	15.6063	37.929	2.0571	0.8464	1.1815
Lac Oksana	18.9	48.5678	19.0576	15.6789	38.208	2.0048	0.8227	1.2155
Lac Oksana	20.9	28.5432	19.5963	15.7474	38.3	1.9544	0.8035	1.2445
Lac Oksana	24.9	10.2933	22.2396	16.0663	38.82	1.7455	0.7224	1.3843
Lac Oksana	28.9	8.5345	23.7744	16.2618	39.069	1.6432	0.6840	1.4621
Lac Oksana	32.9	4.9078	26.3148	16.5829	38.314	1.4559	0.6301	1.5870
Lac Oksana	36.9	4.3316	27.1995	16.6908	38.071	1.3996	0.6136	1.6297

Table 4. Concentrations de Pb et rapports isotopiques en Pb des sédiments lacustres du lac Dauriat (le fond gris correspond aux valeurs de la période minière).

Ref Echantillon	Z (cm)	Pb (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
Lac Dauriat	0.25	78.6273	18.1705	15.6174	37.773	2.0788	0.8595	1.1635
Lac Dauriat	1.75	81.488	18.1512	15.6248	37.782	2.0815	0.8608	1.1617
Lac Dauriat	3.75	84.8838	18.1320	15.6063	37.730	2.0809	0.8607	1.1618
Lac Dauriat	5.75	84.1659	18.1539	15.6119	37.769	2.0805	0.8600	1.1628
Lac Dauriat	7.75	89.4907	18.1516	15.6177	37.774	2.0810	0.8604	1.1623
Lac Dauriat	16	102.9074	18.1158	15.6087	37.744	2.0834	0.8616	1.1607
Lac Dauriat	20	105.8346	18.1051	15.6003	37.724	2.0836	0.8616	1.1606
Lac Dauriat	22	121.4571	18.0844	15.5949	37.717	2.0856	0.8623	1.1597
Lac Dauriat	24	132.1975	18.0519	15.6004	37.722	2.0896	0.8642	1.1572
Lac Dauriat	26	147.2332	18.0443	15.601	37.725	2.0907	0.8646	1.1567
Lac Dauriat	30	119.0127	17.707	15.5672	37.334	2.1084	0.8791	1.1375
Lac Dauriat	34	149.2556	18.038	15.5984	37.73	2.0917	0.8647	1.1564
Lac Dauriat	36	135.6039	18.0189	15.5945	37.713	2.0930	0.8654	1.1555
Lac Dauriat	38	92.7646	18.8649	15.6725	38.192	2.0244	0.8307	1.2038
Lac Dauriat	42	75.3605	20.1489	15.7858	39.268	1.9488	0.7834	1.2765
Lac Dauriat	44	44.5953	20.6326	15.8454	39.689	1.9236	0.7680	1.3021
Lac Dauriat	46	16.2318	20.387	15.8147	39.352	1.9303	0.7757	1.2891
Lac Dauriat	48	14.7851	17.7329	15.5702	37.429	2.1107	0.8780	1.1389
Lac Dauriat	50	14.4315	18.0132	15.5893	37.701	2.0930	0.8654	1.1555

Table 5. Concentrations de Zn, Fe, Carbone total (Ctot) et rapports isotopiques en Fe et Zn des sédiments lacustres du lac Oksana (le fond gris correspond aux valeurs de la période minière).

Ref Echantillon	Z (cm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	Ctot (%)	$\delta^{56}\text{Fe}$	$\delta^{57}\text{Fe}$	$\delta^{66}\text{Zn}$	$\delta^{67}\text{Zn}$	$\delta^{68}\text{Zn}$
Lac Oksana	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Lac Oksana	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Lac Oksana	4.9	169.5	18419.51	27.86	1.04	1.50	0.08	0.14	0.17
Lac Oksana	8.9	96.31	28540.27	28.25	1.03	1.55	0.07	0.07	0.16
Lac Oksana	12.9	85.29	32446.59	25.4	0.98	1.38	0.28	0.42	0.56
Lac Oksana	14.9	107.8	31264.56	25.43	0.93	1.41	0.29	-	-
Lac Oksana	18.9	119.4	25525.73	28.37	1.09	1.60	0.26	0.41	0.51
Lac Oksana	20.9	115.1	25473.27	28.75	0.95	1.50	0.37	-	0.78
Lac Oksana	24.9	105.8	24455.60	34.47	1.13	1.82	0.34	0.46	0.69
Lac Oksana	28.9	96.74	24049.93	29.05	0.95	1.41	0.37	0.67	0.82
Lac Oksana	32.9	96.36	20108.63	30.16	0.94	1.42	0.29	0.39	0.57
Lac Oksana	36.9	85.91	26358.05	28.33	1.05	1.48	0.32	0.46	0.64

Table 6. Concentrations de Zn, Fe, Carbone total (Ctot) et rapports isotopiques en Fe et Zn des sédiments lacustres du lac Oksana (le fond gris correspond aux valeurs de la période minière).

Ref Echantillon	Z (cm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	Ctot (%)	$\delta^{56}\text{Fe}$	$\delta^{57}\text{Fe}$	$\delta^{66}\text{Zn}$	$\delta^{67}\text{Zn}$	$\delta^{68}\text{Zn}$
Lac Dauriat	0.25	414.7	79909.96	-	-	-	-	-	-
Lac Dauriat	1.75	436.2	80976.60	-	-	-	-	-	-
Lac Dauriat	3.75	451	81081.51	-	-	-	-	-	-
Lac Dauriat	5.75	439.7	81046.54	-	-	-	-	-	-
Lac Dauriat	7.75	461.8	80382.08	-	-	-	-	-	-
Lac Dauriat	16	407.9	83354.66	7.15	0.14	0.17	0.07	0.14	0.13
Lac Dauriat	20	368.3	81099.00	7.12	0.08	0.19	-0.02	-0.01	-0.05
Lac Dauriat	22	322.4	81186.43	7.03	0.09	0.13	-0.02	0.02	-0.03
Lac Dauriat	24	405.3	81623.57	7.08	0.02	0.12	-0.04	0.05	-0.09
Lac Dauriat	26	318.2	83319.69	6.89	-0.11	-0.12	-0.02	-0.01	-0.06
Lac Dauriat	30	318.6	88477.99	6.1	-0.07	-0.10	0.01	0.06	0.02
Lac Dauriat	34	660.6	92552.18	7.47	-0.07	-0.09	-0.02	-0.13	-0.11
Lac Dauriat	36	333.7	118063.91	6.27	0.04	0.06	-0.08	-	-
Lac Dauriat	38	587.7	127541.20	5.24	-0.02	-0.09	-0.01	0.1	-0.02
Lac Dauriat	42	630.8	64050.37	5.18	0.17	0.27	0.01	0.01	0.01
Lac Dauriat	44	262.5	51873.28	3.21	0.24	0.23	-0.12	-0.08	-0.24
Lac Dauriat	46	111.4	48830.76	3.13	0.27	0.34	0.08	0.35	0.15
Lac Dauriat	48	109.1	49169.98	2.86	0.34	0.47	-0.03	-0.08	-0.06
Lac Dauriat	50	111.6	49904.38	2.74	0.35	0.62	0.06	0.69	0.13

Table 7. Concentrations de Pb, Zn et rapports isotopiques en Fe et Zn des fractions sédimentaires lixivées du lac Oksana; matière organique (MO), oxy-hydroxydes de Fe-Mn (Ox) et résidus (Rés) (le fond gris correspond aux valeurs de la période minière).

Ref Echantillon	Z (cm)	Pb (MO (ppm))	Pb (Ox (ppm))	Zn (MO (ppm))	Zn (Ox (ppm))	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (MO)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Ox)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Rés)	$\delta^{66}\text{Zn}$ (MO)	$\delta^{66}\text{Zn}$ (Ox)
Lac Oksana	4.9	0.2544	33.9949	3.7366	31.0099	37.8444	37.8514	39.5685	-0.18	0.11
Lac Oksana	8.9	2.6830	43.6767	6.6321	8.9564	37.7563	37.8696	38.5500	-0.16	0.16
Lac Oksana	12.9	13.0334	12.0062	5.7485	4.2031	37.9078	37.9076	37.9888	0.06	0.15
Lac Oksana	14.9	4.7133	42.3929	4.9396	5.2646	37.9268	37.9309	38.1411	-0.05	0.20
Lac Oksana	18.9	10.5679	12.6377	8.2046	5.0402	38.2204	38.2104	-	0.14	0.50
Lac Oksana	20.9	5.4312	10.7175	7.3572	6.7390	38.3019	38.2865	-	0.15	0.44
Lac Oksana	24.9	0.6877	7.1830	5.5678	6.2823	38.7280	38.7141	-	0.01	0.34
Lac Oksana	28.9	0.9668	4.4186	7.5069	5.2547	38.9159	38.8900	-	0.14	0.46
Lac Oksana	32.9	0.2292	3.7573	6.3479	6.3983	38.0619	38.0457	-	0.01	0.22
Lac Oksana	36.9	0.3899	2.5606	6.9350	5.5612	37.7345	37.7538	-	0.11	0.40

Table 8. Concentrations de Pb, Zn et rapports isotopiques en Fe et Zn des fractions sédimentaires lixivées du lac Dauriat; matière organique (MO), oxy-hydroxydes de Fe-Mn (Ox) et résidus (Rés) (le fond gris correspond aux valeurs de la période minière).

Ref Echantillon	Z (cm)	Pb (MO (ppm))	Pb (Ox (ppm))	Zn (MO (ppm))	Zn (Ox (ppm))	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (MO)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Ox)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Rés)	$\delta^{66}\text{Zn}$ (MO)	$\delta^{66}\text{Zn}$ (Ox)
Lac Dauriat	16	1.8923	62.3403	35.6321	80.7899	37.6616	37.6666	-	0.15	
Lac Dauriat	20	2.7644	53.3796	33.1043	65.2655	37.6422	37.6788	37.9485	-0.02	0.11
Lac Dauriat	22	4.6340	37.2867	23.4415	29.1032	37.6841	37.6662	37.8717	-0.30	0.05
Lac Dauriat	24	1.8189	27.8890	17.1316	21.1954	37.6758	37.6689	37.7663	-0.15	0.02
Lac Dauriat	26	4.3765	31.3523	18.6289	18.3030	37.6751	37.6776	37.7981	-0.22	-0.01
Lac Dauriat	30	1.0631	10.4238	9.5951	8.5915	37.6968	37.7021	37.8181	-0.35	0.00
Lac Dauriat	34	0.1999	7.8259	12.5410	15.2034	37.7446	37.6682	37.7243	-0.30	-0.06
Lac Dauriat	36	2.4772	26.7121	16.4200	14.7019	37.3113	37.3897	37.4943	-0.20	0.04
Lac Dauriat	38	0.2737	7.8513	15.5028	23.4418	37.3308	37.2852	37.4033	-0.23	-0.05
Lac Dauriat	42	0.8384	20.1604	21.2461	26.0220	37.5186	37.5202	37.9169	-	-0.04
Lac Dauriat	44	0.2444	23.5626	17.6477	21.3166	37.4333	37.8392	38.9966	-0.29	-0.10
Lac Dauriat	46	0.0387	8.6260	11.4800	12.3305	38.8043	37.7351	-	0.02	0.34
Lac Dauriat	48	0.0305	7.4419	7.9524	11.5259	38.5854	37.7513	-	0.06	0.20
Lac Dauriat	50	0.1067	6.4245	9.2018	9.9166	38.2854	37.7212	-	0.00	0.19