



**Le cycle géochimique des métaux de surface en période d'exploitation minière:
Étude isotopique des sédiments lacustres de Schefferville**

Stéphane Aebischer¹, Jean Carignan¹, Charles Maurice², Reinhard Pienitz¹

GM 66439

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

¹Takuvik - CNRS - Université Laval

²Bureau de l'Exploration géologique du Québec

Documents complémentaires / Additional files

Licence / License

2012

*Ressources naturelles
et Faune*

Québec

Énergie et Ressources naturelles
Direction de l'information géologique

MB 2012-03

Le cycle géochimique des métaux de surface en période d'exploitation minière: Étude isotopique des sédiments lacustres de Schefferville.

Stéphane Aebischer¹, Jean Carignan¹, Charles Maurice², Reinhard Pienitz¹

1-Takuvik - Unité Mixte Internationale de recherche CNRS-ULaval et Centre d'études nordiques, Laboratoire de Paléoécologie Aquatique, Université Laval, Québec, Canada

2-Bureau de l'exploration géologique du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Canada

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'oxi-hydroxyde de Fe), et la biodiversité et les 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) sous quelles formes chimiques se trouvent les métaux? 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 a été initié par Stéphane Aebischer. 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. L'état de l'avancement du projet, ainsi que les résultats préliminaires d'ores et déjà traités sont ici présentés.

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 en marge de la province du Supérieur, dans la province géologique de Churchill Sud-est (Figure 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. Dans ces différents cycles se retrouvent des orthoquartzites, des dolomies, des formations de fer, des grauwackes et des conglomérats à cailloux sédimentaires (Dimroth, 1981). 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. L’Orogène est principalement composée de roches sédimentaires et ignées.



Figure 1. Provinces géologiques du Québec et localisation de Schefferville

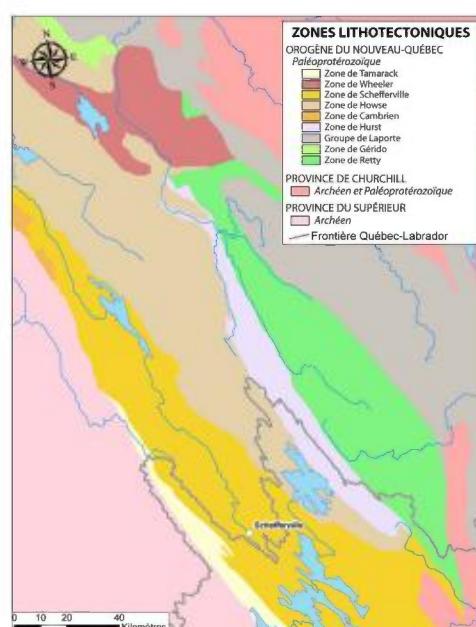


Figure 2. Zones lithotectoniques de l’Orogène du Nouveau-Québec

Source: Clark et Wares, 2004

La région de Schefferville est composée de roches sédimentaires, de bassins marins et de milieux 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 chertreux, d'oxydes et de carbonates de fer qui ont précipité chimiquement. Lors de sa formation, le minerai de la région de Schefferville était un minerai de fer taconitique pauvre en fer (25 à 30 % Fe). Mais 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 minerai de Schefferville est caractérisé par deux sortes de minerais: le minerai dit “soft ore” et le minerai blocailleux, “rubble ore”. Les deux sortes de minerais 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 minerai “soft ore” (Leslie et Bourque, 1984).

Problématique et méthodologie

Les environnements subarctiques du nord du Québec 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 notre société en constante augmentation, accélère le processus d’exploitation de ces régions (Jenkin, 2011).

Rendre l’exploitation minière en une exploitation la plus respectueuse possible de l’environnement est un devoir et un défi pour notre société. Mieux comprendre les impacts, permettra une meilleure gestion de ces environnements fragiles. Par exemple, en ayant une meilleure connaissance du cycle géochimique en période d’exploitation minière, il sera peut-être possible de permettre au système de revenir à l’état naturel plus rapidement et de diminuer les impacts sur l’environnement. De plus, ce sujet est d’actualité puisque le gouvernement du Québec lance actuellement « le Plan Nord », 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 minerai de Fe, est une région d'étude très intéressante (Barbeau, 1987). En effet, l'étude paléolimnologique des lacs environnants, permettra de comparer la géochimie de la période avant, pendant et après l'exploitation minière. Ceci constitue un avantage crucial pour la compréhension et le déroulement de notre étude.

Nous disposons déjà d'une partie des données, entre autres celles provenant du Système d'information Géominière du Québec-SIGEOM (MRNF). En effet le MNRF a échantillonné une grande partie des lacs de l'Orogène du Nouveau-Québec et établi la composition chimique des lacs autour de Schefferville. Ces données ont fait l'objet d'une analyse statistique (analyse de corrélation et analyse de redondance) afin de déterminer les relations entre certains éléments chimiques des lacs sélectionnés (voir annexe).

Mission de terrain: mars 2012

Nous avons à disposition 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 4)) prélevées en 1999. Ces deux lacs ont été ré-échantillonnés durant la campagne de terrain qui a été effectuée du 19 au 23 mars 2012, afin de compléter les dix dernières années et ainsi voir la dynamique et cinétique de retour à l'état naturel. Ces données ont été complétées par l'échantillonnage de deux lacs supplémentaires (Ridge ($54^{\circ}51'9.04''N$, $66^{\circ}55'1.84''O$) et Matemace ($54^{\circ}54'09.45''N$, $66^{\circ}48'44.75''O$), ceci 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 une raison précise:

- 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 (essence, eaux usées, déchets municipaux, etc...).

En plus des carottes de sédiments, nous avons échantillonné des lichens épiphytes sur des branches d'arbres (Figure 3). Les lichens sont utilisés comme filtres naturels de la matière atmosphérique et leurs compositions chimique et isotopique reflètent celles des aérosols déposés dans la région d'étude. Des résidus miniers et du minerai de fer ont aussi été échantillonnés (Figure 3).



Figure 3. Photos de la mission de terrain. Panneau à gauche, déblais minier de la mine Burnt Creek. Panneau du centre, carotte de sédiments du lac Dauriat. La période pré-mine en brun-ocre, la période minière et construction de la ville en noir et la période post-mine en brun. Panneau de droite, lichens épiphytiques. Panneau en bas à droite, déblais minier de la mine Burnt Creek.

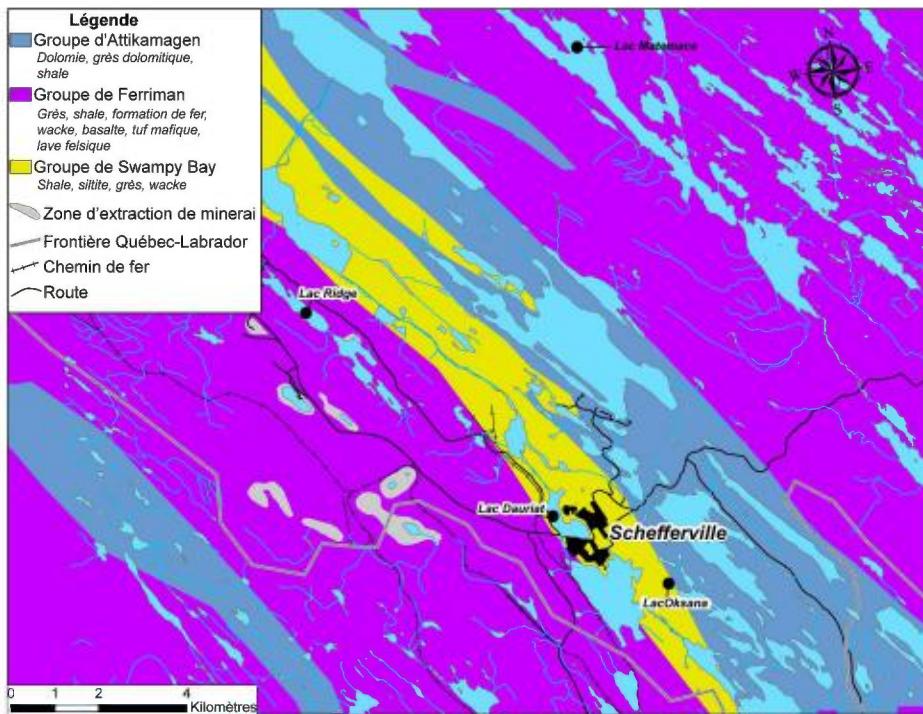


Figure 4. Ville de Schefferville avec en gris les zones d'extraction du minerai. Les points noirs sont les quatre lacs de l'étude (lacs Dauriat, Oksana, Ridge et Matemace)

Analyses chimiques et isotopiques

Des analyses chimiques et isotopiques (Pb, Zn et Fe) ont été effectuées sur les fractions totales des carottes de sédiments des lacs Dauriat et Oksana au 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). Les analyses chimiques et isotopiques ont été effectuées.

Avant l'analyse des éléments majeurs et traces, les échantillons ont été finement broyés (granulométrie inférieure à 80 microns) et subit une fusion alcaline au métaborate de lithium

(LiBO₂) dans des proportions 200 mg (éch.) - 600 mg (LiBO₂) ; (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 (HNO₃, 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). Ce n'est qu'après avoir été dissous et isolés que les éléments chimiques pourront être 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'ICP-MS, l'échantillon doit être d'abord 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. Le secteur magnétique est le cœur du spectromètre de masse. C'est dans ce secteur que les ions sont séparés en fonction de leur rapport masse sur charge. Après être sortis du secteur magnétique, les ions arrivent dans la partie du détecteur, qui convertit alors 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'onde émises par le plasma sont triées pour ne former qu'un faisceau monochromatique. Ce faisceau monochromatique est dirigé à travers diverses fentes

pour éliminer toutes longueurs d'onde indésirables puis est capté par un détecteur (Cazes J *et al*, 2005).

Résultats préliminaires

Plus de 800 analyses de sédiments lacustres ont été extraits du SIGEOM dans un rayon de 50 km 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).

Analyses chimiques

La Figure 6 présente les relations de teneurs entre Al, Fe, Zn et Pb mesurées pour les sédiments régionaux (losanges pleins). Une tendance générale de corrélation positive est observée pour ces éléments indiquant probablement une variation de la nature des sources détritiques dans les différents bassins versants. Cette distribution peut aussi indiquer une dilution de la fraction détritique par la matière organique déposée au fond des lacs. Certains lacs possèdent des teneurs élevées en Fe, Zn et Pb pour une teneur donnée en Al (au-dessus du patron général) indiquant la proximité d'une zone minéralisée ou une proportion plus importante de sédiments de surface (0-10 cm), possiblement affectés par la déposition atmosphérique d'aérosols d'origine anthropogénique. Des cartes de distribution des teneurs et rapports élémentaires ont été faites et indiquent une variation régionale compatible avec les grands domaines géologiques, que sont le bouclier Archéen et l'Orogène du Nouveau-Québec d'âge Protérozoïque (Figure 5). Le secteur de minéralisation en Fe autour de Schefferville est bien visible sur le 1^{er} panneau de la Figure 5.

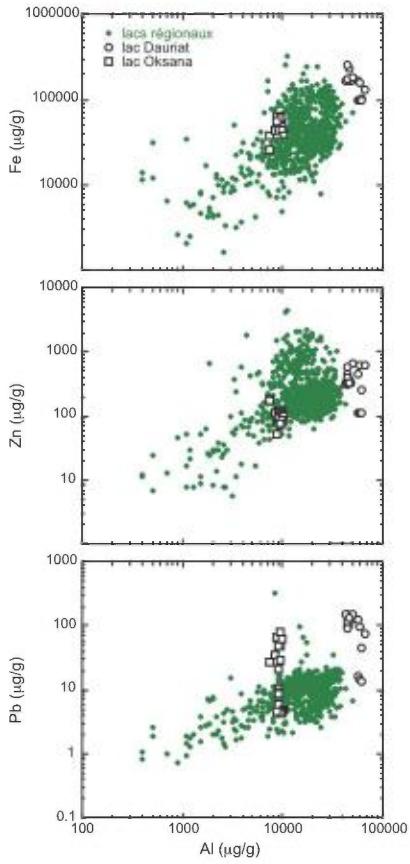


Figure 6. Relation entre Fe, Zn, Pb et Al pour les sédiments des lacs Dauriat et Oksana couvrant ca. 150-200 ans de sédimentations. La composition de plus de 800 sédiments de lacs dans un rayon de 50 km autour de Schefferville renseigne sur la variabilité régionale.

Une matrice de corrélation suivant la méthode “Pearson” (voir annexe, Table 4) effectuée sur cinquante-quatre variables au préalable normalisées (latitude, longitude, pH et 51 éléments chimiques), a permis d’identifier quelles variables sont corrélées entre elles. Par exemple, en regardant cette matrice de corrélation, il a pu être constaté que le Fe est corrélé avec le Mn de manière positive avec un $r^2 = 0.81$. La figure 7 est une analyse de redondance effectuée sur une sélection des 805 lacs de la banque de données de Schefferville. La sélection a été faite pour diminuer le nombre de données. La région sélectionnée et la carte SNRC 23J15. L’analyse de redondance ne permet pas de distinguer différents “groupes” de lacs, et démontre une petite

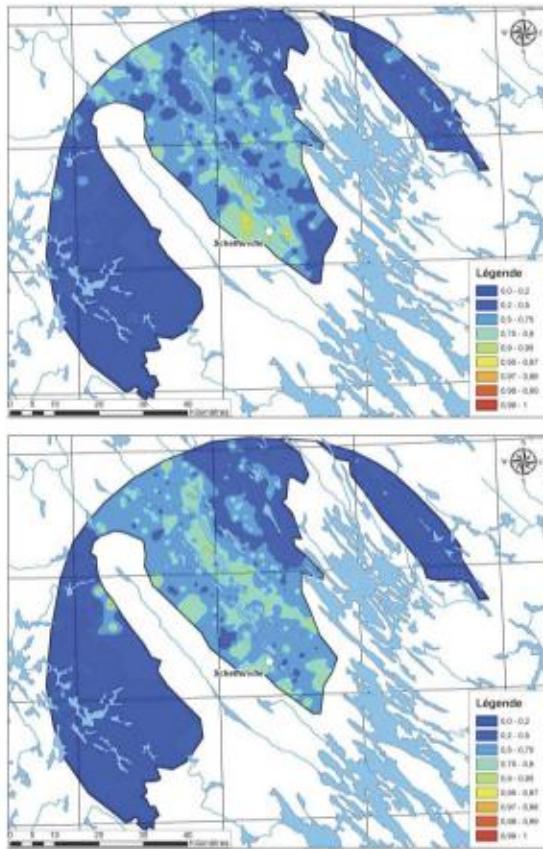


Figure 5. Distribution du rapport Fe/Al (panneau haut) et Pb/Al (panneau bas) des sédiments lacustres totaux de surface (20-50 cm) dans la région de Schefferville, au Québec.

Des analyses de corrélation et de redondance ont également été produites sur la banque de données provenant du SIGEOM avec le logiciel statistique R.

variabilité entre les lacs. La longueur des vecteurs (en rouge) indique la variabilité de la variable environnementale. Les petits vecteurs (Ca, Ni ou encore Nb) sont des variables environnementales avec une plus faible variation que les grands vecteurs (Sr, Cu, Fe ou encore Zn).

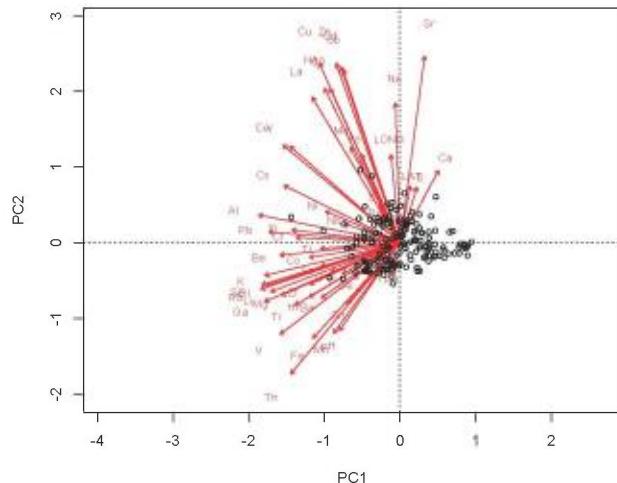


Figure 7. Analyse de redondance de 179 lacs de la région de Schefferville de 54 variables (latitude, longitude, pH et 51 éléments chimiques)

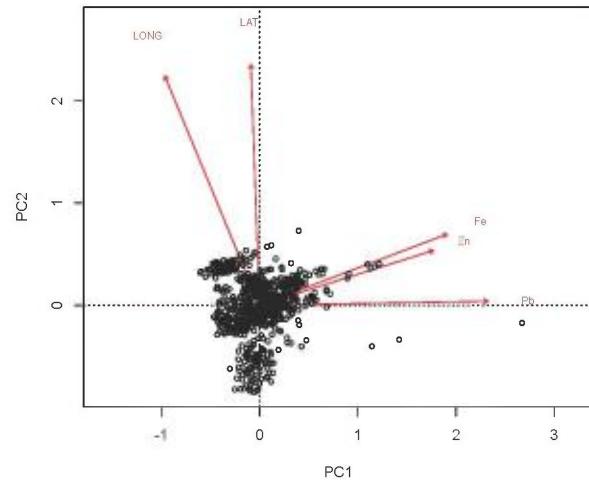


Figure 8. Analyse de redondance de 805 lacs de la région de Schefferville de 5 variables (latitude, longitude, Fe, Pb et Zn)

La figure 8 est une analyse de redondance effectuée sur les 805 lacs de la banque de donnée régionale sur les variables latitude, longitude, Fe, Pb et Zn. De cette analyse, il ressort trois groupes de lacs; les lacs de plus hautes, moyennes et plus basses latitudes et longitudes. D'autres analyses statistiques vont être effectuées pour mieux comprendre les relations entre les différents éléments chimiques et essayer de déterminer des relations entre certains éléments chimiques et certains lacs. La variabilité des variables environnementales Fe, Pb et Zn ne sont pas identiques, le Pb montrant une plus grande variabilité que le Fe et le Zn.

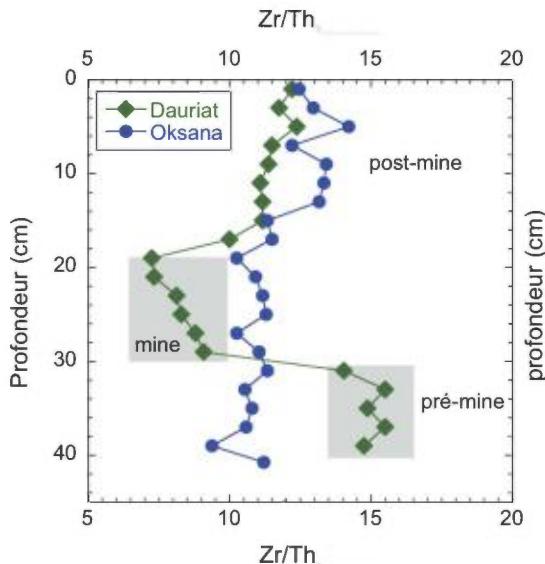


Figure 9. Variations du rapport Zr/Th des sédiments des lacs Dauriat et Oksana

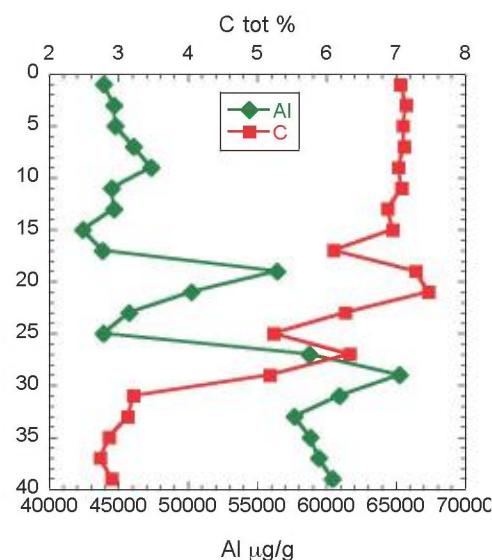


Figure 10. Variations des teneurs en Al et Ctot (principalement C organique, même profil pour N) des sédiments du lac Dauriat

La Figure 9 présente les variations temporelles des compositions chimiques des sédiments de la carotte du lac Dauriat. Nous avons ré-échantillonné et ré-analysé la carotte utilisée par Laperrière *et al.* (2008, 2009) afin d'avoir une homogénéité d'échantillons pour les analyses chimiques et isotopiques (voir Annexe, Table 1, 2 et 3 et Figure 1 et 2). Le taux de sédimentation, tel que déterminé par Laperrière *et al.* (2008, 2009) en utilisant l'activité du ^{210}Pb , indique une couverture d'environ 125 ans depuis 1999. La période d'exploitation minière se situe entre 1939 et 1977 et est identifiée comme la période "mine" sur la Figure 9. Le panneau de gauche (Zr/Th) renseigne principalement sur une variation des apports détritiques. Le rapport Zr/Th est relativement homogène pendant la période "pré-mine" mais varie de façon significative pendant la période "mine". Ceci est lié à la création et l'expansion de la ville de Schefferville qui a modifié le système d'érosion des berges du lac.

Durant l'exploitation minière, l'eutrophisation du lac Dauriat avait été démontrée par l'étude de Laperrière *et al.* (2008, 2009). La Figure 10 montre une diminution des teneurs en Al (éléments détritiques) alors que le carbone total (Ctot) augmente durant la période minière. La diminution des teneurs en Al peut s'expliquer du moins partiellement par une dilution de l'Al dans la matière organique dont les teneurs augmentent dès le début de l'exploitation minière.

Les analyses chimiques, ont permis de déterminer que le lac Oksana est beaucoup plus riche en carbone et en azote comparé au lac Dauriat (e.g. 25%-34% vs 3%-7% respectivement de C_{tot}; Table 1 de l'annexe).

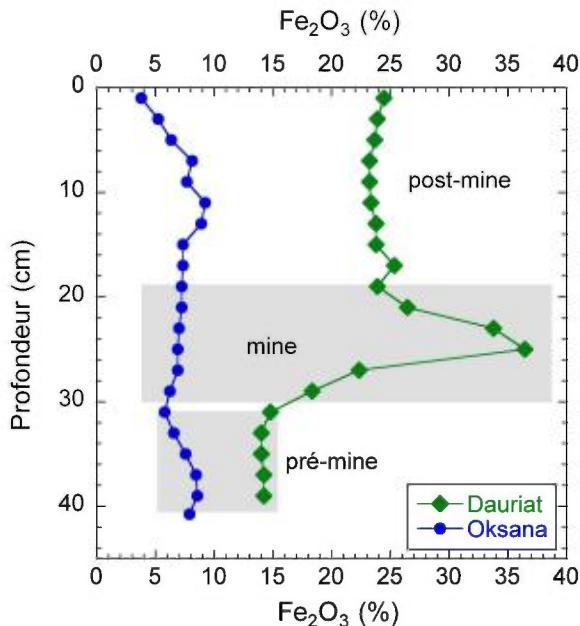


Figure 11. Variations des teneurs en Fe₂O₃ des sédiments des lacs Dauriat et Oksana.

Les lacs Dauriat et Oksana, même s'ils ne sont distants que d'une quinzaine de kilomètres, ne subissent pas forcément les mêmes perturbations. Une augmentation des apports détritiques en Fe pendant la période d'exploitation minière n'est visible qu'au lac Dauriat (Figure 11). La légère diminution des teneurs en Fe₂O₃ des sédiments d'Oksana en surface est elle certainement liée à l'augmentation significative de la teneur en matière organique à l'interface eau-sédiments.

La mesure de facteurs d'enrichissement est un moyen de déterminer l'évidence d'un excès d'un élément par rapport aux contributions détritiques géogéniques silicatées (fraction naturelle locale). Le facteur d'enrichissement est défini comme suit :

$$EF = [(X/Al)_{\text{échantillon}} / (X/Al)_{\text{naturel}}],$$

où X est la concentration de l'élément considéré, et où le rapport naturel est celui de la croûte continentale moyenne ou du signal géogénique local.

Typiquement, les flux de métaux dans les systèmes lacustres augmentent en période d'exploitation minière pour atteindre des facteurs d'enrichissement importants (de l'ordre de 10X ou >100X) par rapport au fond géochimique (sources géogéniques) selon le type d'exploitation et la proximité du site (Couillard *et al*, 2004). Les facteurs d'enrichissement du Zn, Fe et Pb ont été calculés puis comparés avec leurs concentrations respectives (Figure 12). Il apparaît que les

facteurs d'enrichissement sont supérieurs aux concentrations pour le Zn en période mine et post-mine et pour le Fe en période post-mine. Ceci pourrait signaler un signal anthropique plus important que géogénique.

L'impact démographique et minier sur un lac de cette région minière démontre effectivement une augmentation très significative du flux de métaux (entre autres: Fe, Zn, Hg, Pb) dans les sédiments, associée à des indices d'eutrophisation avancée pendant la 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, géomorphologie et végétation).

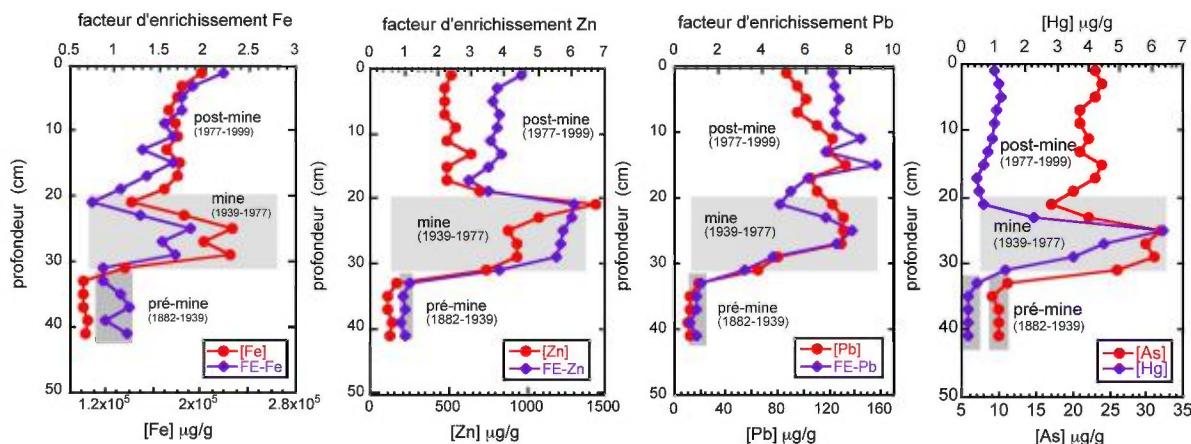


Figure 12. Variation des concentrations et des Facteurs d'Enrichissement (FE) pour Fe, Zn et Pb et concentration en As et Hg dans les sédiments du Lac Dauriat, camp minier de Schefferville, Québec. Les FE sont normalisés à [Al] et calculés par rapport aux teneurs des sédiments de fond (pré-mine).

Analyses isotopiques de Pb et Zn

Les analyses isotopiques ont été effectuées au SARM à Nancy, France, au moyen du spectromètre de masse MC-ICP-MS (voir Annexe, Table 1, 2 et 3). 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 premières analyses montrent des variations isotopiques du Pb le long de la carotte de sédiment, ceci démontre bien la contribution de différentes sources au cours du temps, et ce pour les deux lacs (Figure 13). Le fractionnement isotopique du Pb retrouvé dans les sédiments lacustres de la région de Schefferville est dépendant des rapports U/Pb et de l'âge de l'échantillon (Figure 13). De plus le lac Oksana possède des valeurs plus radiogéniques que le lac Dauriat (Figures 13 et 14), principalement à la base de la carotte de sédiment. La raison est que ce Pb provient de l'érosion du sous-basement rocheux, qui est influencé par la dégradation de ^{238}U en ^{206}Pb (e.g. Komarek *et al.*, 2007). En comparant les rapports Zr/Th sur U/Pb de la base des carottes de sédiments des lacs Oksana et Dauriat, on peut en déduire que les deux lacs ont des bassins versants différents avec des compositions chimiques différentes. Les valeurs élevées de U/Pb du lac Oksana supporte l'hypothèse de valeurs élevées en Pb radiogéniques (Figure 14). Les variations isotopiques du Pb montre bien la contribution de différentes sources au cours du temps, et ce pour les deux lacs.

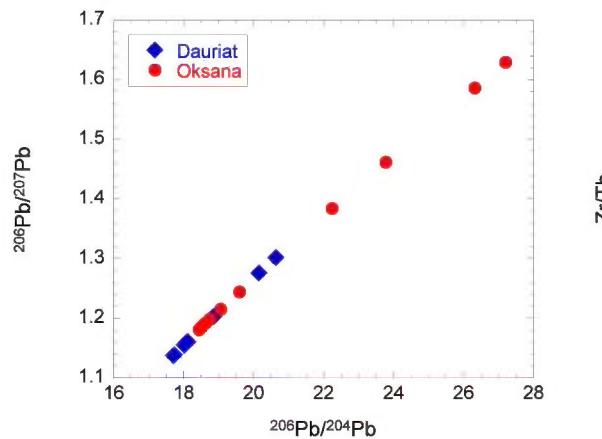


Figure 13. Diagramme tri-isotopique $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des sédiments des lacs Dauriat et Oksana

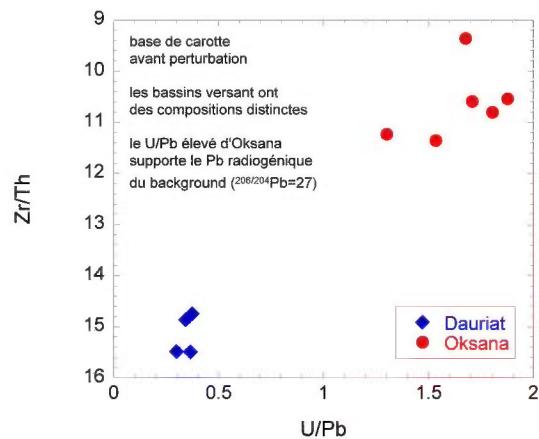


Figure 14. Relations entre le rapport Zr/Th et U/Pb de la base des sédiments des lacs Dauriat et Oksana

La variation du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des sédiments des lacs Dauriat et Oksana permet donc de documenter des changements de sources sédimentaires lacustres en Pb (Figure 15). Une augmentation marquée du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est mise en évidence pendant la période l'exploitation minière aux lacs Dauriat et Oksana. Cette augmentation, s'explique par l'apport d'une nouvelle source en Pb, de composition similaire pour les deux lacs; le plomb étant mis en circulation au début des opérations minières et durant le camp minier. Ce nouvel apport est aussi illustré par l'augmentation du flux de Pb pendant l'exploitation minière pour les deux lacs. La fin de la période mine est caractérisée par une diminution du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ pour les deux lacs qui indique un changement de source détritique. Ce plomb proviendrait du plomb remis en circulation à la fin des opérations minières.

La forte augmentation du Pb/Al₂O₃ durant le début de la période post-mine est suivi d'une diminution importante dans les sédiments de surface. Ce pic de Pb/Al₂O₃ marque l'apogée du Pb atmosphérique du 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 des deux lacs est inchangé ou ne se modifie pas, indiquant une source stable en Pb indépendamment du flux de déposition. Les valeurs isotopiques en Pb des sédiments de surfaces des deux lacs ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{Oksana}} = 37.900 \pm 0.026$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{Dauriat}} = 37.727 \pm 0.011$) 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).

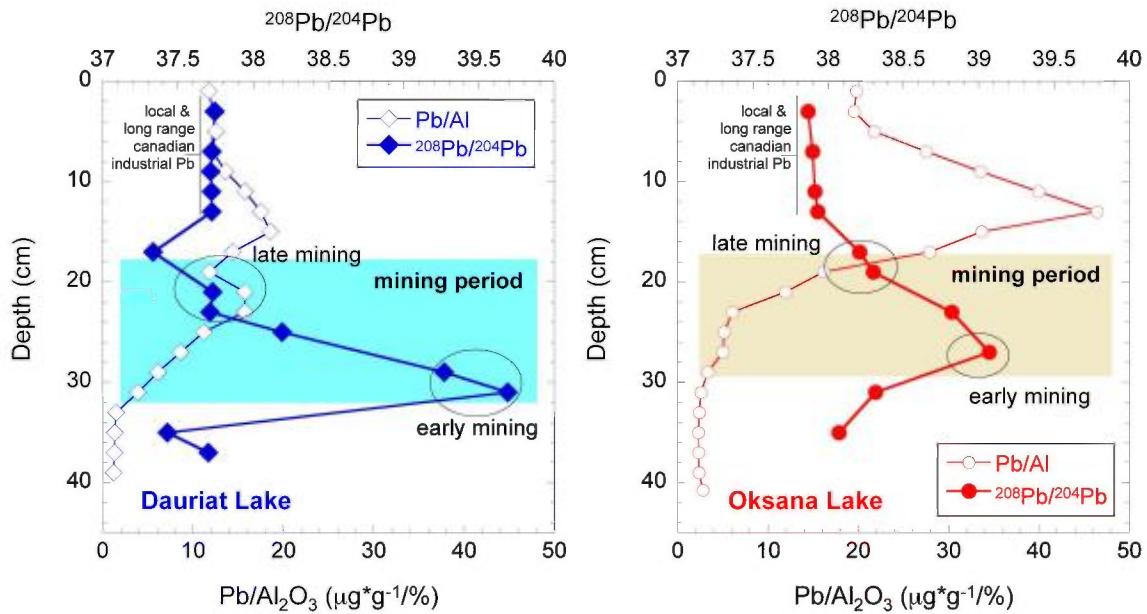


Figure 15. Variation de la composition chimique ($\text{Pb}/\text{Al}_2\text{O}_3$) et isotopique ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) des sédiments de lac Dauriat et Oksana en période pré-mine, mine et post-mine. Le panneau de gauche est celui du lac Dauriat, celui de droite du lac Oksana.

Les variations des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pb}$ des sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat permettent d'identifier quatre différentes sources de Pb (Fig. 16). Dans ce diagramme, un mélange de deux sources à compositions distinctes formera une ligne droite. La distribution des points suggère un minimum de trois sources pour chaque site. L'apport de Pb géogénique local durant la période pré-mine (de composition différente pour les deux lacs), l'apport de Pb local du début des opérations minières, correspondant à la période d'exploitation minière et l'apport de Pb local de la fin des opérations minières ainsi que le Pb provenant de retombées atmosphériques des longues distances durant la période post-mine.

Des analyses isotopiques en Zn ont également été effectuées sur les sédiments des lacs Dauriat et Oksana. La sphalerite (ZnS) et la smithsonite (ZnCO_3) sont les deux sources primaires de minéraux dans la géosphère. Le Zn est également un élément important dans la biosphère, où il joue un rôle essentiellement 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).

Les valeurs isotopiques en Zn varient de façon moins systématique que celle du Pb. Des analyses supplémentaires devront être faites sur les fractions lessivées pour mieux comprendre les variations isotopiques en Zn des deux lacs.

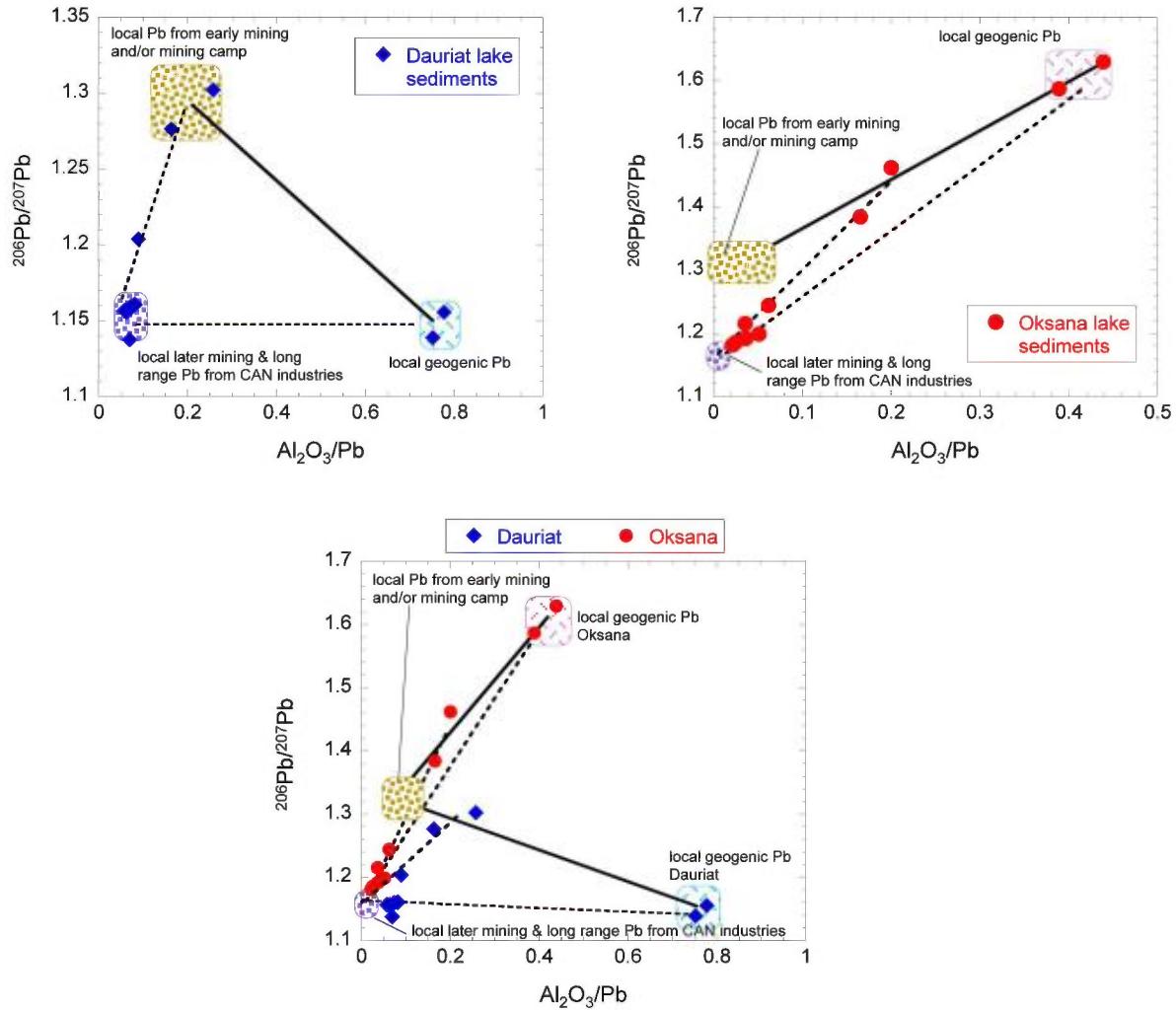


Figure 16. Variation des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pb}$ des sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat

Les variations des valeurs $\delta^{66}\text{Zn}$ des sédiments des deux lacs suivent à peu près la même tendance (Figure 17) avec cependant des valeurs $\delta^{66}\text{Zn}$ du lac Oksana plus positives (Figure 18). L'adsorption du Zn par la matière organique pourrait expliquer ces valeurs positives. Jouvin *et al.*, 2008 ont démontré que l'isotope lourd du Zn (^{66}Zn) est préférentiellement adsorbé sur de l'acide

humique (matière organique ($\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{AcideHumique-IonsLibre}} = + 0.24 \text{‰}$)) entraînant ainsi un $\delta^{66}\text{Zn}$ de matière organique plus élevé. Cette matière organique sédimente et pourrait expliquer les valeurs de $\delta^{66}\text{Zn}$ observées dans le lac Oksana. Une augmentation du $\delta^{66}\text{Zn}$ au début de la période minière suivit d'une diminution à la fin de cette période dans les sédiments du lac Oksana et Dauriat, démontre qu'il y a eu un changement de sources sédimentaires en Zn durant l'exploitation minière. Une chute de la concentration en Zn durant la période minière du lac Dauriat est également corrélée avec un changement de $\delta^{66}\text{Zn}$ et donc de source détritique. La surface des sédiments du lac Oksana est caractérisée par une très nette augmentation de la teneur en Zn, cette augmentation est plus modérée pour le lac Dauriat. Durant cette période d'enrichissement en Zn, les valeurs de $\delta^{66}\text{Zn}$ tendent vers 0.1 ‰ pour les deux lacs. Or Cloquet et al, ont démontré en 2006, que des valeurs proches de 0.1 ‰ pouvaient indiquer un apport de Zn anthropique. De nos analyses, il ressort que le Lac Dauriat semble beaucoup plus perturbé que le lac Oksana au niveau des apports de Zn, ceci peut s'expliquer par sa proximité du camp minier.

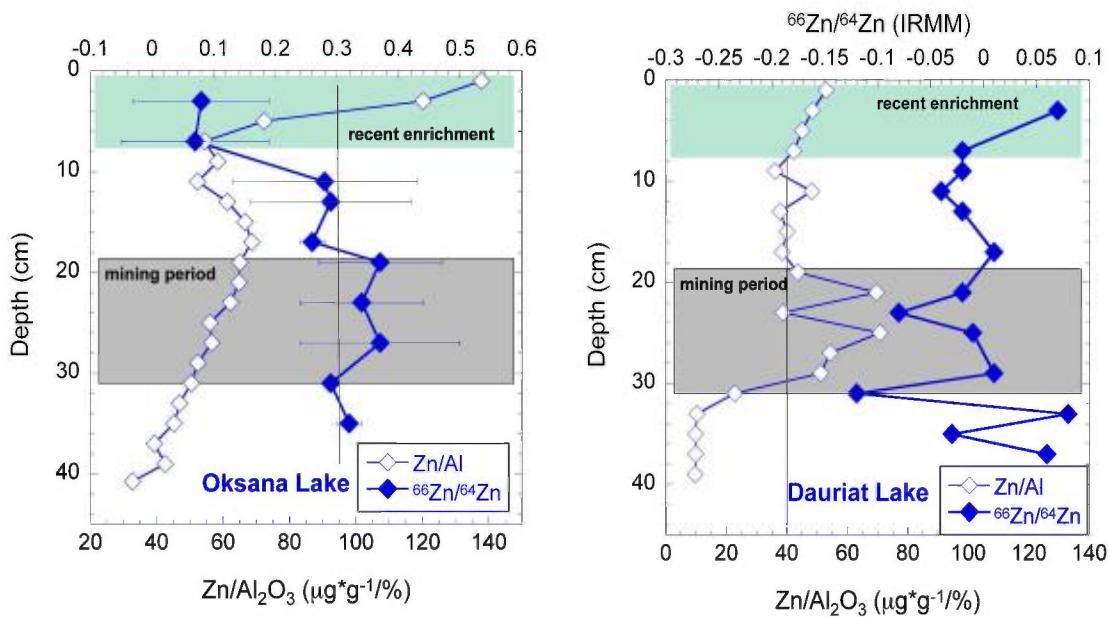


Figure 17. Variation des rapports Zn/Al et $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ (normalisés sur la référence standard IRMM-3702) des sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat.

Les différentes périodes minières peuvent être associées à différentes compositions isotopiques en Zn; pré-minière, minière, de transition et récentes (Figure 18). Comme dit

précédemment, les valeurs $\delta^{66}\text{Zn}$ du lac Oksana sont supérieurs à celles du lac Dauriat, probablement à cause de l'adsorption du Zn sur de la matière organique.

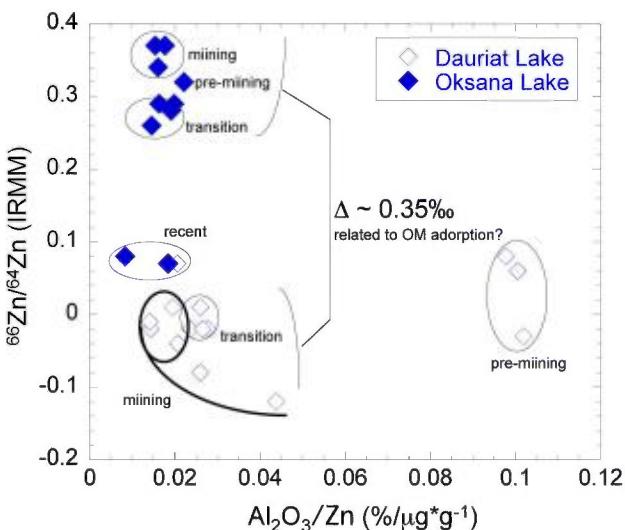


Figure 18. Variation des rapports $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn}$ des sédiments lacustres des lacs Dauriat (points blancs) et Oksana (points bleus)

Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés pendant l'année 2011-2012 ont permis de déterminer des variations de sources sédimentaires pour deux lacs (Dauriat et Oksana). L'étude régionale a permis de montrer qu'il existe un signal anthropogénique pour la distribution des différents métaux (Pb, Zn, Fe, Hg et Al). L'analyse des carottes de sédiments démontre que le cycle géochimique de surface de la région de Schefferville a été perturbé durant l'exploitation minière et que 30 ans après l'exploitation minière, le régime pré-industriel n'est toujours pas atteint. Les deux lacs étudiés jusqu'à maintenant (Oksana et Dauriat) n'ont pas subi les mêmes perturbations.

Les analyses isotopiques du Pb et du Zn des sédiments lacustres ont permis de préciser les différentes sources sédimentaires associées aux différentes périodes minières. En période pré-mine, les sources de Pb et de Zn proviennent de sources géogéniques locales. Durant la période minière, deux sources ont été identifiées pour le Pb (début et fin de l'exploitation minière), mais

une seule source à été identifiée pour le Zn. Pour la période post-mine, les sources de Pb et de Zn proviendraient de retombées atmosphériques de longue distance.

Pour la suite du projet, des analyses chimiques (majeurs et traces) et isotopiques (Pb, Zn, Fe) seront effectuées sur les fractions totales des carottes de sédiments du lac Ridge et Matemace. Des expériences de lixiviation sélective (spéciation) seront effectuées sur une sélection d'échantillons dans le but de déterminer les phases porteuses des métaux. Ces expériences de lixiviation seront pratiquées sur les carottes des quatre lacs qui ont été échantillonnés en mars 2012. Par la suite, des analyses isotopiques (Pb, Zn, Fe) seront réalisées sur des échantillons des fractions lessivées, sélectionnés en fonction de leur teneur et de leur distribution.

Afin de déterminer la composition chimique et isotopique de différentes sources potentielles des métaux, nous analyserons 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).

Finalement, une évaluation physico-chimique des conditions trophiques à l'aide des diatomées sera réalisée sur les carottes de sédiments prélevées aux lacs Ridge et Matemace. Nous espérons par cette étude apporter une meilleure connaissance des sources et des processus de redistribution des métaux, dans un écosystème ayant subit une pression anthropique minière, de façon à pouvoir minimiser l'impact du développement de nouvelles mines.

Références

- Barbeau M.T. 1987. Schefferville: relations inter-ethniques et dynamique du développement en milieu nordique. L'université du Québec à Chicoutimi. 12-17 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, No 2-3, pp. 187-198.
- 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.

- Cazes J. Ewing GW. 2005. Ewing's an analytical instrumentation handbook. CRC Press. 57-73 pp.
- Clark T. et 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 pp.
- 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.
- Cloquet C, Carignan J, Libourel G. 2006. Isotopic composition of Zn and Pb atmospheric depositions in an urban/peri-urban area of northeastern France. *Environ. Sci. Techn.* 40: 6594-6600.
- Couillard Y, Courcelles M, Cattaneo A, Wunsam S. 2004. A test of the integrity of metal records in sediment cores based on the documented history of metal contamination in Lac Dufault (Québec, Canada). *Journal of Paleolimnology.* 32: 149-162.
- Dimorth E. 1981. La géologie. Dossier sectoriel 2.2. Profil du Nord du Québec. OPD/UQAC, Chicoutimi, 224 pp.
- Humphrys G. 1958. Society Schefferville, Quebec: A New Pioneering TownAuthor. *Geographical Review.* 48: 151-166.
- Jenkin G. 2011. Beyond mining. *Nature geoscience*, 653 pp.
- Jouvin D, Louvat P, Juillet F, Maréchal C.N, Benedetti M.F. 2008. Zinc Isotopic fractionation: Why organic matters. *Environ. Sci. Techn.* 43: 5747-5754.
- Komarek M, Ettler V, Chrastny V, mahakjevic M. 2007. Lead isotopes in environmental sciences: A review. *Environment International.* 34: 562-577.
- Laperrière L, Pienitz R, Fallu MA, Hausmann S, et 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.
- Laperrière L, Fallu MA, Hausmann S, Pienitz R, et Muir D. 2008. Paleolimnological evidence of mining and demographic impacts on Lac Dauriat, Schefferville (subarctic Quebec, Canada) *J Paleolimnol.* 40: 309–324.

- Leslie K. et 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 J.Y. 2009. Réanalyse 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
- Plan Nord, 2011. Bibliothèque et archives nationales du Québec. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune.

Annexe:

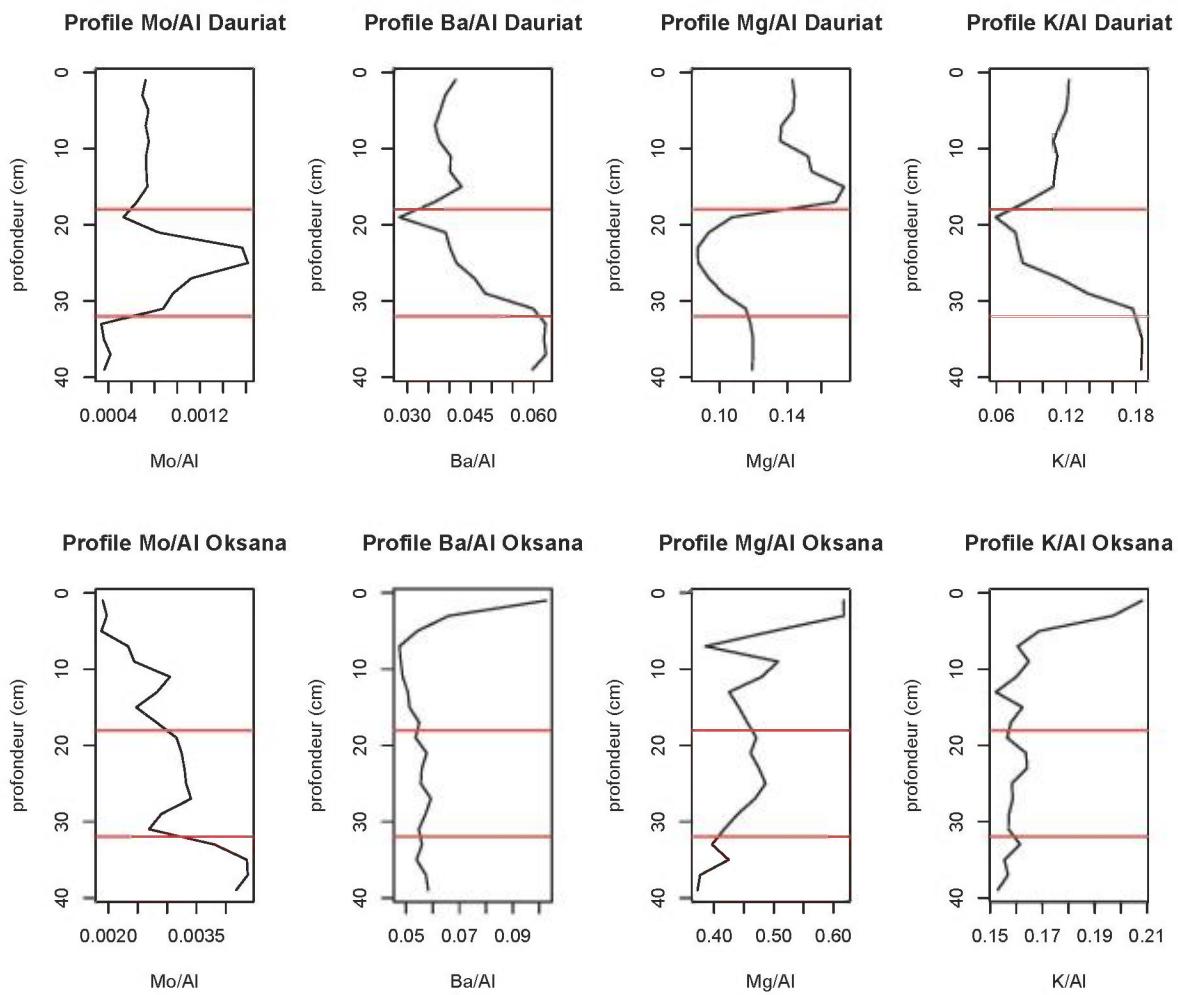


Figure 19. Variation de la composition chimique des sédiments (Mo, Ba, Mg, K) du lac Dauriat (en haut) et du lac Oksana (en bas), en période pré-mine, mine (entre les deux traits rouges) et post mine.

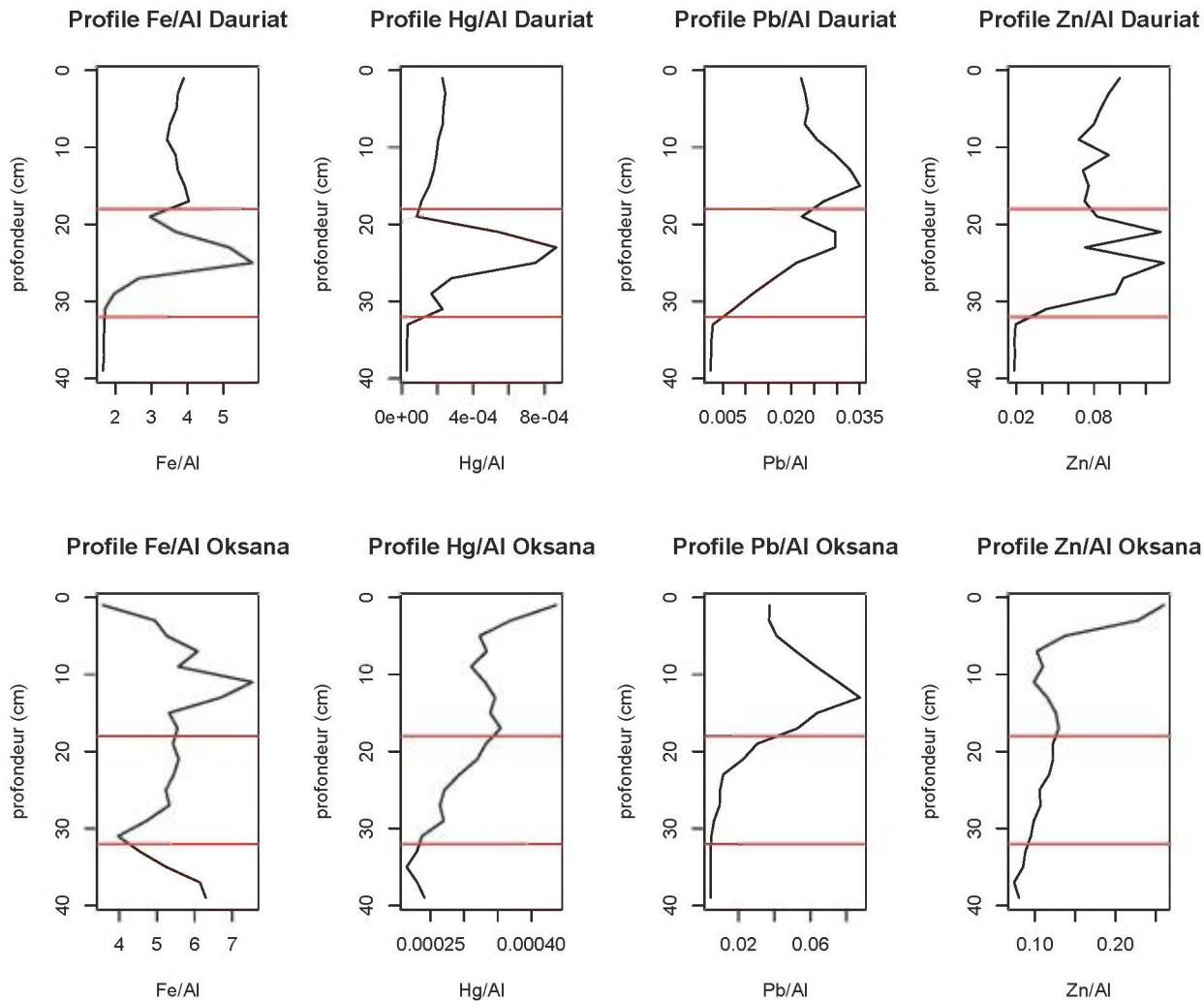


Figure 20. Variation de la composition chimique des sédiments (Mo, Ba, Mg, K) du lac Dauriat (en haut) et du lac Oksana (en bas), en période pré-mine, mine (entre les deux traits rouges) et post mine.

Table 1. Concentrations de Pb, Zn, Fe₂O₃ et rapports isotopiques en Zn des sédiments lacustres du lac Oksana (aux deux centimètres)

Ref Echantillon	profondeur (cm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Hg (ppb)	Fe2O3 (%)	Ctot (%)	δ ⁶⁶ Zn	δ ⁶⁷ Zn	δ ⁶⁸ Zn
Lac Oksana	1	27.2813	190.2	320	3.73	28.98	-	-	-
Lac Oksana	3	27.5586	169.5	275	5.27	27.86	0.08	0.14	0.17
Lac Oksana	5	34.5539	115.1	271	6.31	27.44	-	-	-
Lac Oksana	7	48.7114	96.31	313	8.16	28.25	0.07	0.07	0.16
Lac Oksana	9	60.7171	105.7	298	7.64	26.28	-	-	-
Lac Oksana	11	65.149	85.29	285	9.28	25.40	0.28	0.42	0.56
Lac Oksana	13	81.7232	107.8	323	8.94	25.43	0.29	-	-
Lac Oksana	15	61.9366	122.6	329	7.39	27.60	-	-	-
Lac Oksana	17	48.5678	119.4	326	7.30	28.37	0.26	0.41	0.51
Lac Oksana	19	28.5432	115.1	312	7.28	28.75	0.37	-	0.78
Lac Oksana	21	20.4875	111.5	290	7.24	29.53	-	-	-
Lac Oksana	23	10.2933	105.8	263	6.99	34.47	0.34	0.46	0.69
Lac Oksana	25	8.9443	97.49	249	6.89	29.03	-	-	-
Lac Oksana	27	8.5345	96.74	238	6.88	29.05	0.37	0.67	0.82
Lac Oksana	29	5.7845	90.63	247	6.19	29.40	-	-	-
Lac Oksana	31	4.9078	96.36	240	5.75	30.16	0.29	0.39	0.57
Lac Oksana	33	4.4677	88.63	230	6.52	29.76	-	-	-
Lac Oksana	35	4.3316	85.91	215	7.54	28.33	0.32	0.46	0.64
Lac Oksana	37	4.2205	71.56	221	8.44	28.52	-	-	-
Lac Oksana	39	4.2394	76.58	229	8.56	27.96	-	-	-
Lac Oksana	40.75	4.5083	53	245	7.90	30.13	-	-	-

Table 2. Concentrations de Pb, Zn, Fe₂O₃ et rapports isotopiques en Zn des sédiments lacustres du lac Dauriat (aux deux centimètres)

Ref Echantillon	profondeur (cm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Hg (ppb)	Fe2O3 (%)	Ctot (%)	δ ⁶⁶ Zn	δ ⁶⁷ Zn	δ ⁶⁸ Zn
Lac Dauriat	1	97.4544	439	1003	24.50	7.06	-	-	-
Lac Dauriat	3	102.9074	407.9	1093	23.84	7.15	0.07	0.14	0.13
Lac Dauriat	5	105.9484	381.2	1048	23.68	7.10	-	-	-
Lac Dauriat	7	105.8346	368.3	1061	23.19	7.12	-0.02	-0.01	-0.05
Lac Dauriat	9	121.4571	322.4	972	23.22	7.03	-0.02	0.02	-0.03
Lac Dauriat	11	132.1975	405.3	866	23.34	7.08	-0.04	0.05	-0.09
Lac Dauriat	13	147.2332	318.2	803	23.83	6.89	-0.02	-0.01	-0.06
Lac Dauriat	15	148.6508	321.4	653	23.79	6.95	-	-	-

Lac Dauriat	17	119.0127	318.6	488	25.30	6.10	0.01	0.06	0.02
Lac Dauriat	19	126.0334	464.4	478	23.84	7.29	-	-	-
Lac Dauriat	21	149.2556	660.6	2739	26.47	7.47	-0.02	-0.13	-0.11
Lac Dauriat	23	135.6039	333.7	3963	33.76	6.27	-0.08	-	-
Lac Dauriat	25	92.7646	587.7	3296	36.47	5.24	-0.01	0.1	-0.02
Lac Dauriat	27	95.6928	602.7	1641	22.29	6.33	-	-	-
Lac Dauriat	29	75.3605	630.8	1084	18.32	5.18	0.01	0.01	0.01
Lac Dauriat	31	44.5953	262.5	1390	14.83	3.21	-0.12	-0.08	-0.24
Lac Dauriat	33	16.2318	111.4	198	13.96	3.13	0.08	0.35	0.15
Lac Dauriat	35	14.7851	109.1	180	14.06	2.86	-0.03	-0.08	-0.06
Lac Dauriat	37	14.4315	111.6	167	14.27	2.74	0.06	0.69	0.13
Lac Dauriat	39	13.7219	110.1	167	14.24	2.90	-	-	-

Table 3. Composition isotopiques en Pb des sédiments lacustres des lacs Oksana et Dauriat

Ref Echantillon	profondeur (cm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
Lac Oksana	3	18.7521	15.6375	37.865	2.01923	0.83392	1.19916
Lac Oksana	7	18.6142	15.6176	37.896	2.03574	0.83899	1.19190
Lac Oksana	11	18.5054	15.6074	37.911	2.04859	0.84336	1.18573
Lac Oksana	13	18.4380	15.6063	37.929	2.05708	0.84635	1.18154
Lac Oksana	17	19.0576	15.6789	38.208	2.00483	0.82268	1.21553
Lac Oksana	19	19.5963	15.7474	38.300	1.95442	0.80353	1.24452
Lac Oksana	23	22.2396	16.0663	38.820	1.74553	0.72237	1.38434
Lac Oksana	27	23.7744	16.2618	39.069	1.64324	0.68395	1.46209
Lac Oksana	31	26.3148	16.5829	38.314	1.45588	0.63012	1.58700
Lac Oksana	35	27.1995	16.6908	38.071	1.39960	0.61360	1.62972
Lac Dauriat	3	18.1158	15.6087	37.744	2.08342	0.86157	1.16068
Lac Dauriat	7	18.1051	15.6003	37.724	2.08358	0.86163	1.16059
Lac Dauriat	9	18.0844	15.5949	37.717	2.08559	0.86231	1.15968
Lac Dauriat	11	18.0519	15.6004	37.722	2.08956	0.86416	1.15720
Lac Dauriat	13	18.0443	15.6010	37.725	2.09066	0.86457	1.15665
Lac Dauriat	17	17.7070	15.5672	37.334	2.10837	0.87912	1.13750
Lac Dauriat	21	18.0380	15.5984	37.730	2.09167	0.86473	1.15643
Lac Dauriat	23	18.0189	15.5945	37.713	2.09298	0.86544	1.15549
Lac Dauriat	25	18.8649	15.6725	38.192	2.02443	0.83072	1.20377

Lac Dauriat	29	20.1489	15.7858	39.268	1.94884	0.78343	1.27645
Lac Dauriat	31	20.6326	15.8454	39.689	1.92358	0.76796	1.30214
Lac Dauriat	33	20.3870	15.8147	39.352	1.93031	0.77572	1.28913
Lac Dauriat	35	17.7329	15.5702	37.429	2.11073	0.87804	1.13891
Lac Dauriat	37	18.0132	15.5893	37.701	2.09295	0.86542	1.15551

Table 4. Matrice de corrélation de “Pearson” sur variables normalisées

	Long	lat	pH	S	Ag	Al
Long	1					
lat	-0.234224438	1				
pH	0.267417842	-0.110360598	1			
S	-0.096799654	0.021808535	-0.014688093	1		
Ag	0.097801114	0.067229397	0.093828913	0.024419656	1	
Al	-0.035872411	0.003917991	0.210109901	-0.225644	0.473158551	1
As	-0.039080023	0.001627477	0.131332111	0.014238217	0.424083686	0.088496715
Au	0.065214062	-0.242118665	0.049903502	-0.002848017	0.251727097	0.242493442
Ba	0.271707703	-0.169689956	0.357284428	-0.233639208	0.417260011	0.546365647
Be	0.176107973	-0.117885454	0.240919079	-0.012473606	0.585344223	0.421475957
Bi	0.06589544	0.095704855	0.208218206	-0.113561346	0.577187852	0.30892743
Ca	-0.186919342	0.190665409	0.065820523	0.401022305	0.002957391	-0.052702069
Cd	-0.018391898	0.056858956	0.042572872	0.207397905	0.671890522	0.065550803
Ce	-0.003132571	-0.119210084	0.206779962	-0.086151664	0.607235995	0.65233093
Co	-0.176924725	-0.016012438	0.308069114	-0.009421927	0.327733592	0.710554266
Cr	-0.139327536	-0.093014747	0.186708421	-0.212733983	0.19013782	0.856404187
Cs	0.251870051	-0.047546998	0.27309354	0.034671035	0.481621235	0.403359275
Cu	-0.430702911	0.063572663	0.01585505	0.097071789	0.584517366	0.61770644
Fe	0.010226147	0.04926152	0.306720312	-0.039311878	0.393357653	0.514946631
Ga	0.157788603	-0.119472867	0.323991026	-0.325714926	0.3527007	0.869640517
Ge	0.100415891	-0.094841051	0.105971649	-0.043588348	0.190914965	0.156908284
Hf	0.102746963	0.025577631	0.259254878	0.158866074	0.258445662	0.171682957
Hg	-0.11445491	0.102224642	0.068389574	0.089008903	0.802699027	0.428124525
In	0.095315782	0.126553985	0.22224959	-0.196143116	0.465230034	0.611875991
K	0.398484354	-0.394502387	0.373206999	-0.170450507	0.297873655	0.636055601
La	-0.022815118	-0.110587711	0.130472255	0.018528989	0.631970601	0.486799133
Li	0.149601217	0.083421521	0.309076335	-0.196854243	0.294235364	0.769709663
Mg	-0.017178854	-0.03763578	0.297308533	-0.215060593	0.0972205	0.764304616
Mn	0.002966949	0.067773509	0.366349238	-0.164625233	0.34119091	0.394098523
Mo	0.161785878	-0.167822612	0.258344616	0.153392509	0.519907924	0.2922999
Na	0.161861761	-0.112698169	0.15180751	0.036922099	0.149450392	0.488762941
Nb	0.357479719	-0.423573037	0.122778811	-0.087479488	0.296064237	0.490835232
Ni	-0.232295373	-0.056941475	0.230750185	0.053419938	0.450942332	0.729744227
P	-0.048768139	0.019003494	0.176473015	-0.322990766	0.550407482	0.586514995
Pb	0.197541304	0.034454714	0.246683704	-0.108316653	0.506665043	0.456994464
Pd	0.033600885	0.050356189	-0.018215368	-0.032061053	0.084340415	0.1210883
Pt	-0.096033392	0.051076956	-0.031723841	0.962044968	0.076669551	-0.245191864
Rb	0.308624753	-0.277189453	0.387249183	-0.099728017	0.431005479	0.706802018
Re	0.010590066	0.119482138	0.114875826	0.478000988	0.399061246	-0.058842485
Sb	-0.087384338	0.266142671	0.033907293	0.168878542	0.509302841	-0.152557922
Sc	-0.116422285	0.102427523	0.190816647	-0.151608682	0.317966105	0.912690344
Se	-0.121416554	0.241141101	0.004857809	0.311544811	0.570890851	0.120929483
Sn	0.082975327	0.03393618	0.250395439	-0.280024656	0.340269181	0.571689473
Sr	0.07542756	-0.143997969	0.109886512	0.157086016	0.180468233	0.116956861

Te	-0.0455945	-0.070138081	0.155893877	-0.078120566	0.362862624	0.344120725
Th	0.24408948	-0.073751959	0.358828823	-0.071302685	0.170421312	0.416578671
Ti	-0.023490301	-0.269845748	0.22610449	-0.210366187	0.058047269	0.720296539
Tl	0.049263566	-0.207294832	0.389080083	0.070653571	0.517801181	0.691278385
U	0.201788732	-0.128550891	0.369691867	0.247175703	0.520034493	0.187624044
V	-0.033059224	-0.091973486	0.276343093	-0.296937398	0.297394683	0.869543662
W	0.529040328	-0.579382481	0.225005962	-0.100655269	0.035997388	0.307214449
Y	-0.08335708	-0.041868454	0.145950434	0.112024769	0.711410102	0.579096998
Zn	-0.008958715	0.046342215	0.128508228	0.17137023	0.647118321	0.335455577
Zr	0.091441473	0.014217609	0.253611229	0.192186676	0.257572633	0.194643022

Al	As	Au	Ba	Be	Bi	Ca
As	1					
Au	-0.008248049	1				
Ba	0.235944213	0.251285803	1			
Be	0.56880361	0.077829667	0.498121335	1		
Bi	0.666257035	-0.062014612	0.378435434	0.696378228	1	
Ca	-0.08563021	0.053276608	-0.036951729	-0.150585965	-0.12423428	1
Cd	0.613496882	0.068198793	0.168956008	0.554041169	0.49653807	0.104596051
Ce	0.4918801	0.157040497	0.456637596	0.68181516	0.5899142	-0.118907456
Co	0.395782359	0.109316749	0.549588796	0.564824289	0.41046776	0.012099422
Cr	-0.080548028	0.235463847	0.430319813	0.169498894	0.04217947	-0.05810007
Cs	0.373313033	0.023218025	0.414795625	0.632310959	0.57184298	-0.009218538
Cu	0.340361233	0.255403169	0.282038041	0.378025559	0.34902129	0.158753161
Fe	0.599471412	0.071448534	0.515889735	0.655056155	0.60320602	-0.118442945
Ga	0.186889013	0.183521159	0.618988805	0.44090111	0.42022675	-0.174478083
Ge	0.225692143	0.100470933	0.329002795	0.343729941	0.22746339	-0.081322596
Hf	0.563028145	-0.071377398	0.272891906	0.541166511	0.6368769	0.095945656
Hg	0.406865312	0.217605761	0.271240585	0.474837433	0.48132153	0.115513974
In	0.331767087	0.049104287	0.412872332	0.449528275	0.58336339	-0.081096677
K	0.162698629	0.253944214	0.636911342	0.44160442	0.35953607	-0.096635067
La	0.513087582	0.154609415	0.355425092	0.642896602	0.55257972	-0.014804712
Li	0.197602947	-0.014154287	0.432480491	0.432624502	0.49699021	-0.09865866
Mg	0.061064194	0.11473131	0.459426524	0.222274759	0.23812352	0.059813096
Mn	0.53266806	0.044491463	0.645476122	0.568992299	0.58835599	-0.039183728
Mo	0.639108489	0.196026018	0.451048124	0.484648524	0.41805092	0.034127574
Na	-0.110250273	0.277540759	0.276879539	-0.033903149	-0.08165108	0.31451568
Nb	-0.014780972	0.362403598	0.3508319	0.271490817	0.0216401	-0.157691247
Ni	0.297656055	0.215729915	0.551153174	0.49887148	0.30575322	0.086137509
P	0.248994594	0.273067625	0.580233787	0.369878701	0.38451085	-0.045640505
Pb	0.487327037	0.019357981	0.361095049	0.647118321	0.7169191	-0.157088471
Pd	0.056067413	0.029519987	0.088790629	0.0793351	0.09488033	0.020827923
Pt	0.039601481	-0.000928243	-0.258109797	0.005519357	-0.10111004	0.447576167
Rb	0.188073761	0.231683888	0.583521225	0.520624459	0.38339728	-0.081345668
Re	0.419423958	0.026539254	0.079332114	0.316337405	0.3743516	0.266603614
Sb	0.684788828	-0.067922229	0.002239621	0.438677492	0.59184071	0.025238849
Sc	0.030375065	0.193586732	0.462210605	0.282398148	0.23204453	0.053422298
Se	0.275846434	0.033105876	0.163363806	0.311929462	0.32863543	0.30320107
Sn	0.298611274	0.055694885	0.428657115	0.413729691	0.5194407	-0.188946987
Sr	0.071358403	0.207000985	0.222417958	-0.010479449	-0.07134427	0.51991649
Te	0.29168093	0.157406786	0.363412462	0.345306621	0.36535197	-0.018580877
Th	0.461668179	-0.09055157	0.407050859	0.569389764	0.6360523	-0.140375781
Ti	-0.085345185	0.266571895	0.414828875	0.135969565	-0.04454514	-0.112545269
Tl	0.325874643	0.271790207	0.65509982	0.624026908	0.40296473	0.082266775
U	0.514069633	0.073140281	0.434245055	0.660163367	0.57097708	0.111629891
V	0.137079528	0.232077547	0.586424067	0.348613007	0.31519248	-0.134487044

W	-0.178984946	0.340388129	0.376638482	0.082438204	-0.16982411	-0.156671598
Y	0.479981264	0.174846449	0.436764027	0.744734166	0.58258587	0.060720008
Zn	0.559864227	0.119795349	0.266728497	0.570435652	0.44703666	0.136217941
Zr	0.559037324	-0.08684272	0.226405866	0.533125802	0.62022276	0.092280293

Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu
Cd	1					
Ce	0.52238164	1				
Co	0.24390678	0.611650067	1			
Cr	-0.13084451	0.482764047	0.618142265	1		
Cs	0.45099833	0.609621262	0.417036467	0.28427205	1	
Cu	0.48791367	0.691134725	0.549295998	0.5336842	0.314157392	1
Fe	0.29112122	0.529199208	0.743756421	0.3659272	0.495244249	0.30622241
Ga	0.0107357	0.634262434	0.66609682	0.8172149	0.542101343	0.4485026
Ge	0.14963925	0.262265456	0.255255009	0.06894749	0.24881079	0.11098296
Hf	0.39637286	0.44314038	0.374433224	0.06316893	0.572710748	0.22825783
Hg	0.66316375	0.552207775	0.318643176	0.20557477	0.404872563	0.65849559
In	0.18180571	0.535678621	0.452153666	0.3699538	0.422231029	0.41232042
K	0.05621322	0.554915629	0.470520475	0.61827914	0.602952504	0.31831078
La	0.6486939	0.939550312	0.460356659	0.33812791	0.614951637	0.70460631
Li	0.01979366	0.576603853	0.627636131	0.64203207	0.537464939	0.36946141
Mg	-0.12525325	0.466979079	0.623733469	0.82604862	0.400646532	0.4263764
Mn	0.28000498	0.42248982	0.660202906	0.24542709	0.39944473	0.23550783
Mo	0.49450949	0.442169622	0.436649829	0.14798568	0.290761613	0.39585815
Na	-0.04701304	0.230581664	0.205718397	0.53262829	0.196603006	0.33991438
Nb	0.0595398	0.390074206	0.26893744	0.5495219	0.368239916	0.19967085
Ni	0.35323262	0.637872437	0.842382425	0.67126981	0.36716566	0.7555367
P	0.13890702	0.364282429	0.452041811	0.4156248	0.179813118	0.38224299
Pb	0.43482935	0.442027897	0.24625247	0.609391746	0.35580757	
Pd	0.01802335	0.079055103	0.064042177	0.0969627	0.088224997	0.0456285
Pt	0.27696632	-0.079297946	-0.023937456	-0.24348263	0.047266234	0.12848598
Rb	0.20477998	0.644967598	0.579221056	0.69626527	0.70550256	0.38723278
Re	0.47375296	0.140992566	0.148441096	-0.21034759	0.203979072	0.19980726
Sb	0.75725835	0.337450551	0.061192148	-0.32791336	0.319577701	0.30976142
Sc	-0.0547894	0.506479923	0.690468238	0.83931806	0.295753957	0.56414348
Se	0.46003233	0.189014347	0.189395302	-0.06825821	0.239872829	0.31959258
Sn	0.14025466	0.512121506	0.467944047	0.46603532	0.496016801	0.34401274
Sr	0.26747259	0.180556848	0.043718437	0.08587046	0.110385975	0.34860566
Te	0.2127359	0.330350215	0.390515111	0.23073831	0.216322583	0.31131198
Th	0.15938295	0.514695547	0.566985605	0.32568011	0.616637801	0.13753775
Ti	-0.14436841	0.43889782	0.531353413	0.89023574	0.270745452	0.41085266
Tl	0.37705628	0.659835167	0.778943544	0.55897878	0.5539941	0.55012169
U	0.56598053	0.506361073	0.409963212	0.06896112	0.585956896	0.26113532
V	-0.05788999	0.542410495	0.708842954	0.86740279	0.384028254	0.50370874
W	-0.1900301	0.135711661	0.12155946	0.37916861	0.100846178	-0.03653868
Y	0.64533293	0.836139303	0.608959625	0.35657414	0.596412773	0.72394316
Zn	0.86652341	0.625299702	0.482882847	0.17695739	0.547183421	0.5862084
Zr	0.41816749	0.499524477	0.392128814	0.1167417	0.621324284	0.28032421

Cu	Fe	Ga	Ge	Hf	Hg	In
Fe	1					
Ga	0.56834798	1				
Ge	0.37878539	0.19731887	1			
Hf	0.55917985	0.34826329	0.204594304	1		

Hg	0.32205097	0.28325978	0.092703128	0.28157687	1	
In	0.45407512	0.61562916	0.178112219	0.35498478	0.40922303	1
K	0.4123329	0.83709989	0.22086108	0.39558131	0.18709859	0.47155319
La	0.42640033	0.46694966	0.23082843	0.45675982	0.6119177	0.43306323
Li	0.50829936	0.85691949	0.093081911	0.40797774	0.27484941	0.64927057
Mg	0.42315504	0.88497943	0.086095031	0.29609652	0.12568404	0.47854421
Mn	0.81924307	0.47626441	0.36739965	0.47506755	0.26302211	0.42499991
Mo	0.51543447	0.30235726	0.245314228	0.32745567	0.41946991	0.2852044
Na	0.01847768	0.47459363	-0.003424657	0.02993378	0.1239812	0.23289316
Nb	0.21633799	0.57227895	0.085604875	0.1008502	0.20028714	0.14203638
Ni	0.51310919	0.61657073	0.20609137	0.23076266	0.47874843	0.40858657
P	0.51301332	0.47907839	0.230415476	0.01632115	0.40021749	0.4766185
Pb	0.53051364	0.55364639	0.171278767	0.5168424	0.47532961	0.53668748
Pd	0.13793786	0.14735816	0.183493755	0.13497276	0.10462793	0.12973755
Pt	-0.0767921	-0.36475809	-0.060418602	0.1479691	0.15189759	-0.21108787
Rb	0.53610807	0.84696736	0.186213183	0.41399915	0.35118096	0.41235326
Re	0.22924063	-0.0770478	0.077898132	0.3556426	0.38201012	0.1442668
Sb	0.29329077	-0.12412803	0.112911004	0.46194833	0.52238349	0.13833403
Sc	0.50680384	0.79550164	0.135840275	0.20587457	0.35942679	0.56756491
Se	0.26840122	-0.05428317	0.154383251	0.16476664	0.51116714	0.20429856
Sn	0.4908242	0.68385513	0.165488359	0.35708921	0.33083272	0.50182224
Sr	-0.16833602	0.06802602	-0.038846505	0.02917841	0.25763648	0.04276926
Te	0.3852932	0.32020134	0.219886684	0.18612082	0.32271876	0.34746933
Th	0.71113088	0.65082122	0.241085861	0.7858155	0.14395834	0.50046334
Ti	0.31719465	0.78057605	0.082962361	0.09965184	0.08497873	0.22847701
Tl	0.61059279	0.66370725	0.263286826	0.34874863	0.48434875	0.41101811
U	0.5454594	0.29539036	0.232209572	0.55490173	0.44001884	0.22823281
V	0.57446916	0.93002878	0.212185696	0.24986491	0.25595742	0.55385519
W	0.02552553	0.38703534	0.099153515	-0.1164063	-0.04860386	0.04716102
Y	0.54787082	0.45136955	0.291292113	0.41576019	0.69261005	0.4602892
Zn	0.41688024	0.28226542	0.148459905	0.40985934	0.65455452	0.28615235
Zr	0.54680931	0.38194926	0.188487093	0.95220626	0.30886735	0.34523188

In	K	La	Li	Mg	Mn	Mo
K	1					
La	0.457789617		1			
Li	0.644785994	0.42183381		1		
Mg	0.7379622	0.32718863	0.796754095		1	
Mn	0.355023174	0.32969123	0.399935419	0.36565234		1
Mo	0.347863197	0.44048128	0.194088374	0.14913633	0.474357792	1
Na	0.56345569	0.21336519	0.376539914	0.55194994	-0.003006468	0.19833811
Nb	0.62422166	0.33358941	0.337703771	0.43049646	-0.018095224	0.21763421
Ni	0.491117173	0.55423453	0.522495455	0.5958659	0.465457248	0.48048881
P	0.332957284	0.25290593	0.308001211	0.31674678	0.575007302	0.40800302
Pb	0.462055125	0.56004553	0.422310397	0.37287127	0.449445027	0.33610723
Pd	0.1105859	0.05515867	0.096689353	0.1295806	0.093195757	0.03583114
Pt	-0.208592935	0.04807978	-0.216759923	-0.25943317	-0.203450194	0.16920056
Rb	0.858390471	0.55763427	0.698987329	0.71041962	0.398217831	0.34010666
Re	-0.006374727	0.21291806	0.001940309	-0.12365068	0.204055664	0.43939553
Sb	-0.107798337	0.45426104	-0.062485273	-0.24630848	0.282595826	0.4195034
Sc	0.542608103	0.3561942	0.757609247	0.76566825	0.385622098	0.20148708
Se	-0.09465027	0.24864441	-0.011602697	-0.14612878	0.23471911	0.31894583
Sn	0.561715289	0.39585408	0.630754756	0.5683713	0.422988929	0.24115646
Sr	0.210771606	0.2757551	0.023791152	0.13084681	-0.083900517	0.34298522
Te	0.258211281	0.26568303	0.227005787	0.20889736	0.401176298	0.33091869
Th	0.620249141	0.41862651	0.70975473	0.58057877	0.584189688	0.27134479

Ti	0.682609953	0.31292455	0.523463277	0.79687434	0.213097362	0.12578083
Tl	0.646511896	0.56025396	0.538282991	0.54998497	0.553981993	0.48988533
U	0.385773203	0.5348495	0.265594749	0.178362	0.51828586	0.56885109
V	0.736572583	0.36553407	0.724243765	0.86710466	0.487232005	0.292405
W	0.544579556	0.05109441	0.176827243	0.27852389	-0.001895673	0.24636949
Y	0.393100816	0.85028927	0.441348463	0.2917399	0.45199861	0.49511291
Zn	0.255951529	0.70322883	0.295884567	0.18803752	0.339296218	0.52541077
Zr	0.423813997	0.52335178	0.449619277	0.34219053	0.411541423	0.30903034

Mo	Na	Nb	Ni	P	Pb	Pd
Na	1					
Nb	0.404625499	1				
Ni	0.340630806	0.29459982	1			
P	0.223119331	0.17202819	0.45568475	1		
Pb	0.098401261	0.23667989	0.3414656	0.32230273	1	
Pd	0.056618733	0.0999585	0.06447939	0.08970172	0.06821031	1
Pt	0.030667433	-0.06307997	0.0489237	-0.33076635	-0.09894269	-0.044015641
Rb	0.436779113	0.70223507	0.56148209	0.33177483	0.55431372	0.096785623
Re	-0.07526167	-0.0853188	0.1829258	0.02082974	0.2166706	-0.008176448
Sb	-0.248003049	-0.19629636	0.08753399	0.03917593	0.42516274	0.018010224
Sc	0.493111246	0.36408502	0.68651484	0.49072929	0.36401402	0.131364467
Se	-0.043762759	-0.07253557	0.24782946	0.34697604	0.18838645	0.041424138
Sn	0.195709888	0.33939894	0.41116828	0.38212695	0.62333347	0.123800007
Sr	0.556233629	0.14139653	0.25571435	0.02339937	-0.01166386	0.015337869
Te	0.08259736	0.10377854	0.38708328	0.44952612	0.29748263	0.07636748
Th	0.117940513	0.26520054	0.32169974	0.1230214	0.60725019	0.156821029
Ti	0.528950614	0.64359208	0.56732473	0.25092254	0.18770693	0.092368367
Tl	0.283313598	0.44502486	0.78298149	0.4607563	0.47691976	0.074929053
U	-0.001763691	0.22921767	0.37176038	0.24728423	0.48670208	0.078149469
V	0.443943315	0.51843637	0.6744712	0.54123181	0.41284296	0.146294934
W	0.41438401	0.60842112	0.19094217	0.17292594	0.02481317	0.054043301
Y	0.157586701	0.26821781	0.69077664	0.40895495	0.54986181	0.063802706
Zn	0.182808951	0.23727765	0.56153486	0.19941096	0.49146199	0.053045684
Zr	0.057194187	0.17272602	0.2603577	-0.0668956	0.53805226	0.140878264

Pd	Pt	Rb	Re	Sb	Sc	Se
Pt	1					
Rb	-0.113240356	1				
Re	0.51333908	0.043280736	1			
Sb	0.218183581	-0.001666655	0.509847875	1		
Sc	-0.174414715	0.610660871	-0.036651847	-0.211833751	1	
Se	0.368416607	0.043853226	0.530594911	0.379415048	0.1342789	1
Sn	-0.296498753	0.570891975	0.019448886	0.120426084	0.50435807	0.039183475
Sr	0.194067661	0.104506097	0.076093039	0.080271051	0.06240382	-0.015284266
Te	-0.088409029	0.257956675	0.21845338	0.148858785	0.30592055	0.209375217
Th	-0.113431366	0.62929992	0.162244177	0.180120839	0.45585155	-0.019444154
Ti	-0.25844461	0.730767638	-0.258997873	-0.33001007	0.69277	-0.262634126
Tl	0.062979309	0.76034397	0.260704598	0.127668948	0.5896531	0.284174626
U	0.26206855	0.535977597	0.497693153	0.500719297	0.09537537	0.427100324
V	-0.342853205	0.747821478	-0.073912961	-0.176070291	0.84049926	-0.013701014
W	-0.127251456	0.442264303	-0.177424608	-0.406348015	0.22620436	-0.23018989
Y	0.154185862	0.543761236	0.329467861	0.423590318	0.48417474	0.456989603
Zn	0.22842712	0.435141215	0.3693007	0.590926765	0.2325806	0.355248312

Zr	0.188513924	0.478224957	0.345442032	0.473149146	0.23638661	0.148081534
----	-------------	-------------	-------------	-------------	------------	-------------

Se	Sn	Sr	Te	Th	Ti	Tl
Sn	1					
Sr	-0.02148032	1				
Te	0.27548677	0.034447219	1			
Th	0.54112921	-0.134482279	0.23252012	1		
Ti	0.41479161	0.111294017	0.15947895	0.35420848	1	
Tl	0.45423085	0.165251929	0.39311458	0.46658132	0.55232168	1
U	0.25020497	0.074670657	0.27042562	0.49960084	0.08635721	0.61552259
V	0.62568213	0.000753527	0.37051236	0.5350668	0.8267796	0.65419255
W	0.12010881	0.251376137	0.10020296	0.08611344	0.49426755	0.30566957
Y	0.37390869	0.184643524	0.37522228	0.39526273	0.25201968	0.68941538
Zn	0.2640339	0.360832499	0.21705749	0.31080618	0.14747232	0.53674392
Zr	0.38069975	0.053632384	0.16135145	0.81573383	0.16355968	0.36720611

Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr
U	1					
V	0.216640515	1				
W	0.067342579	0.342878393	1			
Y	0.617332377	0.408565765	0.029243424	1		
Zn	0.553551575	0.205884193	-0.044682333	0.68787754	1	
Zr	0.566102991	0.273588427	-0.108838316	0.45753351	0.458698956	1

En rouge les corrélations avec un score élevé pour le Zn avec les autres éléments, en Bleu le Pb, en jaune le Fe, en vert l'Al et en gris pâle les corrélations supérieur à 0.9.