

# Développement d'outils d'évaluation du milieu récepteur pour l'industrie minière

Yves COUILLARD<sup>1</sup>, Stéphane MASSON<sup>2,8</sup>, Alice HONTELA<sup>3</sup>, Bernadette PINEL-ALLOUL<sup>4</sup>, Caroline OLSEN<sup>5</sup>,  
Louis MARTEL<sup>4</sup>, Lise PARENT<sup>7</sup> et Peter G.C. CAMPBELL<sup>2</sup>

1. Direction de l'Évaluation Écologique, Environnement Canada, Gatineau, QC
2. INRS Eau, Terre et Environnement, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, QC
3. Department of Biological Sciences, University of Lethbridge, Lethbridge, AB
4. Département de sciences biologiques, Université de Montréal, Montréal, QC
5. COREM, Québec, QC - 6. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), Ministère du Développement durable, de l'environnement et des Parcs du Québec, Québec, QC
7. Télé-Université, Université du Québec à Montréal, Montréal, QC
8. Aquarium du Québec, Québec, QC

**Contacts :** Yves.Couillard@ec.gc.ca ou masson.stephane@sepaq.com ou alice.hontela@uleth.ca  
ou bernadette.pinel-alloul@umontreal.ca ou caroline.olsen@corem.qc.ca ou louis.martel@mddep.gouv.qc.ca ou  
lise\_parent@teluq.quebec.ca ou peter.campbell@ete.inrs.ca

## Abstract

From 2001 to 2004, we conducted a research project to develop tools for the ecological assessment of aquatic environments receiving mining effluents. These tools were designed to contribute to better define environmental discharge objectives for these types of effluents. Our project focused on two rivers in the Abitibi-James Bay mining region in northwestern Quebec. The most convincing results of our research include the development of a technique for the direct measurement of the free metal ion in solution (Cd, Ni, Zn); the validation of three organisms as biomonitors of trace metal contamination in lotic environments: the burrowing larvae of the Ephemera *Hexagenia limbata*, the amphipod crustacean *Hyalella azteca*, the bivalve *Pyganodon grandis*; and the identification of a laboratory toxicity test using the microalga *Pseudokirchneriella subcapitata* as a metal-sensitive assay to test waters from the receiving environment.

## Résumé

De 2001 à 2004, nous avons mené un projet de recherche visant à développer et/ou à valider des outils de diagnostic des effets écotoxicologiques des effluents miniers dans le milieu aquatique afin de mieux définir des objectifs environnementaux de rejets pour l'industrie minière. Ce projet a été réalisé sur deux rivières de la région minière de l'Abitibi-Baie-James dans le nord-ouest du Québec. Parmi les outils diagnostiques les plus importants qui ont été développés et/ou validés, notons une technique de mesure directe de l'ion métallique libre en solution (Cd, Ni, Zn); l'utilisation de trois organismes comme biomoniteurs de contamination métallique en milieu lotique: la larve fouisseuse de l'éphémère *Hexagenia limbata*, le crustacé amphipode *Hyalella azteca*, le bivalve *Pyganodon grandis*; et le test de toxicité en laboratoire, sur l'eau du milieu récepteur, avec la micro-algue *Pseudokirchneriella subcapitata*.

## Introduction

Depuis quelques années, un consensus s'est développé dans le milieu scientifique, et incidemment auprès des gestionnaires de l'environnement, à l'effet que la gestion de la toxicité des rejets miniers dans les lacs et rivières ne tient pas suffisamment compte des caractéristiques mêmes du milieu récepteur. Les approches de gestion basées essentiellement sur la détermination de la toxicité des effluents miniers en laboratoire, de la persistance ainsi que de la bioaccumulation des métaux ne représentent pas de façon rigoureuse et élaborée ce qui survient réellement dans le milieu récepteur (Chapman 2008). Afin de mieux identifier les impacts des activités industrielles reliées aux métaux, une plus grande attention doit être portée notamment à l'influence de la qualité de l'eau du milieu récepteur sur la biodisponibilité des métaux, à l'importance de l'ion libre métallique dans la bioaccumulation et la toxicité ainsi qu'aux effets mesurés sur les organismes indigènes des milieux récepteurs (Campbell et al. 2006). Pour ce faire, nous proposons une approche multidisciplinaire qui intègre les divers aspects qui caractérisent et définissent les milieux récepteurs (hydrologie, géologie, géochimie, biologie, écologie, etc.). C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent projet. Les outils de diagnostic écotoxicologique développés serviront à mieux circonscrire les impacts des activités minières sur l'environnement aquatique.

## Objectifs

L'objectif général de ce projet est de développer des outils de diagnostic écotoxicologique qui tiennent compte des particularités du milieu récepteur aquatique afin de contribuer à la définition d'objectifs environnementaux de rejets pour les effluents miniers. Le développement de ces outils s'appuie sur trois types de mesures: des mesures d'expo-

sition, des mesures d'effets, et des mesures de relation causale visant à établir le lien entre l'exposition et les effets.

Les objectifs spécifiques sont :

- l'évaluation de cinq organismes comme biomoniteurs de la présence de métaux traces dans le milieu récepteur;
- la validation de la métallothionéine (MT) comme biomarqueur d'exposition et d'effet, propre aux métaux, chez trois organismes sentinelles ;
- l'évaluation de la toxicité des effluents miniers à partir de tests de toxicité usuels réalisés en laboratoire sur des échantillons d'eau du milieu récepteur ;
- \_ le développement d'une mesure directe de la formation du métal dans un échantillon d'eau obtenu *in situ* par dialyse, comme mesure d'exposition (Technique d'échange ionique – TEI).

## Méthodologie

### Région d'étude

Deux rivières de la région minière de l'Abitibi-Baie-James, au nord-ouest du Québec, ont été sélectionnées pour ce projet, soit la rivière Colombière située près de Val d'Or et la rivière Allard localisée près de Matagami (figure 1). La rivière Colombière, relativement petite, ayant une largeur de 7 m et des profondeurs variant de 1 à 3.5 m dans l'aire

d'étude, offre beaucoup de zones d'ombre produite par les feuillages. La vitesse du courant est normalement faible, mais peut augmenter à 0.2-0.3 m/s selon l'abondance des pluies. La rivière Allard est une rivière plus importante ayant une largeur variant de 75 à 300 m. Sa bathymétrie est complexe, mais les zones peu profondes (~ 1.5 m) dominant et représentent 80 % de la surface de cette rivière. La vitesse du courant varie de négligeable à faible dans la région d'échantillonnage. Les eaux littorales de cette rivière se mélangent facilement entre elles lors des périodes venteuses.

Les sources de contamination en métaux de ces deux rivières proviennent à la fois du lessivage des mines abandonnées, des effluents des activités minières ainsi que des retombées atmosphériques provenant des émissions des cheminées des fonderies.

### Echantillonnage et analyses

En 2001, une étude pilote fut réalisée afin de caractériser le milieu d'un point de vue physico-chimique, géochimique et biologique. Nous nous sommes également intéressés à la mesure de métaux peu fréquemment suivis dans le milieu récepteur. Les stations d'échantillonnage étaient distancées d'environ deux kilomètres pour maximiser les différences entre les caractéristiques physico-chimiques et les concentrations en métaux, ainsi que pour diminuer les risques que les organismes que nous voulions étudier fréquentent deux zones adjacentes. Les stations furent choisies sur la base de la présence d'au moins une des espè-

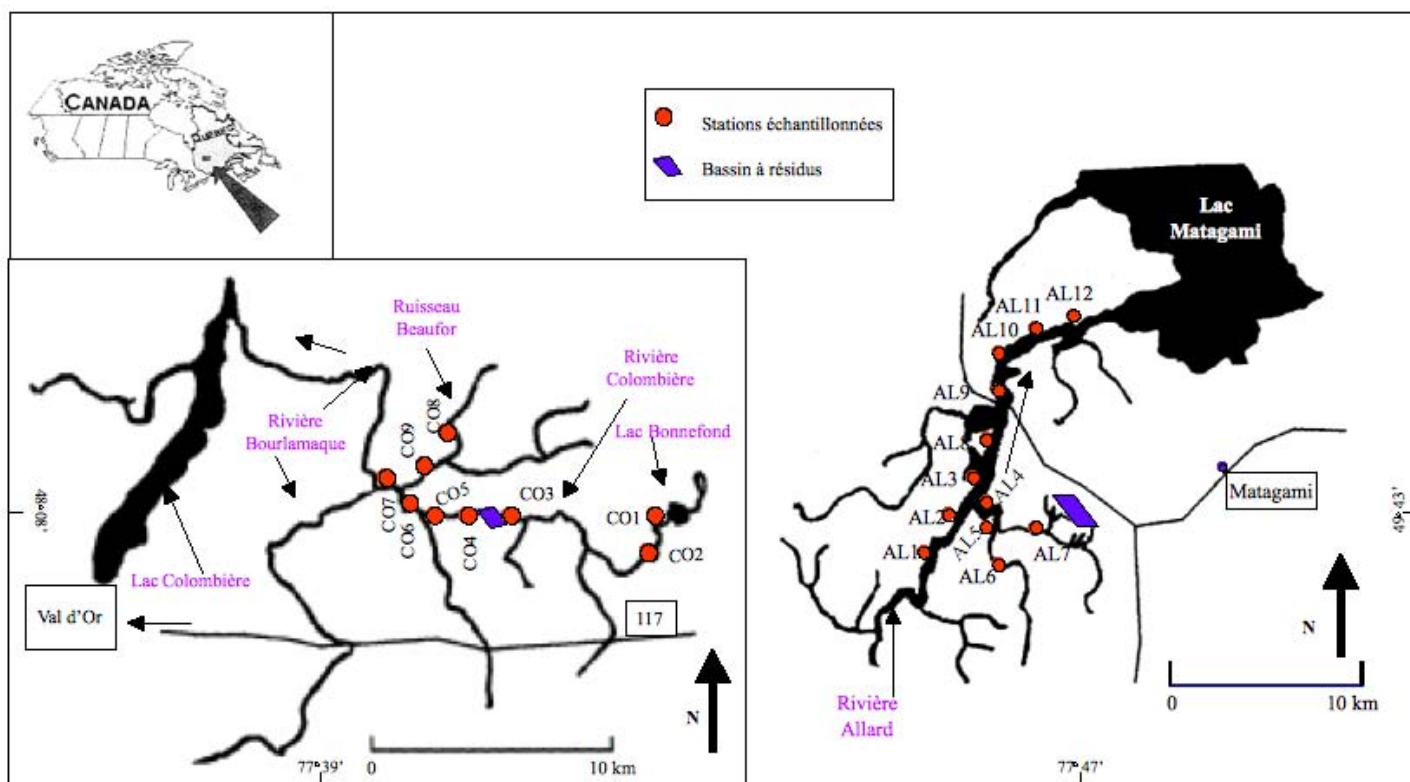


Figure 1 : Localisation des 22 stations d'échantillonnage sur les rivières Colombière et Allard dans la région minière de l'Abitibi-Baie-James.

ces sentinelles. Neuf stations ont été positionnées dans la rivière Colombière et 13 dans la rivière Allard (figure 1). Ces stations ont été échantillonnées entre 2002 et 2004 lors de l'étude détaillée.

Des sédiments de surface et des eaux superficielles furent prélevés pendant les étés 2002, 2003 et 2004 à chacune des stations. La caractérisation physico-chimique des eaux comprenait la mesure du pH, des anions et des cations majeurs (Ca, Mg, Na, K; Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>) ainsi que du carbone organique dissous (COD). Le Cd, le Cu et le Zn en phase dissoute furent mesurés de façon routinière. En 2003, 27 éléments furent suivis au niveau de plusieurs stations soient Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, La, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sr, Tl, U, V et Zn (Couillard et al. 2008). La quantification des métaux traces fit appel à une gamme de techniques analytiques comprenant la spectrométrie de masse ou d'émission couplée à un plasma inductif et la spectrométrie d'absorption atomique avec four au graphite ou à la flamme.

Les sédiments de surface oxydés (0,5 cm superficiels) furent soumis à une extraction partielle (hydroxylamine HCl) destinée à solubiliser les phases minérales non cristallines. Les métaux dans les digestats étaient ensuite mesurés à l'aide des techniques analytiques décrites plus haut.

Les anions majeurs étaient analysés par chromatographie ionique alors que le COD l'était par spectrophotométrie UV-visible.

La détermination des formes libres Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> et Zn<sup>2+</sup> dans l'eau impliquait l'utilisation de la dialyse *in situ* comportant une membrane filtrante de porosité 0,2 µm. Ces ions étaient par la suite mesurés à l'aide de la technique d'échange ionique développée par Fortin et Campbell (1998). Il s'agit d'une méthode de chromatographie ionique miniature consistant à faire passer une solution à tra-

vers une colonne de résine jusqu'à ce qu'un état stationnaire s'établisse, c'est-à-dire jusqu'à ce que la concentration des différentes espèces initialement en solution soit égale à la concentration des différentes espèces en solution à la sortie de la colonne. L'atteinte de cet état stationnaire indique qu'un équilibre est établi entre les réactifs et les produits formés (ions libres adsorbés sur la résine). Une fois l'équilibre établi entre la résine et l'échantillon, on fait expulser la solution de la résine et on la rince brièvement. Ensuite, pour déterminer la concentration de métal lié à la résine, il suffit de lixivier la résine avec un volume connu d'une solution acide (HNO<sub>3</sub>) pour déloger les ions en place. L'éluat récupéré peut ensuite être analysé par spectroscopie d'émission atomique pour déterminer la concentration en métal. Avec le poids exact de la résine, on peut calculer la concentration du métal sur la résine. Connaissant la masse de résine et le coefficient de distribution du métal entre la résine et la solution, on peut calculer la concentration d'ion métallique libre:

$$\{M^{z+}\} = \frac{[M_{\text{éluat}}] * V}{\lambda_{o,i,pH} * m_r}$$

où [M<sub>éluat</sub>] = la concentration dans l'éluat, V = le volume de l'éluat, λ<sub>o,i,pH</sub> = le coefficient de distribution (valable pour un pH donné, une force ionique donnée, et une [Ca] donnée), et m<sub>r</sub> = la masse de la résine.

Le CEAEQ (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec), en collaboration avec des scientifiques du ministère des Ressources naturelles du Canada (CANMET), a réalisé l'étude de la toxicité d'échantillons d'eau provenant des rivières à l'aide de différents tests de toxicité normés. Les travaux réalisés lors de la première saison d'échantillonnage (2001) visaient à documenter les réponses obtenues à partir d'une batterie de tests de toxicité appliquée à des échantillons d'eau provenant des rivières

Essais de toxicité	Référence
Microtox™, inhibition de la bioluminescence, 15 minutes	BNQ, 1987
<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> , inhibition de la croissance, 96 heures	CEAEQ, 2003
<i>Daphnia magna</i> , mortalité, 48 heures	CEAEQ, 2000
<i>Ceriodaphnia dubia</i> , inhibition de la reproduction et de la survie, 7 jours	Environnement Canada, 1992a
<i>Oncorhynchus mykiss</i> , mortalité, 96 heures	Environnement Canada, 1990
<i>Pimephales promelas</i> , inhibition de la croissance et de la survie, 7 jours	Environnement Canada, 1992b

Tableau 1 : Ensemble des tests de toxicité étudiés dans ce projet.

à l'étude. Ils ont aussi contribué à la sélection des stations d'échantillonnage retenues pour l'étude intensive (2002 à 2004).

La batterie de tests de toxicité appliquée lors des différentes saisons d'échantillonnage était composée de : (1) test Microtox™; (2) test d'inhibition de croissance de l'algue *P. subcapitata* (anciennement *Selenastrum capricornutum*); (3) test de létalité avec le microcrustacé *D. magna*; (4) test de reproduction et de survie avec le microcrustacé *C. dubia*; (5) test de létalité avec la truite Arc-en-ciel (*O. mykiss*); (6) test de croissance et de survie avec le méné Tête-de-boule (*P. promelas*). Le tableau 1 complète la description de ces tests.

### Espèces sentinelles

On entend par sentinelle, une espèce dont l'utilisation dans un suivi environnemental permet d'estimer le degré de contamination/dégradation d'un écosystème. Cinq espèces ont été étudiées: (1) un organisme filtreur : le mollusque bivalve *Pyganodon grandis*; (2) un organisme fouisseur des sédiments: la larve de l'éphémère *Hexagenia limbata*; (3) un organisme épibenthique: l'amphipode *Hyalella azteca*; (4 et 5) deux espèces de poissons, soit le grand brochet du nord *Esox lucius* et le doré jaune *Stizostedion vitreum*. La sélection de ces espèces reposait à la fois sur leur présence dans les rivières, leur relative sédentarité, la facilité à les échantillonner, leur tolérance aux métaux, leur capacité à bioaccumuler les métaux, leur capacité à synthétiser de la métallothionéine, et selon les données que nous possédions, leur physiologie et leur comportement.

Les travaux sur le terrain comprenaient le prélèvement d'organismes indigènes, et pour *P. grandis* et *H. azteca*, des expériences de transplantation à un ensemble de stations formant un gradient environnemental en métaux. Les tissus mous des organismes récoltés étaient homogénéisés ; un sous-échantillon d'homogénat était destiné à la détermination des métaux tissulaires et un autre sous-échantillon faisait l'objet d'une analyse en métallothionéine à l'aide d'une méthode de saturation métallique au Hg (la MT ne fut pas analysée dans *H. azteca*). Les détails des méthodes d'analyse de la MT et des métaux tissulaires sont présentés dans Masson et al. (2005), ainsi que dans Couillard et al. (1993). La validation de la métallothionéine (MT) comme biomarqueur d'exposition et d'effet chez trois organismes sentinelles (moule, éphémère et brochet) impliquait l'analyse des relations entre la concentration tissulaire en MT, la concentration des métaux dans le milieu naturel (eau et sédiment), ainsi que dans les tissus des trois espèces sentinelles.

## Résultats et interprétation

### Gradients de contamination

Les rivières Colombière et Allard affichaient des gradients de concentration pour plusieurs solutés, entre autres le Zn, le Cd, le Cu, le Ca et le SO<sub>4</sub>. Par exemple, les concentrations en métaux dissous variaient de la façon suivante ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): Colombière – Cd: 0.022-0.153; Cu: 1.6-17.2; Zn: 0.0-53.9; Allard – Cd: 0.026-0.087; Cu: < limite de détection-4.7; Zn: 2.7-59.5. Les stations de référence se démarquaient bien de celles contaminées en métaux qui étaient situées plus près des effluents miniers. Dans chacune des deux rivières, on pouvait observer les gradients de contamination en métaux tout au long de la période estivale et ce, pour toutes les années d'étude. Les concentrations en métaux étaient mesurées dans les sédiments et dans l'eau (pour de plus amples détails, voir Masson et al. 2005).

Outre le Zn, le Cd et le Cu, nous nous sommes intéressés à d'autres métaux moins fréquemment mesurés dans le milieu naturel. Des gradients ont été observés dans les rivières Colombière et Allard pour 27 éléments en phase dissoute (énumérés en méthodologie) (Couillard et al. 2008). Dans la rivière Allard par exemple, les résultats obtenus ont démontré une contamination importante en sélénium issu de l'effluent minier. Dans la même rivière, les stations d'échantillonnage témoin et éloignées de l'effluent avaient des concentrations dissoutes en lanthane plus élevées que celles mesurées dans l'eau de l'effluent minier (tableau 2). Ces observations montrent l'importance d'estimer le bruit de fond biogéochimique du milieu récepteur dans le cadre d'études de suivi pour l'industrie minière (Couillard et al. 2008).

### Mesures des ions libres Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> et Zn<sup>2+</sup>

Pour les rivières Allard et Colombière, on observe un gradient pour les ions libres similaire à celui observé pour les éléments dissous dans l'eau et ceux mesurés dans les sédiments. À titre d'exemple, la figure 2 illustre la variation spatiale de l'ion Cd<sup>2+</sup> observée dans la rivière Allard lors de deux campagnes d'échantillonnage estivales en 2002. Aucun gradient en Ni<sup>2+</sup> n'est observé pour cette rivière.

Cependant, pour les deux rivières, la proportion de Cd<sup>2+</sup> et de Zn<sup>2+</sup> libres par rapport au métal dissous est plus importante près des effluents miniers, et c'est le même phénomène qui se répète pour le Ni<sup>2+</sup> dans la rivière Allard. Les proportions de tous les ions métalliques libres diminuent en aval et en amont du point de rejet des effluents miniers. En valeur absolue, ces proportions varient à travers les campagnes et les années, mais les gradients sont toujours localisés aux mêmes endroits. Les paramètres physico-chimiques les plus reliés aux variations des proportions d'ions libres près des sites miniers sont le calcium (principal) et les sulfates.

Afin de valider la méthode développée qui consiste à mesurer directement les concentrations des cations métalliques libres à l'aide de la technique d'échange ionique (TEI) dans l'eau du milieu récepteur dialysée *in situ*, les résultats obtenus seront comparés aux estimations obtenues par des modèles de spéciation en solution qui tiennent compte des caractéristiques spécifiques des eaux réceptrices.

### Études de toxicité

Lors de l'étude pilote durant laquelle une batterie de tests de toxicité a été appliquée sur les eaux du milieu récepteur, seul le test d'inhibition de la croissance de *P. subcapitata* (CEAEQ 2003) a donné des résultats valables. De plus, seuls les échantillons d'eau obtenus par dialyse *in situ* ont permis de mettre en évidence de la toxicité. C'est donc ce test qui a été retenu pour l'étude détaillée. La figure 3 présente le suivi spatio-temporel de l'inhibition de la croissance de *P. subcapitata* pour la rivière Allard. On y constate la présence d'une relation entre la toxicité et la position de la station dans l'axe amont-aval par rapport au point de rejet de l'effluent minier. Une prochaine analyse visera à établir des relations entre la réponse des tests de toxicité et les mesures de métaux dans le milieu récepteur et dans les espèces sentinelles.

### Organismes sentinelles

Des régressions linéaires ont été établies entre la concentration en métallothionéine (MT) et les concentrations en métaux tissulaires chez l'éphémère, la moule et le brochet. Une relation positive et significative entre la MT et le cadmium a été observée pour les trois espèces sentinelles ( $P \leq 0.05$ ; Masson et al. 2005). La MT ne fut pas mesurée dans l'amphipode *H. azteca* mais les concentrations de métaux mesurées dans les organismes transplantés répondaient fidèlement aux gradients de contamination de douze éléments (As, Cu, La, Mn, Ni, Sb, Se, Tl, U, V, Zn, et Cr;  $P \leq 0.05$ ; Couillard et al. 2008). Pour le bivalve *P. grandis*, les résultats intéressants ci-dessus sont assombris par le fait que l'espèce présentait de faibles densités d'individus et une répartition hétérogène des populations dans les rivières. Cependant, dans une étude comparative réalisée dans les lacs et rivières, on a clairement constaté que les deux espèces sentinelles *H. limbata* et *P. grandis* synthétisaient la MT en réponse à l'accumulation du cadmium (Masson et al., en préparation). Cette étude a d'ailleurs montré que la synthèse de MT semble plus importante en rivière qu'en lac et que le manganèse apparaît être un facteur important dans l'accumulation du cadmium chez l'éphémère. Quant aux poissons étudiés, la mobilité des individus dans ces écosystèmes constitue un obstacle important à leur utilisation comme biomoniteurs.

Métal	Au point de rejet de l'effluent	Site 5	Site 9	Site 12	Site immédiatement en amont du point de rejet de l'effluent
Se	86	13	2.8	0.78	0.23
La	0.14	0.79	0.94	0.99	0.80

Tableau 2 : Variations spatiales du Se et du La dissous ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; filtration sur membrane  $0.45 \mu\text{m}$ ) dans la rivière Allard recevant l'effluent d'un parc à résidus miniers (adapté de Couillard et al. 2008).

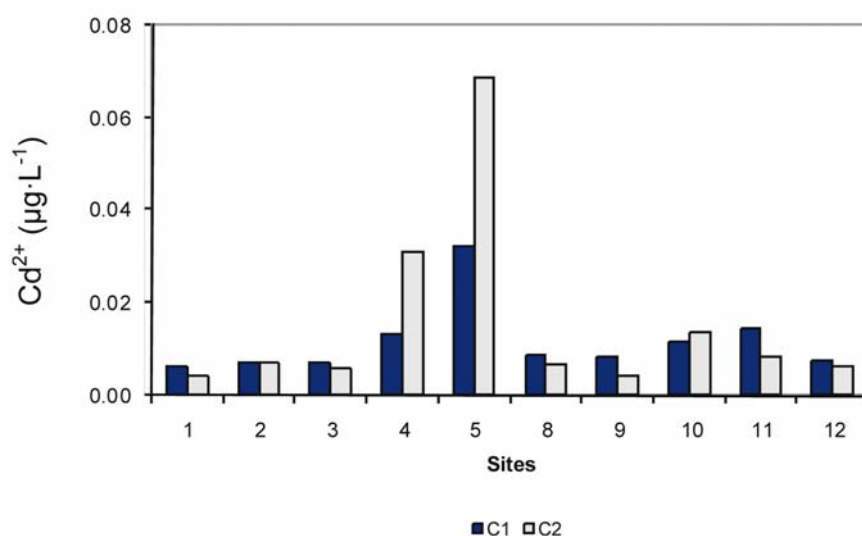


Figure 2 : Évolution spatiale du cadmium libre évalué par TEI pour la rivière Allard en 2002. C1 : campagne d'échantillonnage tenue au début de l'été; C2 : campagne d'échantillonnage tenue à la fin de l'été.

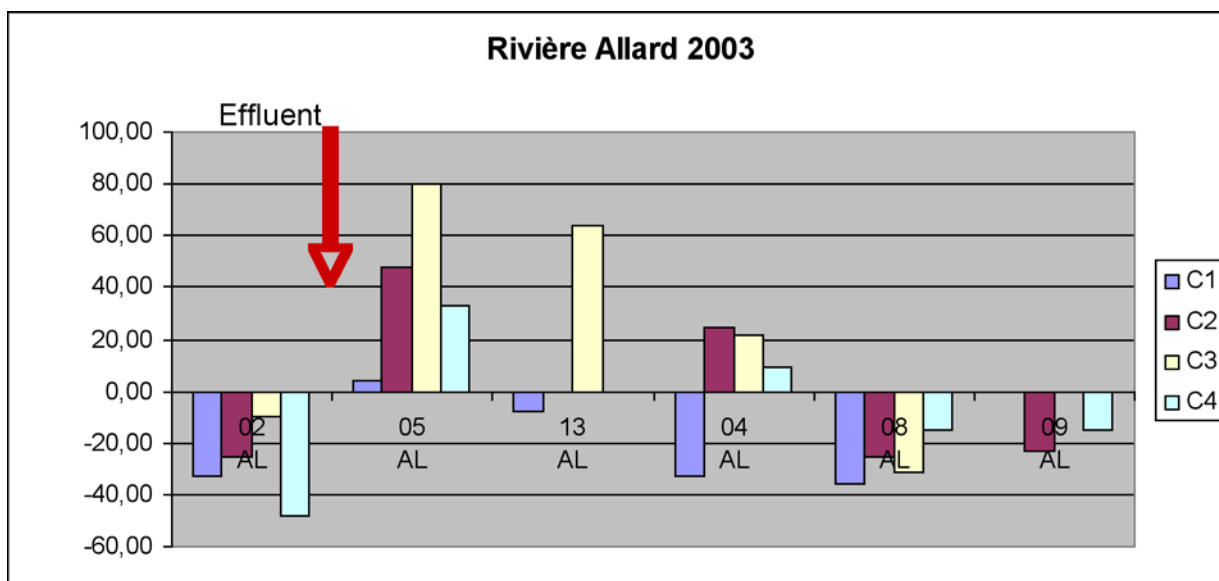


Figure 3 : Suivi spatio-temporel de l'inhibition de la croissance de l'algue *P. subcapitata* (CEAEQ 2003) exposée à des échantillons d'eau de la rivière Allard obtenus par dialyse in situ (C1 à C4: campagnes d'échantillonnage réalisées à l'été et à l'automne 2003)

### Outils de diagnostic des effets écotoxicologiques des effluents miniers

Dans le cadre du programme canadien d'évaluation des techniques de mesure d'impacts en milieu aquatique («Aquatic Effects Technology Evaluation Program» ou AETE), coordonné par Ressources naturelles Canada (CANMET), quatre questions guident le développement d'outils pour évaluer adéquatement l'impact des effluents miniers sur le milieu récepteur :

- Les métaux ont-ils atteint le milieu récepteur ?
- Si oui, y sont-ils biodisponibles ?
- Y a-t-il une réponse biologique dans le milieu récepteur ?
- Si oui, l'effluent en est-il responsable ?

Nous croyons que les différents outils développés et/ou validés dans le présent projet de recherche permettent d'apporter des réponses à ces questions. À la lumière des résultats obtenus, les outils les plus pertinents sont présentés au tableau 3. Il est à noter que certains éléments présentés dans ce tableau sont encore sous analyse et seront publiés ultérieurement tels que les études sur les communautés benthiques, celles portant sur des populations d'éphémères, et celles traitant des relations causales. Enfin, tous les outils diagnostiques d'exposition, d'effet ou de relation causale devront être analysés sous l'angle de leur contribution au développement d'une approche d'évaluation du risque écotoxicologique des rejets miniers, approche basée sur le poids des évidences.

### Conclusions et recommandations

Nos travaux suggèrent fortement à l'opérateur minier de faire le suivi de manière plus fréquente de plusieurs métaux peu mesurés dans l'effluent minier, tel que le Se. Cet oligo-élément montre une marge étroite entre les concentrations résultant en une carence et celles produisant une toxicité (Chapman 1999). Du reste, plusieurs appareils ont la capacité de faire rapidement une lecture séquentielle de nombreux métaux dans un échantillon d'eau. Des contrôles de qualité sont bien sûr requis incluant des blancs de terrain et des témoins méthodologiques, ainsi que des optimisations de méthode.

L'évaluation des métaux dans le milieu récepteur devrait être réalisée en tenant compte de leurs différentes formes (libre, dissous et particulaire) et ne devrait pas être réalisée uniquement sur la concentration totale de ces derniers. De plus, certaines caractéristiques physico-chimiques (ex: [Ca] et [Mn] dissous, etc.) doivent être évaluées parallèlement aux métaux en raison de l'influence de ces ions majeurs sur la prise en charge de certains métaux traces (Masson et al. 2005; Masson et al. en prép.).

Cette recherche a démontré l'utilisation prometteuse de la larve de l'éphémère *Hexagenia limbata* et de l'amphipode *Hyalella azteca* comme biomoniteurs de contamination métallique en milieu aquatique récepteur. L'emploi du bivalve *Pyganodon grandis* peut être envisagé dans des



Questions	Outils
Les métaux ont-ils atteint le milieu récepteur ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>[Métaux]-libres, [Métaux]-dissous, [Métaux]-particulaires (Comparaison entre les différentes stations du milieu récepteur en aval d'un effluent minier et les stations de référence).</li> </ul>
Les métaux sont-ils biodisponibles ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>[Métaux]-tissulaires et [métallothionéine] chez <i>Hexagenia limbata</i> comme espèce sentinelle (Comparaison entre les différentes stations du milieu récepteur en aval d'un effluent minier et les stations de référence). (Masson et al. en prép.; Michaud et al. 2005).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>[Métaux]-tissulaires chez <i>Hyalella azteca</i> comme espèce sentinelle; approche par transplantation (Comparaison entre les différentes stations du milieu récepteur en aval d'un effluent minier et les stations de référence) (Couillard et al. 2008).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dosage des ions métalliques libres par la technique d'échange ionique (TEI).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calcul des concentrations en ions métalliques libres (ex. : avec le logiciel WHAM – voir Tipping (1998)).</li> </ul>
Y-a-t-il une réponse biologique dans le milieu récepteur ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modification des communautés benthiques (Comparaison entre les différentes stations du milieu récepteur en aval d'un effluent minier et les stations de référence)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expérience de transplantation de moules <i>P. grandis</i> dans différentes stations suivant un gradient de contamination.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Étude de population de l'éphémère <i>Hexagenia limbata</i> à différentes stations suivant un gradient de contamination.</li> </ul>
L'effluent minier est-il responsable de la réponse biologique dans le milieu récepteur ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Test de toxicité avec l'algue <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> réalisé en laboratoire sur l'eau du milieu récepteur obtenu après dialyse in situ.</li> <li>Distribution « amont – aval » de l'intensité des mesures d'effets.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recherche du ou des agents causaux par une approche expérimentale de type TIE «Toxicity Identification Evaluation».</li> </ul>

**Tableau 3 : Outils diagnostiques proposés pour évaluer l'impact écotoxicologique d'un effluent minier dans une rivière.**

expériences de transplantation (ex.: Perceval et al. 2006, et le déploiement du présent projet) se déroulant de la période s'étirant entre le printemps et l'automne. La comparaison entre les résultats obtenus dans le présent projet (rivières) et ceux de nos études antérieures (lacs) montre d'ailleurs l'utilité de l'éphémère et de la moule comme biomoniteurs et de la MT comme biomarqueur de contamination métallique.

Les outils développés dans ce projet, sur des bases scientifiques solides, pourront contribuer à la définition de nor-

mes de rejets miniers en tenant compte du milieu récepteur. De plus, ils permettront une diminution des coûts associés au suivi environnemental associé aux opérations minières, étant donné l'intégration des connaissances qu'ils fournissent.

## Références

[BNQ] Bureau de normalisation du Québec. 1987. Eaux-détermination de la toxicité. Méthode avec la bactérie bioluminescente *Photobacterium phosphoreum*. NQ 3600-205.

- Gouvernement du Québec. Ministère de l'industrie et du commerce.
- Campbell PGC, Chapman PM, Hale BA. 2006. Risk assessment of metals in the environment. Dans: Hester RE, Harrison RM. (éds). *Issues in Environmental Science and Technology*, No. 22. *Chemicals in the Environment: Assessing and Managing Risk*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp. 102–131.
- [CEAEQ] Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. 2003. Détermination de la toxicité: inhibition de la croissance chez l'algue *Selenastrum capricornutum*. MA.500-S.cap. 2.0, Ministère de l'Environnement du Québec, 26 p.
- [CEAEQ] Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. 2000. Détermination de la toxicité létale chez la daphnie, *Daphnia magna*. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Ministère de l'Environnement, MA 500 - D.mag. 1.0 (édition 2000).
- Chapman PM. 2008. Environmental risks of inorganic metals and metalloids: a continuing, evolving scientific odyssey. *Human Ecol. Risk Assess.* 14: 5-40.
- Chapman PM. 1999. Selenium – A potential time bomb or just another contaminant. *Human Ecol. Risk Assess.* 5: 1123-1138.
- Couillard Y, Grapentine LC, Borgmann U, Doyle P, Masson S. 2008. The amphipod *Hyalella azteca* as a biomonitor in field deployment studies for metal mining. *Environ. Pollut.* 156: 1314-1324.
- Couillard Y, Campbell PGC, Tessier A. 1993. Response of metallothionein concentrations in a freshwater bivalve (*Anodonta grandis*) along an environmental cadmium gradient. *Limnol. Oceanogr.* 38: 299-313.
- Environnement Canada. 1990. Méthode d'essai biologique: méthode de référence pour la détermination de la létalité aiguë d'effluent chez la truite arc-en-ciel. Série de la protection de l'environnement. Environnement Canada. Juillet 1990. SPE I/RM/13.
- Environnement Canada. 1992a. Méthode d'essai biologique: essai de reproduction et de survie sur le cladocère *Ceriodaphnia dubia*. Série de la protection de l'environnement. Février 1992. SPE I/RM/21.
- Environnement Canada. 1992b. Méthode d'essai biologique: essai de croissance et de survie sur des larves de tête-de-boule. Série de la protection de l'environnement. Février 1992. SPE I/RM/22.
- Fortin C, Campbell PGC. 1998. An ion-exchange technique for free-metal ion measurements ( $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ): applications to complex aqueous media. *Internat. J. Environ. Anal. Chem.* 72: 173-194.
- Masson S, Couillard Y, Campbell PGC, Olsen C, Pinel-Alloul B, Perceval O. Responses of two sentinel species (*Hexagenia limbata* - mayfly; *Pyganodon grandis* - bivalve) along spatial cadmium gradients in northern Québec rivers and lakes (en préparation).
- Masson S, Campbell PGC, Olsen C, Martel L, Pinel-Alloul B, Méthot G, Hontela A. 2005. Réponses de trois espèces sentinelles aquatiques à la contamination en métaux traces dans deux rivières de l'Abitibi, Québec. *Rev. Sci. Eau.* 18: 143-160.
- Michaud AL, Hare L, Campbell PGC. 2005. Exchange rates of cadmium between a burrowing mayfly and its surroundings in nature. *Limnol. Oceanogr.* 50: 1707-1717.
- Perceval O, Couillard Y, Pinel-Alloul B, Campbell PGC. 2006. Linking changes in subcellular cadmium distribution to growth and mortality rates in transplanted freshwater bivalves (*Pyganodon grandis*). *Aquat. Toxicol.* 79: 87-98.
- Tipping E. 1998. Humic ion-binding Model VI: an improved description of the interactions of protons and metal ions with humic substances. *Aquat. Geochem.* 4: 3-48.