

Université du Québec  
INRS-Eau, Terre et Environnement

**DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE POUR L'UTILISATION  
DE L'INVERTÉBRÉ BENTHIQUE *SIALIS* COMME  
BIOMONITEUR POUR L'ESTIMATION DE LA  
DISPONIBILITÉ DES MÉTAUX TRACES EN MILIEU  
AQUATIQUE**

Par  
Louis Croisetière

Thèse présentée pour l'obtention  
du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)  
en Sciences de l'Eau

**Jury d'évaluation**

Examineur externe	Dr Philip S. Rainbow Natural History Museum, Londres
Examineur externe	Dr Donald J. Baird Environnement Canada
Examineur interne	Dr Martine Savard Commission Géologique du Canada
Directeur de recherche	Dr Landis Hare INRS-ETE
Co-directeur de recherche	Dr André Tessier INRS-ETE

Septembre 2007

*L'important est de n'avoir cesse de questionner*  
**A. Einstein**

## AVANT-PROPOS

Les différents chapitres qui présentent en détail les résultats de cette thèse sont présentés sous forme d'articles scientifiques. Ces articles sont précédés d'une synthèse qui décrit le contexte de notre étude, sa pertinence, les résultats obtenus et les perspectives de recherche.

### Les articles sont :

1. Croisetière L., Hare L. et A. Tessier (2006). A field experiment to determine the relative importance of prey and water as sources of As, Cd, Co, Cu, Pb and Zn for the aquatic invertebrate *Sialis velata*. *Environmental Science and Technology* 40: 873-879.
2. Croisetière L., Hare L., Tessier A. et G. Cabana (2007). Sulfur isotopes reveal that sediment sustains fish production in lakes (soumis à *Limnology and Oceanography*).
3. Croisetière L., Hare L. et A. Tessier (2007). Relating metal concentrations in a benthic invertebrate to those in sediment. *Environmental Pollution* (à soumettre).

La contribution des auteurs des articles liés aux diverses phases expérimentales s'établit comme suit :

**Louis Croisetière :** Conception et réalisation des expériences, échantillonnage, analyses de laboratoire, traitement des données et rédaction des articles.

**Landis Hare :** Conception des projets, contribution à l'interprétation des données et à la rédaction finale des articles.

**André Tessier :** Conception des projets, contribution à l'interprétation des données et à la rédaction finale des articles.

**Gilbert Cabana :** Conception du projet, contribution à l'interprétation des données et à la rédaction finale de l'article.

## REMERCIEMENTS

Plusieurs années passées à côtoyer mon superviseur de recherche, Landis Hare, ne m'ont permis que de mieux l'apprécier. Le calme, l'écoute et la sagesse décrivent bien son attitude, mais surtout la richesse et les retombées de son enseignement m'ont été de précieux guides. Je ne saurais être assez reconnaissant de son appui. Sa facilité à trouver le mot juste a été mise à rude épreuve plus d'une fois lors de la lecture de mes manuscrits. Le support qu'il m'a offert jusqu'à la toute fin du projet se traduit par un résultat bien concret : la présentation de cette thèse.

Questionnement, rigueur et disponibilité, que de mots pour décrire l'aide précieuse de André Tessier, mon co-directeur. Son apport scientifique constant à toutes les étapes du projet n'a su que me donner confiance en mes idées et très souvent, les éclaircir. Encore une fois, merci.

Certaines personnes sont des sources intarissables de nouvelles idées, Gilbert Cabana en est un. Sa vision systémique m'a permis de pousser un peu plus loin certains éléments de mon projet et je tiens à lui exprimer ma gratitude.

L'ampleur des défis expérimentaux et analytiques a pu être surmontée grâce à l'aide de nombreuses personnes. Lors des expériences de terrain, le support de Pierre Marcoux, Céline Porcher, Anne Gosselin, Jord Orvoine, René Rodrigue, Pierre Barillet, Jord Orvoine, Marie-Noële Croteau, Julie Bastien, Catherine Dion et Eve Therrien a été apprécié dans la réalisation des différentes étapes du projet qui représentaient une charge de travail appréciable.

Ce qui caractérise le mieux le laboratoire de l'INRS, c'est la disponibilité des gens qui y travaillent. L'aide aux étudiants semble pour eux une chose toute naturelle. Mes remerciements s'adressent particulièrement à Michelle G. Bordeleau, Pauline Fournier, René Rodrigue, Lise Rancourt, Stéphane Prémont et Sébastien Duval.

Le choix de faire un Doctorat est une décision bien personnelle, mais, malheureusement pour l'entourage, sa réalisation se partage au quotidien avec les gens les plus proches. La patience de Céline n'est certainement pas étrangère à la réussite de cette aventure. Par sa participation aux expériences et par son soutien constant, elle a participé à ce projet à part entière. À mes parents, Carol et Suzanne, je tiens à souligner que votre support pour amener votre plus jeune fils jusqu'à la dernière marche de l'éducation universitaire a été phénoménal à bien des égards, merci.

La réalisation de ces projets a été possible grâce au support financier du réseau de recherche MITE (Metals In The Environment), du Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et Technologies et du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie du Canada.

À vous tous, merci.

## RÉSUMÉ

L'extraction et le traitement des métaux ont mené à un accroissement de leurs concentrations qui se retrouvent dans plusieurs systèmes aquatiques. Les organismes qui vivent dans ces milieux se retrouvent parfois affectés par l'augmentation de ces concentrations. L'exposition des organismes aquatiques est cependant difficile à caractériser car plusieurs variables influencent la disponibilité des métaux pour les organismes vivants. La mesure de ces concentrations au sein d'un organisme choisi permet d'intégrer tous ces paramètres en une seule mesure. L'organisme alors sélectionné pour représenter un compartiment du système est un *biomonitor* et son utilisation permet d'estimer l'exposition des organismes dans un système aquatique donné.

Les métaux sédimentaires représentent souvent une fraction très importante des métaux qui se retrouvent en milieu aquatique. Cependant, l'exposition de ces organismes à ces métaux est relativement peu comprise, bien qu'elle ait été étudiée sous plusieurs aspects au fil des années. L'invertébré benthique *Sialis* a été proposé comme biomonitor des métaux sédimentaires et la mesure des métaux au sein de cet organisme pourrait mener à une estimation plus précise de l'exposition aux métaux sédimentaires. Cependant, des variables importantes se doivent d'être étudiées pour relier la concentration de métaux tissulaires d'un organisme à la concentration des métaux disponibles dans le milieu. Lorsque plusieurs paramètres de prise en charge des métaux sont connus chez un biomonitor, un modèle peut être établi pour relier avec précision les concentrations mesurées au sein de cet organisme à la concentration des métaux biodisponibles.

Parmi les paramètres importants à connaître dans l'estimation de l'exposition, on retrouve la route de prise en charge des métaux. Dans le cas des organismes prédateurs comme *Sialis*, il importe de connaître si la diète constitue ou non la source principale de métaux accumulés pour modéliser correctement les interactions avec le milieu. Lors de nos expériences, nous avons alterné les voies d'exposition (eau vs nourriture) et nous avons démontré que la diète est très

importante dans l'accumulation de plusieurs éléments (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) chez *Sialis*. L'intégration de nos résultats expérimentaux à un modèle de bioaccumulation nous a montré que la nourriture constituait pratiquement la source exclusive de ces métaux pour *Sialis*.

Avec une telle importance de la nourriture comme source de métaux, il devenait donc impératif d'amasser plus d'informations sur la diète de *Sialis*. La relation entre *Sialis* et son milieu semble se faire par l'entremise de ses proies. Le comportement alimentaire des proies a donc une incidence directe sur l'exposition de *Sialis* aux éléments traces. Ainsi nous avons déterminé si notre biomoniteur avait une relation plus étroite avec la colonne d'eau ou le sédiment d'un point de vue énergétique. Considérant que les métaux proviennent de la nourriture, nous avons intégré cette information dans le modèle reliant *Sialis* à son milieu. Pour étudier cette relation énergétique, nous avons utilisé les ratios isotopiques de soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) comme traceur et avons déterminé que *Sialis* tire, par le biais de ses proies, son énergie du compartiment sédimentaire des lacs. A partir de ces résultats, nous avons donc considéré que les concentrations de métaux mesurées dans *Sialis* devaient représenter les concentrations sédimentaires plutôt que celles de la colonne d'eau. Le développement de l'utilisation du ratio  $\delta^{34}\text{S}$  pour cette fin a aussi permis de révéler le potentiel de cet outil pour l'étude des échanges énergétiques au sein d'écosystèmes lacustres complets. L'utilisation de cette signature peut révéler l'importance énergétique du compartiment sédimentaire pour une gamme d'organismes allant des détritivores aux prédateurs terminaux des systèmes étudiés. Les signatures de soufre ont révélé la très grande importance du compartiment sédimentaire pour un prédateur comme le Grand Brochet, qui tire jusqu'à 42% de son énergie de ce compartiment par l'entremise de ses proies.

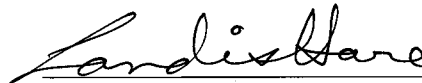
Pour mettre à l'essai le biomoniteur, nous avons visité 10 lacs situés en région minière (Rouyn-Noranda, QC et Sudbury, ON) dans lesquels nous avons prélevé des échantillons de *Sialis* et de sédiments anoxiques. Nous avons alors utilisé deux méthodes d'extractions différentes qui devaient représenter la concentration de métaux plus 'disponibles' dans les sédiments et nous avons tenté de relier ces valeurs aux concentrations tissulaires de métaux mesurées dans *Sialis*. Une

corrélation satisfaisante a été obtenue pour le nickel et le cobalt seulement. Pour les autres éléments, l'exposition sédimentaire n'a pu mener à la prédiction des concentrations mesurées dans *Sialis*. Cependant, ces résultats n'indiquent pas la difficulté de *Sialis* à représenter les concentrations de métaux biodisponibles mais plutôt la difficulté d'estimer cette fraction des métaux dans les sédiments pour les relier à une réponse biologique donnée.



---

Louis Croisetière



---

Landis Hare, directeur de recherche



## TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS .....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ.....	vi
LISTE DES FIGURES .....	xi
LISTE DES ENCADRÉS .....	xii
<b>Section 1 - Synthèse.....</b>	<b>1</b>
<b>1- INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Les métaux dans l'environnement .....	1
1.2 Suivi des métaux dans l'environnement .....	3
1.3 Analyse de risque écologique (ARE) et utilisation des biomoniteurs .....	4
1.4 Utilisation de <i>Sialis</i> comme biomoniteur.....	5
1.5 Accumulation des métaux par les organismes .....	6
<b>2 - PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE .....</b>	<b>12</b>
2.1 Voies d'exposition .....	13
2.2 Relations alimentaires .....	14
2.3 Relations <i>Sialis</i> – environnement.....	15
<b>3 - MATÉRIEL ET MÉTHODES .....</b>	<b>16</b>
3.1 Phase 1 – Importance de la diète comme voie d'entrée des métaux.....	16
3.2 Phase 2 – Description des échanges énergétiques de <i>Sialis</i> .....	19
3.3 Phase 3 – Corrélations des concentrations métalliques chez <i>Sialis</i> avec celles de son milieu .....	21
3.4 Méthodes analytiques.....	22
3.4.1 Métaux.....	22
3.4.2 Anions.....	24
3.4.3 Carbone organique dissous .....	24
3.4.4 Carbone inorganique dissous .....	24
3.4.5 Analyses des isotopes stables de carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de soufre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) .....	24
3.4.6 Analyse des données et modélisation .....	25
3.4.7 Préparation des contenants d'échantillonnage et du matériel d'analyse .....	25
<b>4 - RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>26</b>
4.1 Phase 1 – Importance de la diète comme voie d'entrée des métaux.....	26
4.2 Phase 2 – Description des échanges énergétiques de <i>Sialis</i> .....	27
4.3 Phase 3 – Corrélations des concentrations métalliques chez <i>Sialis</i> avec celles de son milieu .....	30
<b>5 - CONCLUSIONS.....</b>	<b>34</b>
<b>6 - PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....</b>	<b>36</b>
6.1 Relations <i>Sialis</i> – environnement.....	36
6.2 Utilisation du rapport $\delta^{34}\text{S}$ comme outil de traçage .....	37
<b>7 - BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>39</b>
<b>Section 2 – articles.....</b>	<b>45</b>
<b>8- A field experiment to determine the relative importance of prey and water as sources of As, Cd, Co, Cu, Pb and Zn for the aquatic invertebrate <i>Sialis velata</i>.....</b>	<b>45</b>
<b>9- Sulfur isotopes reveal that sediment sustains fish production in lakes.....</b>	<b>75</b>

**10- Relating metal concentrations in a benthic invertebrate to those in sediment ..... 101**

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Relation concentration-réponse des organismes vivants aux métaux essentiels (a) et non-essentiels (b) (Förstner et Wittmann 1981).....	2
Figure 2	Schématisation de la prise en charge et de l'élimination des métaux par un organisme aquatique selon l'équation 1.....	7
Figure 3	Routes possibles de transfert de métaux entre <i>Sialis</i> ③ vivant dans le tube en 'U' et ses proies qui proviennent soit de la zone oxique ① ou anoxique ② des sédiments. ....	10
Figure 4	Schéma expérimental illustrant les différentes voies d'exposition aux métaux (E : eau; N : nourriture – rouge : contaminé; bleu : non-contaminé). .	17
Figure 5	Méthode de contamination des proies ( <i>Chironomus riparius</i> ) dans le lac Dufault (contaminé). ....	18

## **LISTE DES ENCADRÉS**

Encadré 1. Analyse de risque écologique – résumé de l’approche (adapté de Chapman et Wang 2000). .....	12
Encadré 2. Utilisation des isotopes stables de soufre pour déterminer la provenance de l’énergie – explication par la sulfato-réduction .....	20

# Section 1 - Synthèse

## 1- INTRODUCTION

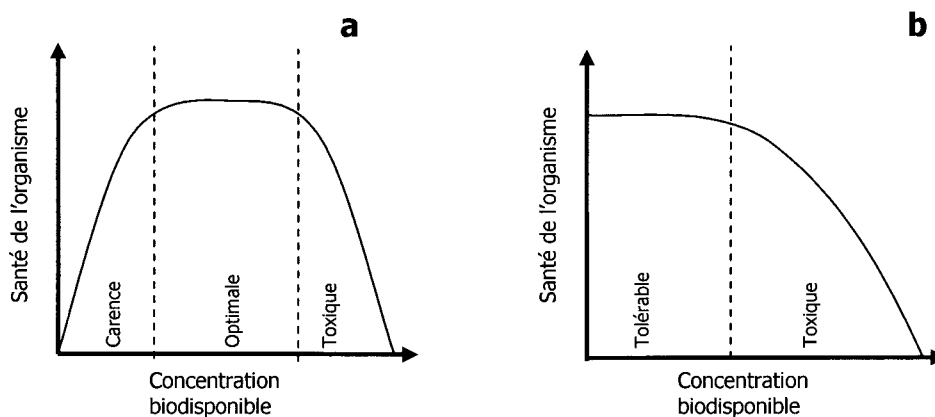
### *1.1 Les métaux dans l'environnement*

Notre environnement a été marqué par des changements importants et ce, sur une période relativement brève. L'accroissement de l'activité humaine a causé à lui seul des changements sur l'environnement qui, localement, ont modifié la façon de vivre des gens. L'extraction de substances minérales liées à la fabrication de produits de consommation a ainsi entraîné une mobilisation des métaux présents dans la croûte terrestre (Nriagu et Pacyna 1998). Les métaux libérés lors de la transformation se dispersent par ruissellement ou encore par voie aérienne (Telmer *et al.* 2004) et peuvent ainsi contribuer à l'accroissement des teneurs métalliques dans les endroits éloignés des zones d'utilisation et de traitement des métaux. A certains endroits, l'accroissement a été suffisamment important pour compromettre la présence de la vie. Les endroits moins touchés, quoique nombreux, ont toutefois subi un accroissement des niveaux des contaminants métalliques.

Les contraintes liées aux conséquences de la pollution ont été précurseurs d'une prise de conscience collective. Depuis quelques décennies, certains endroits fortement touchés ont été restaurés et d'autres, moins contaminés, font l'objet d'études et de mesures de conservation (Egan 2003). Des outils de mesure sont nécessaires pour évaluer l'impact des activités qui sont à l'origine de cette contamination. Les méthodes dites 'universelles' de diagnostic, comme le suivi des concentrations de métaux dans les différents compartiments de l'environnement, se sont avérées inefficaces dans plusieurs situations. Les dernières décennies ont donc été marquées par le raffinement de ces techniques de suivi des métaux dans l'environnement (Wenning *et al.* 2005).

Les métaux peuvent être séparés en deux classes (Fig. 1) suivant leur nécessité aux

divers processus biologiques : les métaux essentiels (Al, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) et non-essentiels (Ag, As, Cd, Cr, Hg, Pb) (Förstner et Wittmann 1981). Alors qu'une certaine concentration de métaux essentiels est nécessaire au maintien des fonctions de base de l'organisme, les métaux non-essentiels n'occupent aucune fonction et ne sont que nocifs pour les êtres vivants. Au-delà d'une certaine concentration, les métaux de ces deux groupes peuvent causer des effets néfastes et mesurables chez les organismes vivants (Markert *et al.* 2000). Les effets adverses des métaux sont très variés mais, d'une façon générale, les métaux interfèrent avec différents processus physiologiques soit en se substituant à un élément essentiel, soit en saturant un mécanisme biochimique. La résultante de ces phénomènes peut se traduire ultimement par la déficience d'une fonction essentielle et par des symptômes mesurables chez les êtres vivants (Hoffman *et al.* 1995). Bien que l'étude de l'effet des métaux soit parsemée d'avenues de recherches essentielles et prometteuses, l'objet de cette thèse portera à un autre niveau de la problématique : le développement de méthodes de suivi de l'exposition.



**Figure 1 Relation concentration-réponse des organismes vivants aux métaux essentiels (a) et non-essentiels (b) (Förstner et Wittmann 1981).**

### ***1.2 Suivi des métaux dans l'environnement***

Lors de la deuxième moitié du siècle précédent, une multitude de mesures des concentrations de métaux ont été effectuées sur différents composants de la biosphère. L'évaluation critique de cet ensemble de données a soulevé deux préoccupations : beaucoup de ces mesures se sont avérées peu fiables et même lorsqu'elles l'étaient, le lien entre la concentration du métal mesurée dans le milieu et l'exposition des organismes n'est pas clair. La préoccupation première, soit la validité des concentrations mesurées, vient principalement des contraintes analytiques associées à la mesure de concentrations de métaux à des teneurs environnementales. Ces concentrations, bien qu'importantes d'un point de vue biologique, sont tout de même souvent très faibles d'un point de vue analytique et leur mesure exige des précautions exceptionnelles alors absentes il y a quelques décennies. La deuxième préoccupation, soit le lien entre les concentrations et l'exposition des organismes, est apparue lorsque des chercheurs ont observé que différentes « formes » d'un même métal pouvaient entraîner des réponses biologiques bien différentes (Tessier et Turner 1995). La complexification du problème ne s'est pas arrêtée là : beaucoup de tests d'exposition des animaux aquatiques utilisaient un schéma expérimental basé sur une exposition aux métaux par l'eau uniquement. Cependant, des expériences récentes (Luoma 1995, Roy et Hare 1999, Munger *et al.* 1999, Lee *et al.* 2000, Schlekot *et al.* 2000) ont montré qu'on ne peut présumer une telle chose parce que les métaux peuvent aussi être assimilés par la diète.

Ce développement des connaissances a poussé les agences de contrôle environnemental à prendre des précautions spéciales pour la mesure des concentrations de métaux dans l'environnement mais surtout, elles ne peuvent plus compter sur une bonne partie de la littérature existante sans que les données ne passent par une analyse critique basée sur les connaissances actuelles. Le rôle du gestionnaire de l'environnement ne consiste plus à simplement utiliser les outils et données existantes, mais bien à s'appuyer sur des travaux et mesures qui suivent

une logique scientifique et qui s'appuient sur des expériences fiables et représentatives du milieu naturel.

### ***1.3 Analyse de risque écologique (ARE) et utilisation des biomoniteurs***

Un des outils de synthèse scientifique utilisé par les gestionnaires de l'environnement pour l'estimation d'un risque précis dans une situation donnée est l'analyse de risque écologique (ARE). Cette approche est basée sur une analyse de données scientifiques et de mesures sur le site d'étude pour caractériser le risque lié à l'état actuel des choses (Chapman et Wang 2000). Ce constat pourra être à la base d'une prise de décision sur les actions à entreprendre pour minimiser ce risque. Si le risque est trop élevé, par exemple, le gestionnaire pourra suggérer une liste de mesures de correction. Pour l'évaluation du risque, le gestionnaire doit pouvoir estimer précisément l'exposition des organismes et déterminer si cette exposition est de nature à entraîner des effets néfastes sur ces organismes. L'analyse de risque écologique se veut donc une synthèse de l'information disponible en un outil de prise de décision. Plusieurs types de données sont impliqués dans cette évaluation : la mesure des métaux dans l'environnement, l'estimation de l'exposition des organismes aux métaux ainsi que l'estimation de l'effet des métaux sur les organismes.

Cette procédure d'ARE vise l'estimation du risque que représentent les métaux dans l'environnement en passant par la compréhension des processus qui modulent l'exposition des organismes. Nos travaux s'inscrivent dans cette procédure : nos expériences ont porté sur la compréhension de l'exposition des organismes. Plus précisément, nos travaux portent sur l'estimation de l'exposition aux métaux des organismes aquatiques, pour laquelle différents éléments doivent être considérés, notamment la forme sous laquelle se retrouve un métal ou encore sa voie d'entrée chez les organismes. La résultante de tous les facteurs d'exposition des organismes se traduit en une variable mesurable : la concentration de métal au sein de l'organisme lui-même. L'utilisation des concentrations de métaux chez les organismes comme outil de mesure de leur exposition n'est pas nouvelle (Ramade



1992) mais pour rendre l'utilisation de ce type d'outil plus performante, les concentrations de métaux dans l'organisme doivent être reliées à des paramètres d'exposition définis. C'est précisément ce qui différencie les modèles d'exposition purement empiriques des modèles mécanistes : au lieu de mesurer un ensemble de paramètres d'exposition et de tenter de les corrélés à la concentration dans l'organisme, un modèle mécaniste est élaboré à partir d'une base théorique et les paramètres théoriques sont ensuite intégrés au modèle sous forme de variables qui sont elles-mêmes pondérées par des expériences ou mesures bien ciblées. Une série d'expériences précises permettent successivement d'ajouter des variables à un modèle d'exposition pour le rendre plus robuste. L'outil que constitue alors l'organisme (et son modèle) utilisé est un *biomoniteur* (Markert *et al.* 2003). Différents biomoniteurs existent déjà pour le suivi des métaux en milieu aquatique (Luoma et Rainbow 2005) et peuvent être utilisés, entre autres, pour estimer les variations temporelles de métaux biodisponibles (Hornberger *et al.* 2000, Croteau *et al.* 2002). Plusieurs études ont porté sur le suivi des métaux dans la colonne d'eau avec des biomoniteurs, mais jusqu'à maintenant, la contamination métallique des sédiments lacustres s'est avérée difficile avec ces outils. La synthèse de la littérature qui a mené à un modèle commun par Luoma et Rainbow (2005) pour estimer les concentrations de métaux disponibles dans l'eau ne semble pas applicable aux sédiments étant donné que la littérature est beaucoup trop fragmentaire. Bien qu'ils constituent un réservoir important de métaux (Luoma 1989), les sédiments ne bénéficient pas de la même compréhension que la colonne d'eau.

### ***1.4 Utilisation de *Sialis* comme biomoniteur***

Un organisme sédimentaire, la larve de l'insecte *Sialis*, a été proposé comme biomoniteur potentiel pour le suivi des métaux en milieu lacustre (Roy et Hare 1998). Des expériences de laboratoire ciblées ont permis d'établir que la majeure partie du Cd accumulé (environ 80%) par *Sialis* utilise la diète comme voie d'entrée (Roy et Hare 1999). Cet organisme montre une large distribution

géographique<sup>1</sup>, ses teneurs de Cd sont corrélées à celles de ses proies en laboratoire (Roy et Hare 1999) et semble il répondre à l'exposition ambiante<sup>2</sup>.

Dans les lacs, les larves de ce prédateur ont tendance à s'enfouir en creusant des tubes en 'U' (Charbonneau *et al.* 1997, Charbonneau et Hare 1998) et elles irriguent ces tubes avec de l'eau surnageante (Wang *et al.* 2001).

Le développement de ce biomoniteur nécessite toutefois la considération d'autres paramètres qui peuvent être utiles pour élaborer un modèle complet de bioaccumulation. L'utilité d'un tel modèle réside dans l'aspect pratique de l'utilisation du biomoniteur : les paramètres du modèle se traduisent par la réponse de l'organisme. Par exemple, si le modèle implique une exposition aux métaux sédimentaires, alors la réponse du biomoniteur devra être interprétée en ce sens.

### ***1.5 Accumulation des métaux par les organismes***

Les concentrations mesurées au sein d'un biomoniteur sont la résultante de différents processus de transfert du métal. Ces transferts peuvent être illustrés comme suit :

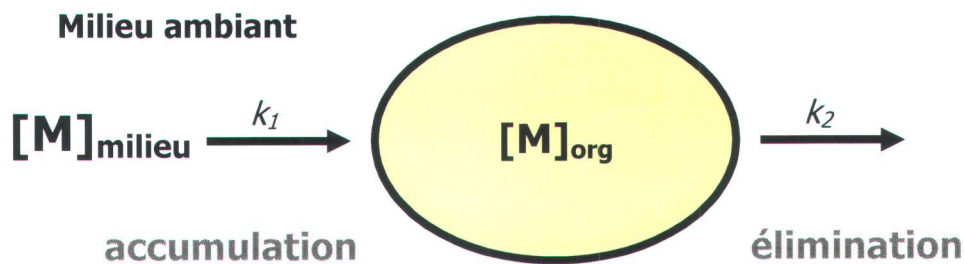


où le métal (M) est accumulé dans l'organisme ( $M_{\text{org}}$ ); à partir de son milieu ( $M_{\text{milieu}}$ ),  $k_1$  et  $k_2$  représentent les constantes de taux d'accumulation et d'élimination, respectivement tel qu'illustré à la figure 2 :

---

<sup>1</sup> La distribution des 22 espèces de *Sialis* présentes en Amérique du Nord (Bowles 1989; Tarter 1988; Whitting 1991) et des espèces d'Europe (Timmermans *et al.* 1991) est assez importante. Des larves ont été récoltées dans le sédiment des lacs ainsi que sous le substrat superficiel en eau courante.

<sup>2</sup> Les concentrations de Cd de *Sialis* ont été corrélées à celles du sédiment oxygène (après normalisation pour la matière organique) dans une série de 22 lacs du Bouclier Canadien;  $R^2=0.85$ ,  $p<0.001$  (L. Hare et A. Tessier, données non-publiées).



**Figure 2 Schématisation de la prise en charge et de l'élimination des métaux par un organisme aquatique selon l'équation 1.**

Lorsque l'organisme accumule le métal en fonction du temps, la variation de la concentration au sein de ce dernier peut être exprimée sous la forme :

$$\frac{d[M]_{org}}{dt} = k_1 [M]_{milieu} - k_2 [M]_{org} \quad (2)$$

Si l'état stationnaire est atteint,  $d[M]_{org}/dt$  sera égal à 0 et l'équation 2 pourra s'exprimer sous la forme suivante :

$$[M]_{org} = \frac{k_1}{k_2} [M]_{milieu} \quad (3)$$

Son expression la plus simple pourrait prendre la forme suivante:

$$[M]_{org} = f_1 [M]_{milieu} \quad (4)$$

où  $[M]_{milieu}$  représente la concentration totale de métal dans le milieu,  $[M]_{org}$  la concentration dans l'organisme et  $f_1$  une constante de proportionnalité qui intègre l'ensemble des processus qui modulent l'accumulation. La résultante de ces processus correspond à la concentration nette de métaux retenue par l'organisme. Différents paramètres, tels l'activité métabolique et le comportement, peuvent