

**LES PLANTES AQUATIQUES COMME BIOINDICATEURS DE LA
CONTAMINATION DU SYSTEME ST-LAURENT EN METAUX TOXIQUES:
BIOACCUMULATION, DETOXIFICATION ET EFFETS SOUS-LETAUX**

Rapport rédigé pour

**Conseil de Recherches en Sciences naturelles et en Génie
Programme de partenariats de recherche
Programme de subventions conjointes Centre St-Laurent
(CSL/CRSNG)**

par

**Peter G.C. Campbell
Louise St-Cyr
André Vachon**

**Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau
2700, Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7**

Dossier no 699-038/90

Rapport de recherche no R-396

Octobre 1993

Les plantes aquatiques comme bioindicateurs de la contamination du système Saint-Laurent en métaux toxiques: bioaccumulation, détoxification et effets sous-létaux.

Projet subventionné par le CSL/CRSNG
(octobre 1993: rapport final)

1. RENSEIGNEMENTS SUR LA SUBVENTION

Nom du bénéficiaire: P.G.C. Campbell (professeur)
Membres du groupe: L. St-Cyr (chercheur postdoctoral)
A. Vachon (étudiant 2^e cycle)
Numéro de dossier: 699-038/90
Budget:

<u>Année</u>	<u>Montant accordé</u>
1990-91	43 000\$
1991-92	44 000\$
1992-93	46 000\$

2. RÉSUMÉ DU PROJET, OBJECTIFS VISES

Ce projet avait pour **objectif général** d'évaluer le potentiel des plantes aquatiques supérieures comme bioindicateurs de la contamination du système Saint-Laurent en métaux toxiques, et ceci à deux niveaux complémentaires. Le premier consistait à quantifier la bioaccumulation des métaux traces chez les plantes aquatiques et à tester un modèle prédictif de bioaccumulation qui tient compte du rôle clé que peuvent jouer les oxyhydroxydes de fer en "protégeant" les plantes, à la fois dans leur rhizosphère et dans les sédiments. Le second niveau consistait à déterminer le rôle des phytochélatines (PCs) dans la détoxification des métaux accumulés, et à évaluer le potentiel de ces peptides chélateurs comme indicateurs biochimiques ("biomarquers") d'une contamination chronique en métaux toxiques.

Les **objectifs spécifiques** de cette étude étaient donc:

(i) de quantifier la bioaccumulation de certains métaux toxiques chez les macrophytes, de vérifier les relations entre la bioaccumulation dans les plantes et le degré de contamination de leur habitat, et de tester un modèle général de bioaccumulation;

(ii) d'évaluer si certaines espèces de plantes aquatiques, exposées à des concentrations élevées de métaux toxiques (Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) en milieu naturel, réagissent en synthétisant des phytochélatines pour se protéger des effets toxiques, en proportion des quantités accumulées de métaux;

(iii) de vérifier l'hypothèse de débordement cellulaire ("spillover") en conditions naturelles à l'aide de macrophytes, en cherchant un lien entre les concentrations tissulaires des métaux toxiques (et surtout leur répartition parmi différents ligands cellulaires, notamment les PCs) et leurs effets toxiques sous-létaux.

(iv) en fonction des résultats de (i) à (iii), d'identifier des espèces "sentinelles" qui pourront servir comme biomoniteurs de métaux dans le système Saint-Laurent.

2. RÉSUMÉ DES RÉALISATIONS

2.1 Méthodologie

La méthodologie retenue pour atteindre les objectifs décrits ci-dessus impliquait surtout des études sur le terrain, le long d'un gradient de contamination en métaux dans les lacs fluviaux du système Saint-Laurent, mais elle comportait aussi des expériences complémentaires réalisées au laboratoire dans des conditions contrôlées.

2.1.1 Études sur le terrain

Au cours de la première phase des travaux, nous avons mis l'accent sur la bioaccumulation de métaux toxiques (Cd, Cu, Pb, Zn) chez des espèces sentinelles potentielles (Vallisneria americana; Potamogeton sp.; Myriophyllum spicatum).

Échantillonnage - Des plantes entières (parties vertes et souterraines) ainsi que des carottes de sédiment (couche oxyque) ont été prélevées en août 1990 par des plongeurs dans le système fluvial du Saint-Laurent, suivant un gradient de contamination des différents métaux (Lac St-Pierre, 10 stations; Lac St-Louis, 8 stations). La localisation des sites d'échantillonnage a été déterminée en fonction des données disponibles sur la qualité des sédiments.

En août 1991 nous avons élargi la zone d'étude pour comprendre non seulement les lacs Saint-Pierre (4 stations) et Saint-Louis (6), mais également le lac Des Deux Montagnes (2) et le lac Saint-François (2). Tout comme lors de la campagne précédente, des plantes entières (parties vertes et souterraines) ainsi que des carottes de sédiment (couche oxyque) ont été prélevées, suivant un gradient de contamination des différents métaux. Dans les lacs Saint-Pierre et Saint-Louis, les sites d'échantillonnage étaient les mêmes qu'en 1990 (choisis pour offrir le meilleur gradient de contamination possible).

Finalement, en août 1992 nous sommes retournés à quelques sites pour prélever des échantillons additionnels de plantes pour l'analyse des métaux cytosoliques et des phytochélatines.

Analyse des sédiments - A partir de carottes de sédiment prélevées par les plongeurs près des plantes à être analysées, les métaux dans le strate oxyque ont été lessivés en différentes fractions selon des méthodes d'extraction partielle développées dans notre laboratoire. Les métaux ainsi extraits furent dosés à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (AA).

Analyse de l'eau - Des échantillons d'eau prélevés par des plongeurs aux mêmes endroits que les carottes de sédiment, près des plantes à être analysées, ont été analysés pour le pH, le carbone organique dissous, et le Ca dissous.

Analyse des plantes (métaux) - Les plantes aquatiques récoltées furent rincées dans l'eau ambiante, lavées soigneusement au laboratoire avec de l'eau désionisée, et séparées selon différents organes (racines, rhizomes et feuilles). Après une étape de séchage, les tissus ont

été broyés, digérés dans des bombes en Téflon avec de l'acide nitrique concentré (grade Aristar) et dosés pour les métaux traces (AES-ICP). Les concentrations en Cu et Zn chez les plantes dépassaient largement la limite de détection, démontrant un bon gradient de contamination. Par ailleurs, les résultats pour le Cd, Cr, et Pb étaient souvent en deçà de la limite de détection, ce qui a nécessité le redosage de ces métaux par la spectrophotométrie d'absorption atomique sans flamme (GFAAS). Le dosage régulier d'étalons certifiés (tissus biologiques: CNRC; U.S. NIST) a permis de vérifier l'exactitude et la précision de nos résultats analytiques.

De plus, pour déterminer les concentrations de métaux présents dans la rhizosphère et associés à la plaque de fer sur les racines des plantes, les parties souterraines des plantes ont été extraites par la méthode au DCB (dithionite-citrate-bicarbonate). Les métaux traces ainsi que le Fe, le Mn et le K ont été dosés dans les extraits.

Analyse des plantes (métaux dissous; thiols) - A des sites choisis pour représenter un gradient de contamination inter- et intra-lac, nous avons examiné le contenu des plantes en métaux dissous (i.e., la concentration de métaux cytosoliques). A chaque site, à l'aide de la chromatographie échangeuse d'anions (Sephacrose Q), nous avons évalué la spéciation des métaux cytosoliques (Cd, Cu - meilleurs inducteurs de la biosynthèse des PCs) en déterminant leur répartition entre formes anioniques et cationiques/neutres. Signalons que les métaux liés aux phytochélatines devraient se trouver dans la fraction anionique dans une telle séparation. D'autre part, comme mesures complémentaires nous avons également déterminé les concentrations de cystéine, de glutathione (précurseur des PCs) et de phytochélatines présentes dans la fraction cytosolique. Ces séparations impliquaient la chromatographie liquide d'haute performance (HPLC; colonne C-18), avec détection des groupements thiols (-SH) par la dérivation post-colonne à l'aide du réactif d'Ellman.

2.1.2 Études au laboratoire

Outre les activités de terrain décrites ci-dessus, nous avons réalisé des essais complémentaires au laboratoire dans des conditions contrôlées. Ces expériences visaient la mise au point de certaines techniques analytiques, et la vérification du comportement physiologique des plantes retenues comme espèces bioindicatrices potentielles.

Mise au point des méthodes analytiques. Nous avons consacré beaucoup d'efforts à la mise au point des techniques d'extraction et de dosage des phytochélatines: congélation vs. lyophilisation; extraction avec NaOH (1 N) vs. extraction avec HCl (0.1 N); séparation par chromatographie d'exclusion (colonne TSK G2000-SW) vs. séparation par chromatographie sur phase hydrophobe (colonne C-18 ODS-SIL). L'approche qui s'est avérée la plus efficace implique les étapes suivantes: conservation du matériel végétal par congélation; lyophilisation; extraction avec solution alcaline (NaOH 1N + NaBH₄), suivie d'une précipitation en solution acide HCl 3.6 N; séparation HPLC du surnageant sur phase hydrophobe avec un gradient de 0 à 20% acétonitrile/acide TFA 0.1%; détection par dérivation post-colonne des groupements sulfhydryl (-SH) avec le réactif d'Ellman.

Induction de la biosynthèse de phytochélatines (PC) - En s'inspirant des méthodes employées pour les plantes terrestres, nous avons étudié l'induction par les métaux de la biosynthèse des PC chez des plantes aquatiques offrant un potentiel comme bioindicateurs. Le Cd étant reconnu comme le "meilleur" agent pour induire la synthèse des PC, nos premières expériences ont été réalisées avec ce métal, ainsi qu'avec le Cu. De jeunes plantes (V. americana; M. spicatum), prélevées d'une culture hydroponique, ont été exposées à différentes concentrations de métal (Cd,Cu). Après exposition, les plantes étaient rincées, congelées, lyophilisées et les tissus à analyser (racines ou feuilles) étaient broyés avec un pilon et un mortier dans de l'azote liquide. L'extraction des tissus broyés et le dosage des PC s'effectuaient selon les techniques décrites ci-haut. Rappelons que cette étude en laboratoire avait pour but de s'assurer que les méthodes de séparation rapportées dans la littérature s'appliquent aussi bien aux macrophytes aquatiques qu'aux plantes terrestres, et de déterminer une relation "dose-réponse" pour la synthèse des PC chez les espèces d'intérêt.

2.2 Résultats obtenus.

2.2.1 Études en laboratoire

Même si les phytochélatines (PC) sont réputées omniprésentes dans le règne végétal, au meilleur de nos connaissances leur présence chez les plantes aquatiques à racines n'a été rapportée qu'une fois dans la littérature scientifique (Fujita, 1985: *Plant Cell Physiol.*, 26: 295-300) et ceci pour des plantes exposées au laboratoire. Dans la présente étude, des résultats obtenus avec des feuilles de M. spicatum exposées à de fortes concentrations en Cu (1 mg/L; 4 j) semblent confirmer la capacité de cette espèce à synthétiser des PC, du moins au laboratoire. Les temps de rétention de ces pics correspondent bien à ceux anticipés pour les PC avec une valeur de n de 2 à 7 (n = nombre d'unités Glu-Cys).

2.2.2 Études sur le terrain

Bioaccumulation des métaux - variabilité spatio-temporelle. Dans le but d'identifier des espèces sentinelles qui pourraient servir comme bioindicateurs de métaux traces dans le système St-Laurent, nous avons récolté et analysé pour les métaux traces des spécimens de deux plantes, V. americana et P. richardsonii, qui dominent la communauté de macrophytes submergés (St-Cyr et al. 1993a). Il est à noter que peu d'études rapportent la contamination en métaux traces des plantes aquatiques du fleuve St-Laurent, et que ces données comblent déjà une lacune à cet égard. Les principaux résultats obtenus sont les suivants (St-Cyr et Campbell 1993a):

- Les concentrations en métaux traces des parties vertes des plantes aquatiques submergées varient spatialement à l'intérieur des lacs St-Louis et St-François. Quelques «points chauds» ont été identifiés, où les concentrations en métaux traces dans les tissus sont plus élevées: dans les eaux brunes (sous l'influence de la rivière des Outaouais) ainsi qu'au sud des îles de

la Paix au lac St-Louis, et dans la partie sud du lac St-Pierre¹. La superposition de nos stations d'échantillonnage et les profils de courants d'eau dans le lac St-Pierre indique que les plantes submergées du sud-ouest du lac seraient vraisemblablement sous l'influence des rejets industriels des usines de Sorel-Tracy, ce qui expliquerait leurs concentrations élevées en Cr, Ni et Zn.

- Pour tous les métaux analysés, les concentrations moyennes dans les parties vertes de la vallisnérie sont supérieures au lac St-Pierre qu'au lac St-Louis. Une revue de la littérature révèle que les concentrations moyennes en Cd, Cr et Zn mesurées dans la vallisnérie du lac St-Pierre excèdent les valeurs médianes rapportées pour des plantes aquatiques provenant de plans d'eau contaminés (St-Cyr et Campbell 1993a).

En fonction de ces résultats, nous avons conclu que Vallisneria americana offrait un avantage certain comme espèce sentinelle pour les métaux traces dans le fleuve St-Laurent: (i) c'est l'espèce dominante (la plus abondante et la plus répandue) de toute la partie d'eau douce du système St-Laurent; (ii) elle bioconcentre les métaux traces et atteint des niveaux supérieurs à ceux observés dans les autres plantes analysées (sauf dans le cas du Pb). Dans le lac St-Pierre, la vallisnérie affiche un facteur de bioconcentration (si comparé aux métaux dissous dans l'eau) de l'ordre de 10^4 pour le Cu et le Ni, et de 10^5 pour le Cd, le Pb et le Zn.

- Sauf pour le Pb, la vallisnérie bioconcentre davantage les métaux traces dans ses parties vertes (Cd, Cr, Cu, Ni et Zn) que le potamot de Richardson. Cependant, même en considérant les écarts de concentration entre les deux espèces, celles-ci réagissent de façon similaire à un accroissement du niveau de métaux traces biodisponibles dans leur environnement - les points chauds mis en évidence avec une espèce coïncident généralement avec ceux révélés par l'autre espèce.
- Selon les résultats d'un échantillonnage complémentaire, réalisé au mois d'octobre 1990 dans le lac St-Pierre (St-Cyr et al. 1992), les concentrations en métaux traces des parties vertes de la vallisnérie sont plus élevées au mois d'octobre, alors que les tissus sont en décomposition, qu'au mois d'août. Considérant que les invertébrés aquatiques sont réputés préférer les plantes en décomposition comme source nourriture, cette tendance pourrait signifier une disponibilité accrue des métaux à l'automne, pour un éventuel transfert trophique dans la chaîne alimentaire du fleuve.

¹Signalons que les communautés végétales et le degré de contamination de la partie sud du lac St-Pierre sont très peu connus. En effet, étant utilisée depuis longtemps comme zone de tir par le Ministère de la Défense nationale, cette zone n'a jamais été échantillonnée systématiquement.

Bioaccumulation des métaux - rôle des plaques de fer: Des oxyhydroxydes de Fe(III) s'accumulent à la surface des racines de *V. americana*, formant une couche brunâtre visible. Afin de caractériser cette "plaque" de fer, et de mieux comprendre son rôle dans le processus de bioaccumulation des métaux, nous l'avons examinée par diverses techniques (microscopie

Ces résultats démontrent l'importance d'enlever cette couche de fer précipitée à la surface des racines, si l'on veut déterminer les quantités réelles de métaux accumulées à l'intérieur des tissus racinaires. D'autre part, ils laissent entendre que la plaque de fer représente un réservoir extracellulaire important de Fe, de Mn et de Zn, retenu en proximité des racines. Le contenu en métaux traces des plaques de fer pourrait possiblement servir pour estimer l'exposition des racines aux métaux sédimentaires.

électronique à balayage / à transmission; microanalyse par EDS; analyse par diffraction de rayons-X). Selon ces observations (St-Cyr *et al.* 1993b), cette plaque de fer est poreuse et hétérogène, comprenant notamment des particules riches en fer, des microorganismes ainsi que des oxydes de Mn, les deux derniers éléments étant photographiés pour la première fois dans une plaque de fer. Sur le plan morphologique, les particules riches en fer ressemblent beaucoup aux oxydes de fer formés dans les sédiments oxyques par diagenèse et récoltés sur des plaques de Téflon. Quatre morphologies différentes se manifestent: deux (nodules, aiguilles) correspondent à des formes cristallines, possiblement la goethite ou la lépidocrocite, alors que les autres (filaments, matériels dispersés) sont plutôt amorphes.

Outre ces observations microscopiques, nous avons également déterminé le contenu des plaques en Fe, Mn et Zn, à l'aide d'une méthode d'extraction impliquant la réduction des oxydes de fer. Nous avons optimisé la méthode d'extraction au préalable, en cherchant à minimiser les pertes en potassium (causées par des altérations de la membrane cellulaire) associées aux différentes techniques d'extraction. Les concentrations en Fe, Mn et Zn furent déterminées dans la plaque et dans la racine débarrassée de son couvert d'oxydes de fer: les pourcentages de Fe et de Mn retenus à l'extérieur de la racine, pour nos sites d'échantillonnage, s'élevaient à plus de 90%. De même, les quantités de Zn retenues à l'extérieur de la racine représentaient de 54% à 93% du contenu en Zn total (racine + plaque) (St-Cyr et Campbell 1993b).

Bioaccumulation des métaux - modélisation. Ayant mis en évidence la variabilité spatiale des concentrations en métaux traces chez les plantes aquatiques, nous avons cherché à expliquer ces variations en fonction des conditions environnementales à chaque site, notamment le degré de contamination du milieu (tel que reflété par les concentrations de métaux traces dans les sédiments hôtes, ou encore dans la plaque de fer entourant les racines).

La démarche suivie consiste d'abord à analyser les relations sédiments-plantes pour les lacs fluviaux séparément, et ensuite d'intégrer les banques de données afin de vérifier si les relations mises en évidence pour un milieu s'appliquent à l'autre (c'est-à-dire, si le modèle est d'application générale). En effet, les relations sédiments-plantes diffèrent sensiblement entre les lacs Saint-Pierre et Saint-Louis, ce qui nous a offert un bon test pour notre modélisation. A titre d'exemple, pour le lac St-Pierre il semble exister une relation positive entre le Cu-total dans les sédiments (Cu_T) et le Cu accumulé dans les parties vertes de la vallisnérie (Cu_{plante}); par ailleurs, une relation entre Cu_T et Cu_{plante} se dessine également pour le lac Saint-Louis, mais cette fois-ci elle s'avère négative. Il est évident que les relations avec le Cu_T ne peuvent se généraliser d'un milieu à un autre; ce n'est qu'en tenant compte de la répartition du Cu dans les sédiments, c-à-d. sa "spéciation", que l'on peut dégager une relation positive pour les deux lacs (avec le Cu(F3), extrait avec $NH_2OH \cdot HCl$). Une analyse statistique semblable se poursuit pour chaque métal (Cd,Cr,Ni,Pb,Zn) et un premier manuscrit interne devrait être prêt en janvier 1994.

Répartition intracellulaire des métaux - phytochélatines. La répartition cytosolique du cuivre et du cadmium fut déterminée chez des plantes aquatiques indigènes (V. americana; M. spicatum), récoltées à 10 stations situées le long d'un gradient de contamination dans les lacs St-Pierre et St-Louis. La proportion de métaux cytosoliques sous forme anionique s'avère variable d'une station à une autre, pouvant atteindre $\approx 100\%$ à certaines stations (ex.: Cd: 10-100% anionique dans les racines de V. americana). L'observation de forts pourcentages de complexes anioniques à certaines stations suggère la présence de phytochélatines comme ligands cytosoliques (les complexes Cd-PC et Cu-PC, si présents, se comporteraient comme complexes anioniques). Cependant, jusqu'à date nos tentatives pour doser des phytochélatines individuelles dans les extraits cytosoliques s'avèrent infructueuses. Il s'agit surtout d'un problème de limite de détection de la méthode analytique.

La technique analytique employée avec succès pour doser les PCs chez les plantes exposées au laboratoire s'avère insuffisamment sensible pour les détecter dans le matériel récolté sur le terrain. Pour détecter les phytochélatines dans les plantes aquatiques indigènes, il faudrait améliorer la limite de détection d'un facteur d'au moins 50.

Par ailleurs, malgré son manque inhérent de spécificité, le dosage de la fraction anionique des métaux cytosoliques semble offrir un certain potentiel comme biomarqueur. A quoi peut-on attribuer la grande variabilité du pourcentage de métaux cytosoliques sous forme anionique, d'un site à l'autre? Ces variations spatiales, pourraient-elles refléter une exposition variable des plantes à des métaux toxiques ayant la capacité d'induire la synthèse de phytochélatines? Des études sont en cours pour vérifier ce point (mémoire de maîtrise de M. André Vachon).

3. TRAVAUX A RÉALISER

Les travaux prévus dans le cadre de cette subvention sont essentiellement terminés. Certaines analyses statistiques restent à faire, notamment en ce qui concerne les relations plantes-sédiments, ainsi qu'une dernière expérience au laboratoire pour mieux cerner la capacité de nos plantes aquatiques à synthétiser des phytochélatines.

- Les concentrations de métaux dans les plantes devront être corrélées avec les fractions «biodisponibles» de ces métaux dans les sédiments, selon les équations développées à l'INRS-Eau pour évaluer les concentrations d'ions libres dans les eaux interstitielles. Nous avons toutes les données en main présentement pour ce faire, et les analyses statistiques sont actuellement en cours (Dr Louise St-Cyr).
- De même, pour terminer son mémoire de maîtrise, M. André Vachon tentera d'expliquer les variations de la répartition intracellulaire des métaux (Cd, Cu) en fonction de divers facteurs environnementaux, notamment ceux liés au degré de contamination de l'habitat (analyse statistique en cours). Comme effort complémentaire, il compte également reprendre quelques expériences au laboratoire dans des conditions d'exposition contrôlées (expériences similaires à celles décrites dans la section 2.1.2, mais réalisées avec des plantes témoins n'ayant jamais été exposées au préalable à des métaux toxiques).

A ces travaux vont évidemment s'ajouter des efforts de rédaction (deux manuscrits avec Dr St-Cyr, dont un est déjà en révision interne, ainsi qu'un troisième tiré du mémoire de maîtrise de M. Vachon).

4. DIFFICULTÉS SURVENUES

Les travaux effectivement réalisés correspondent à ceux prévus dans l'échéancier soumis avec la demande de subvention, avec une exception notable. Selon notre plan de recherche initial, nous devions chercher des liens entre les concentrations tissulaires des métaux toxiques (et surtout leur répartition parmi différents ligands cellulaires, notamment les PCs) et leurs effets toxiques sous-létaux (voir Section 2, objectif spécifique (iii)). On prévoyait confier cette partie du projet à un stagiaire postdoctoral, mais le recrutement d'un tel stagiaire s'est avéré plus difficile que prévu, malgré la parution d'annonces dans des revues internationales à grande diffusion (ex.: Science). A deux reprises (1990 et 1991), des candidats (étrangers) ont initialement accepté notre offre d'un poste postdoctoral ... mais se sont désistés à la dernière minute. Devant ces difficultés de recrutement, nous avons décidé de mettre l'accent sur les autres parties du projet.

Outre ce problème de recrutement, la seule autre difficulté majeure concernait la mise au point des techniques d'extraction et de dosage des phytochélatines. Cette étape s'est avérée plus longue que prévue et ce n'est qu'à la fin de l'été 1991 que nous avons réussi à déceler les phytochélatines chez les macrophytes ayant été exposés à une forte contamination au

laboratoire. Nous avons réussi à améliorer la performance analytique de la méthode, mais elle demeure trop peu sensible pour détecter des phytochélatines chez les plantes indigènes. Nous avons contourné cette difficulté en estimant les phytochélatines indirectement, en déterminant la spéciation des métaux cytosoliques (fraction anionique).

5. COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

Les résultats de ce projet sont: **i)** une approche géochimique pour évaluer la biodisponibilité, pour les plantes aquatiques, des métaux toxiques associés aux sédiments; **ii)** une première indication de la réponse biochimique provoquée chez ces plantes par les métaux toxiques bioaccumulés; et **iii)** l'identification d'une espèce «sentinelle» (Vallisneria americana) qui pourrait servir comme biomoniteur de métaux dans le système Saint-Laurent.

6. RÉSULTATS TANGIBLES

Publications dans des revues avec comité de lecture

St-Cyr, L. et P.G.C. Campbell, 1993a.

Trace metals in submerged plants of the St-Lawrence River. **Can. J. Bot.**

(soumis juillet 1993: révisions soumises début novembre 1993).

St-Cyr, L. et P.G.C. Campbell, 1993b.

Iron plaque on the roots of a submerged aquatic plant in relation with environmental factors. (en révision interne).

St-Cyr, L., P.G.C. Campbell et K. Guertin. 1993a.

Evaluation of the role of submerged plant beds in the metal budget of a fluvial lake.

Hydrobiologia (soumis mars 1993: révisions soumises octobre 1993).

St-Cyr L., D. Fortin et P.G.C. Campbell. 1993b.

Microscopic observations of the iron plaque of a submerged aquatic plant (Vallisneria americana Michx). **Aquatic Botany**, 46: 155-167.

Publications dans les comptes rendus de congrès

L. St-Cyr, P.G.C. Campbell et K. Guertin. 1993.

Role of submerged aquatic plants in contaminant dynamics in a fluvial lake (Lake St. Pierre / St. Lawrence River, Quebec). International Conference on Heavy Metals in the Environment, Toronto, septembre 1993. Comptes rendus, vol. 2, pp. 29-32.

Vachon, A. et P.G.C. Campbell. 1993.

Potential of phytochelatin in aquatic plants as biochemical indicators of exposure to toxic metals - a field study (St. Lawrence River, Quebec). International Conference on Heavy Metals in the Environment, Toronto, septembre 1993. Comptes rendus, vol. 2, pp. 45-48.

Présentations à des congrès:

St-Cyr, L. et P.G.C. Campbell. 1991.

Iron plaque on roots of Vallisneria americana Michx. VIth International Symposium on Iron Nutrition and Interactions in Plants, Utah, 14-19 juillet 1991.

St-Cyr, L., D. Fortin et P.G.C. Campbell. 1991.

Microscopic observations of the iron plaque of Vallisneria americana Michx. VIth International Symposium on Iron Nutrition and Interactions in Plants, Utah, 14-19 juillet 1991.

Rapports scientifiques:

St-Cyr, L., P.G.C. Campbell et K. Guertin. 1992.

Evaluation de la biomasse et du contenu en métaux traces des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent. INRS-Eau, rapport scientifique no 356, 226 p.

Comme résultat tangible additionnel, mentionnons l'établissement d'un contact scientifique précieux avec le Dr Wilfried Rauser (Département de botanique, Université de Guelph), chercheur considéré à juste titre comme l' «expert canadien» dans le domaine des phytochélatines (plantes terrestres). Monsieur André Vachon (étudiant MSc) a effectué un stage de formation à l'Université de Guelph (juin 1992) et le Dr Rauser est venu visiter notre Centre en mai 1993.