

EVALUATION DE LA BIOMASSE ET DU
CONTENU EN METAUX TRACES DES PLANTES
AQUATIQUES SUBMERGEES DU LAC SAINT-
PIERRE, FLEUVE SAINT-LAURENT.

**EVALUATION DE LA BIOMASSE ET DU
CONTENU EN METAUX TRACES DES PLANTES
AQUATIQUES SUBMERGEES DU LAC SAINT-
PIERRE, FLEUVE SAINT-LAURENT.**

Louise St-Cyr, Peter G.C. Campbell et
Kateri Guertin
INRS-Eau

Rapport Scientifique no 356

Rédigé pour le Centre Saint-Laurent
Conservation et Protection - Région du Québec
Environnement Canada

Juin 1992

PERSPECTIVES DE GESTION

Le Plan d'action Saint-Laurent vise à protéger, conserver et restaurer le Saint-Laurent, avec comme objectif prioritaire la dépollution du fleuve. La réalisation de cet objectif demande certaines connaissances préalables sur le bilan actuel, les apports et le devenir des substances toxiques présentes dans ce système. Le présent rapport traite de l'évaluation des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre comme réservoir saisonnier de métaux traces pour voir l'influence de ce compartiment sur le cycle global des métaux traces dans cette partie du fleuve. Le lac Saint-Pierre est une zone d'intérêt prioritaire du Plan d'action Saint-Laurent.

MANAGEMENT PERSPECTIVE

The St. Lawrence Action Plan promotes the protection, conservation and restoration of the St. Lawrence River, with depollution of the River as the main objective. Attaining this objective requires knowledge of the state, input and fate of toxic substances present in the system. This report evaluates the role of submerged aquatic plants in Lake Saint-Pierre as a possible seasonal reservoir of trace metals and the influence of this compartment on the global cycle of trace metals in this part of the River. Lake St. Pierre has been designated a priority zone in the St. Lawrence Action Plan.

AVIS DE REVISION

Le présent rapport a été examiné par le Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marques de commerce ou de produits commerciaux ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Veillez adresser vos commentaires sur le contenu du présent rapport à la Direction de la connaissance de l'état de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, 105 McGill, Montréal (Québec) H2Y 2E7.

RESUME

Les objectifs du projet étaient premièrement d'évaluer la biomasse des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre au maximum de biomasse saisonnier de même qu'en période de sénescence, pour, dans un deuxième temps, en estimer le contenu en métaux traces. L'échantillonnage s'est déroulé en août et octobre 1990. En utilisant les images multispectrales d'un capteur aéroporté MEIS-II, étalonnées avec les données de terrain, Lavoie et al. (1991) ont estimé la biomasse des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre en juillet 1990. A partir de valeurs de biomasse dans des carreaux de 4 km X 4 km et de valeurs de concentration en contaminants à 17 stations dans le lac, la technique du krigeage a permis d'estimer à 36 kg de Cd, 98 kg de Cr, 557 kg de Cu, 314 kg de Ni, 69 kg de Pb et à 2,580 kg de Zn les quantités retenues dans les parties vertes des plantes submergées. Pour un instant donné, les quantités retrouvées dans les plantes étaient supérieures à celles dissoutes dans la colonne d'eau pour le Cd, le Pb et le Zn, mais nettement inférieures à celles dans les sédiments mobiles. Pendant la période estivale, le compartiment "macrophyte" retiendrait <1% du Ni et du Cu dissous dans l'eau qui passe dans le lac pendant l'été, 2,2% du Zn, 2,5% du Cd et 4,1% du Pb. La perte en biomasse observée au mois d'octobre et la dérive des débris de plantes suggèrent que les métaux associés aux parties vertes des plantes submergées sortent du lac à la fin de l'été. Les macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, particulièrement la vallisnérie américaine, montrent leur utilité en tant que bioindicateurs de métaux traces, en reflétant la contamination du milieu et la partie biodisponible des métaux potentiellement transmissible dans la chaîne alimentaire.

ABSTRACT

The objectives of this project were to evaluate the biomass of Lake St-Pierre submerged aquatic plants, both at the peak of the seasonal biomass and during the senescence period, and to estimate the total content of trace metals contained in the above-ground portion of the vegetation. The biomass of the submerged aquatic plants was determined at 27-40 stations in August and October 1990; multispectral remote sensing data (MEIS-II) were used to extrapolate from these point biomass estimates (g/m^2) to the entire lake area (Lavoie *et al.*, 1991). Samples of the aquatic plant community (dominated by Vallisneria americana and Potamogeton sp.) were also collected for metal analysis at 17 stations (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn). By combining the two data bases (biomass; metal concentrations), using appropriate geostatistical techniques (kriging), we have estimated the seasonal storage of metals in Lake St-Pierre plants: 36 kg Cd, 98 kg Cr, 557 kg Cu, 314 kg Ni, 69 kg Pb and 2,580 kg Zn. At any given time during the seasonal biomass peak, the quantities of Cd, Pb and Zn stored in the plants were higher than those dissolved in the water column, but much lower than those present in the mobile sediments. Mass balance calculations for the summer months (120 d) indicate that the "macrophyte" compartment would retain <1% of the Ni and Cu entering the lake; calculated retentions are slightly higher for Zn (2,2%), Cd (2,5%) and Pb (4,1%). The loss of biomass and the downstream drifting of plant material noted in October suggest that the metals associated with the above-ground parts of the submerged vegetation are not recycled within the lake, but are exported at the end of the summer. Submerged macrophytes of Lake St-Pierre, particularly Vallisneria americana (wild celery), show potential as bioindicators of trace metals, reflecting spatial variations in environmental contamination; metals present in the macrophyte biomass are potentially transferable through the food chain to higher organisms.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les divers intervenants qui ont participé au travail de terrain: les capitaines de bateau Mitchell Sisak, Robert Lavigne et Martin Truchon ainsi que les plongeurs René Rodrique, François Fournier, Jean-Sébastien Goupil, John Easton et Michel Abbott.

Au laboratoire, nous remercions tous les techniciens qui ont participé aux multiples facettes du projet: François Fournier, Michèle Geoffroy-Bordeleau, Nicole Drouin et Bernard Veilleux. Merci également à Michel Leclerc et Paul Boudreau pour les explications données sur le logiciel Panache permettant de suivre les différentes masses d'eau dans le sud du lac Saint-Pierre.

A l'herbier du Québec, situé au Complexe scientifique, merci à Louise Guay pour nous avoir permis l'utilisation d'un grand séchoir ventilé, ainsi qu'à Normand Dignard pour des identifications de plantes. Merci également à M. Jean Mandeville, de la Garde Côtière Canadienne à Sorel, qui a calculé les coordonnées UTM de nos stations d'échantillonnage.

Merci finalement au personnel du Centre Saint-Laurent: Vincent Jarry, Marcelle Grenier, Isabelle Goulet, Stéphane Laurin et Ken Lum pour leur apport matériel et leur suivi des travaux.

TABLE DES MATIERES

Perspectives de gestion.....	iii
Avis de révision et Commentaires.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Remerciements.....	vii
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux.....	xiii
1.0 PROBLEMATIQUE.....	1
2.0 REVUE DE LA LITTERATURE.....	4
2.1 Le lac Saint-Pierre.....	4
2.2 Contamination des sédiments du lac Saint-Pierre...	7
2.3 Plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre.	9
2.4 Contaminants dans les plantes aquatiques du lac Saint-Pierre.....	11
2.5 Méthodes d'évaluation de la biomasse végétale submergée dans les plans d'eau.....	13
3.0 METHODOLOGIE.....	16
3.1 Echantillonnage.....	16
3.1.1 Plan d'échantillonnage.....	16
3.1.2 Positionnement des stations.....	19
3.2 Estimation de la biomasse des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre.....	21
3.2.1 Relevés quantitatifs de la biomasse.....	21
3.2.2 Relevés semi-quantitatifs de la biomasse...	22
3.2.3 Déterminations de biomasse.....	24
3.3 Estimation de la quantité de contaminants dans les macrophytes submergés du lac Saint-Pierre.....	24
3.3.1 Préparation des échantillons.....	24
3.3.2 Dosage des métaux.....	25
3.3.3 Contrôle de la qualité des analyses.....	25
3.4 Extrapolation des données ponctuelles (stations individuelles) à des bilans massiques pour l'ensemble du lac Saint-Pierre.....	27
3.4.1 Biomasse des macrophytes submergés.....	27
3.4.2 Quantités de contaminants.....	29

4.0	RESULTATS ET DISCUSSION.....	31
4.1	Végétation submergée du lac Saint-Pierre.....	31
4.2	Biomasse végétale du mois d'août.....	36
4.2.1	Résultats de la campagne d'échantillonnage.	36
4.2.2	Relation densité-biomasse.....	40
4.2.3	Variabilité spatiale de la biomasse végétale.....	42
4.3	Biomasse végétale du mois d'octobre.....	48
4.3.1	Résultats de la campagne d'échantillonnage.	48
4.4	Changement dans la biomasse entre août et octobre.	51
4.5	BIOMASSE - SYNTHESE.....	55
4.6	Contaminants (métaux traces) dans les plantes.....	56
4.6.1	Variabilité inter-spécifique des concentrations en contaminants.....	57
4.6.2	Variabilité spatiale des concentrations en contaminants.....	73
4.6.3	Variabilité temporelle (août-octobre) des concentrations en contaminants.....	76
4.7	Estimé du contenu total en contaminants dans les plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre.	79
4.8	METAUX - SYNTHESE.....	84
5.0	DISCUSSION GENERALE.....	85
6.0	RECOMMANDATIONS.....	99
7.0	REFERENCES.....	101
ANNEXE 1:	Code des balises ayant servi pour la calibration de l'appareil de localisation.....	111
ANNEXE 2:	Coordonnées UTM des emplacements des stations d'échantillonnage des campagnes de terrain d'août et octobre 1990.....	113
ANNEXE 3:	Résultats bruts de la biomasse végétale submergée du lac Saint-Pierre, de la campagne d'échantillonnage d'août 1990.....	116

ANNEXE 4:	Données brutes des valeurs de biomasse associées au nombre de rosettes de vallisnérie récoltées à diverses stations du lac Saint-Pierre en août 1990, et qui ont servi à tracer la droite d'estimation présentée à la fig. 4.2.....	134
ANNEXE 5:	Esquisses de la morphologie générale des deux espèces de plantes dominantes au lac Saint-Pierre.....	136
ANNEXE 6:	Résultats bruts de la biomasse végétale submergée du lac Saint-Pierre, de la campagne d'échantillonnage d'octobre 1990.....	138
ANNEXE 7:	Résultats des dosages de métaux traces.....	157
ANNEXE 8:	Analyse géostatistique des données de biomasse et des quantités de métaux associées aux plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre et obtenues lors de l'échantillonnage de mois d'août 1990.....	165

LISTE DES FIGURES

2.1	Carte de l'emplacement des stations visitées au lac Saint-Pierre en août et octobre 1990.....	5
3.1	Schéma des étapes d'échantillonnage et de traitement analytique (août 1990).....	26
4.1	Espèces de plantes aquatiques submergées dominantes par station visitée au cours de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre.....	32
4.2	Diagramme de dispersion de la masse sèche (grammes) en fonction du nombre de rosettes de <u>Vallisneria americana</u> récoltées au lac Saint-Pierre en août 1990.....	41
4.3	Comparaisons des concentrations ($\mu\text{g/g}$ de poids sec) de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn dosées chez <u>Vallisneria americana</u> et <u>Potamogeton richardsonii</u> récoltés au lac Saint-Pierre en août 1990 avec les moyennes et les médianes des concentrations pour ces mêmes métaux, compilées par Outridge et Noller (1991), pour des plantes aquatiques provenant respectivement de sites non-contaminés et contaminés.....	61
4.4	Répartition spatiale des concentrations en cadmium ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et de potamot provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1.....	64
4.5	Répartition spatiale des concentrations en chrome ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et des algues filamenteuses provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre.....	65
4.6	Répartition spatiale des concentrations en cuivre ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et des algues filamenteuses provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre.....	67
4.7	Répartition spatiale des concentrations en nickel ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre.....	68

4.8	Répartition spatiale des concentrations en zinc ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et du potamot provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre.....	70
4.9	Répartition spatiale des concentrations en plomb ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et dans les algues filamenteuses provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre...	72
4.10	Comparaison des concentrations ($\mu\text{g/g}$ tissu poids sec) en Cd, Cr, Cu, Pb, Ni et Zn, dosées dans les parties vertes de <u>Vallisneria americana</u> récoltées aux stations 13, 26 et 47 du lac Saint-Pierre, en août et en octobre 1990.....	77
4.11	Carte des valeurs krigées des quantités de Cu (en $\text{mg}/49 \text{ m}^2$) basées sur les données de fond pour les 16 unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$ formant la zone d'estimation - août 1990..	80
4.12	Carte des valeurs krigées des quantités de Pb (en $\text{g}/49 \text{ m}^2$) basées sur les données de fond pour les 16 unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$ formant la zone d'estimation - août 1990..	81
5.1	Carte des profils d'écoulement des eaux du fleuve Saint-Laurent et des tributaires sud du lac Saint-Pierre, selon Leclerc et collaborateurs (1991), pour l'événement hydrodynamique le plus fréquemment observé pendant l'été.....	92

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Concentrations en métaux traces ($\mu\text{g/g}$) dans les tissus de plantes aquatiques récoltées en 1976 au lac Saint-Pierre.....	12
4.1	Nombre total et fréquence (%) de la présence d'associations d'espèces de plantes submergées aux stations d'échantillonnage du lac Saint-Pierre, août 1990.....	34
4.2	Tableau synthèse de la liste des stations d'échantillonnage visitées au lac Saint-Pierre en août 1990 et du type de travail effectué.....	38
4.3	Moyenne de la biomasse (grammes de matière sèche/ m^2) avec l'écart-type de la moyenne, le coefficient de variation, l'estimé de la biomasse dans 49 m^2 ainsi qu'un indice de densité à chacune des stations du lac Saint-Pierre, en août 1990, où des données de biomasse furent obtenues.....	43
4.4	Proportion de la biomasse sèche (grammes) de chaque espèce de plantes aquatiques submergées aux stations du lac Saint-Pierre, en août 1990, où les données obtenues sur le terrain en permettent le calcul.....	47
4.5	Moyenne de la biomasse (grammes de matière sèche/ m^2) avec l'écart-type de la moyenne, le coefficient de variation, l'estimé de la biomasse dans 49 m^2 et une indication si la station a été retrouvée, à chacune des stations du lac Saint-Pierre visitée en octobre 1990...	50
4.6	Compilation des données obtenues lors des échantillonnages des mois d'août et d'octobre 1990 au lac Saint-Pierre: espèces de plantes aquatiques dominantes par station, biomasse totale estimée à chaque station (49 m^2) et pourcentage de perte calculé par station.....	52
4.7	Compilation des données de biomasse végétale (en grammes de masse sèche, estimée pour 49 m^2) obtenues lors des échantillonnages des mois d'août et octobre 1990 au lac Saint-Pierre, pour <u>Vallisneria americana</u> et <u>Potamogeton richardsonii</u> , avec le pourcentage de perte calculé par espèce.....	53

4.8	Concentrations en métaux ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les plantes aquatiques submergées d'autres plans d'eau que le lac Saint-Pierre; valeurs publiées dans la littérature, ainsi que les valeurs obtenues dans cette étude.....	59
4.9	Résultats d'estimation de la quantité totale de biomasse et de la quantité totale de métaux associés aux parties vertes des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, en août 1990.....	83
5.1	Calcul des quantités approximatives de métaux traces, pour un temps donné, dans l'eau (Lum <u>et al.</u> , 1991), dans les sédiments mobiles (Hardy <u>et al.</u> , 1991) et dans les plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre.....	87
5.2	Calcul de la quantité relative de métaux traces retenue dans les parties vertes des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre à l'été 1990 par rapport aux quantités de métaux dissous entrant dans le lac, tirées de Lum <u>et al.</u> (1991).....	88

1.0 PROBLEMATIQUE

Les herbiers de plantes aquatiques jouent un rôle important dans la dynamique des contaminants, directement par la bioaccumulation saisonnière de ces substances, et indirectement en influençant la vitesse du courant et donc la sédimentation et la resuspension de la fraction fine des sédiments en suspension (laquelle joue un rôle clé dans le transport de plusieurs contaminants) (James et Barko, 1990). C'est leur influence directe qui est évaluée dans ce projet.

La capacité des plantes aquatiques submergées à concentrer les métaux lourds qui se trouvent à l'état de traces dans leur milieu est largement reconnue (CNRC, 1988), avec un pouvoir de concentration* variant de 10 à 10⁶ (Kovacs et al., 1984). Dans le fleuve Saint-Laurent, les facteurs de concentration rapportés pour la vallisnérie américaine (Vallisneria americana) sont de l'ordre de 10³ à 10⁴ pour le Cr, Cu, Ni, Pb et Zn (Environnement Canada, 1981). Deux voies possibles existent pour l'accumulation des métaux traces dans les parties vertes des macrophytes enracinés submergés: i) une assimilation directe à partir de la colonne d'eau et/ou ii) une prise en charge à partir de l'eau interstitielle des sédiments, suivie d'une translocation verticale (acropète) des racines vers les parties vertes de la plante (Denny, 1980). Cette dualité de mécanisme s'opère aussi pour d'autres solutés (ex.: le phosphore), et les deux voies d'accumulation peuvent co-exister chez la même espèce.

*facteur de = $\frac{\text{concentration dans les parties vertes des plantes}}{\text{concentration dans l'eau}}$

Compte-tenu de l'abondance certaine des macrophytes dans le lac Saint-Pierre, de leur capacité de bioaccumuler des contaminants et de leur cycle annuel de croissance/sénescence/dormance, il nous semblait pertinent de tenter de quantifier leur influence directe sur la dynamique des contaminants dans ce lac fluvial, c'est-à-dire d'évaluer leur rôle possible comme réservoir (saisonnier) des contaminants. Sérodes (1978) a suggéré que les plantes aquatiques soient utilisées pour améliorer nos connaissances sur les mécanismes de transfert des polluants entre les sédiments de fond du fleuve Saint-Laurent et la biomasse. Environnement Canada (1981) désignait les plantes aquatiques comme étant le meilleur indicateur biologique pour l'étude des substances toxiques dans le fleuve comparativement aux sédiments de fond, aux pélécy-podes et aux poissons, mais suggérait i) de vérifier les variations de concentrations d'éléments toxiques dans les différentes espèces et ii) de mesurer ces variations tout au long de la croissance des plantes. Le projet actuel a donc été entrepris dans le but de répondre aux questions suivantes:

- Quelles sont les quantités de contaminants accumulées et entreposées dans différentes espèces de macrophytes submergés?
- Constituent-ils un réservoir de contaminants significatif?
- Qu'arrive-t-il à ces contaminants à la fin de la période de croissance? Sont-ils recyclés à l'intérieur des herbiers ou sont-ils plutôt exportés vers l'aval?

L'objectif de la première partie du projet était d'évaluer la biomasse totale des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent, en août (maximum de biomasse saisonnier) et en octobre (période de sénescence).

L'approche retenue comprenait l'évaluation de la biomasse végétale submergée du lac par télédétection (partie effectuée par le Centre Saint-Laurent) couplée à des mesures de biomasse réelle sur le terrain (responsabilité de l'INRS-Eau). Les plantes aquatiques submergées étaient récoltées à des stations représentant un gradient dans la densité des herbiers, en vue de permettre un étalonnage des données de télédétection.

L'objectif de la seconde partie du projet était d'estimer le contenu en métaux traces des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre. La méthodologie choisie impliquait d'abord la détermination du contenu en métaux des plantes submergées à différents endroits dans le lac Saint-Pierre, ces sites ayant été choisis pour bien représenter le gradient de contamination du lac (tel que réflété par les sédiments). Dans un second temps, ces données ponctuelles étaient généralisées par région dans le lac et associées à la biomasse végétale de la même région. Ces résultats ont permis d'estimer la capacité des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre à accumuler des contaminants et de déterminer le destin de ceux-ci à l'automne, c'est-à-dire à la fin de la période de croissance.

2.0 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Le lac Saint-Pierre

Le lac Saint-Pierre est un lac fluvial, un élargissement du fleuve Saint-Laurent entre Sorel et Trois-Rivières. Le lac Saint-Pierre a été sélectionné comme "zone d'intérêt prioritaire" par le Centre Saint-Laurent. Le lac fait partie des régions du fleuve pointées comme étant contaminées par les substances toxiques, et qui requièrent une intervention prioritaire à cause de l'importance des ressources biologiques qui s'y trouvent et de leur utilisation.

Le lac Saint-Pierre se divise en deux parties: le secteur des îles de Sorel en amont et le lac proprement dit (fig. 2.1). La partie en amont comporte une multitude d'îles qui forment un delta. Les nombreux bras entourant les îles de Sorel semblent propices à la sédimentation de particules fines (limon et argile) qui favoriseraient l'accumulation de polluants (Hardy et al., 1991). Selon Sérodes (1978), le taux de sédimentation peut atteindre 1 cm/an dans la partie en amont, notamment sous l'influence des seuils submergés barrant les principaux chenaux; dans la partie vers l'aval du delta, le taux de sédimentation est très faible: 0,15 cm/an.

Le lac lui-même se divise en deux parties. Les eaux de la partie nord du lac proviennent majoritairement de la rivière des Outaouais, par le biais des rivières des Prairies et des Mille Îles, ainsi que de la rivière l'Assomption. La partie sud du lac reçoit les eaux du fleuve Saint-Laurent, provenant majoritairement des Grands Lacs, auxquelles s'ajoutent les eaux de quatre affluents québécois majeurs, soient les rivières

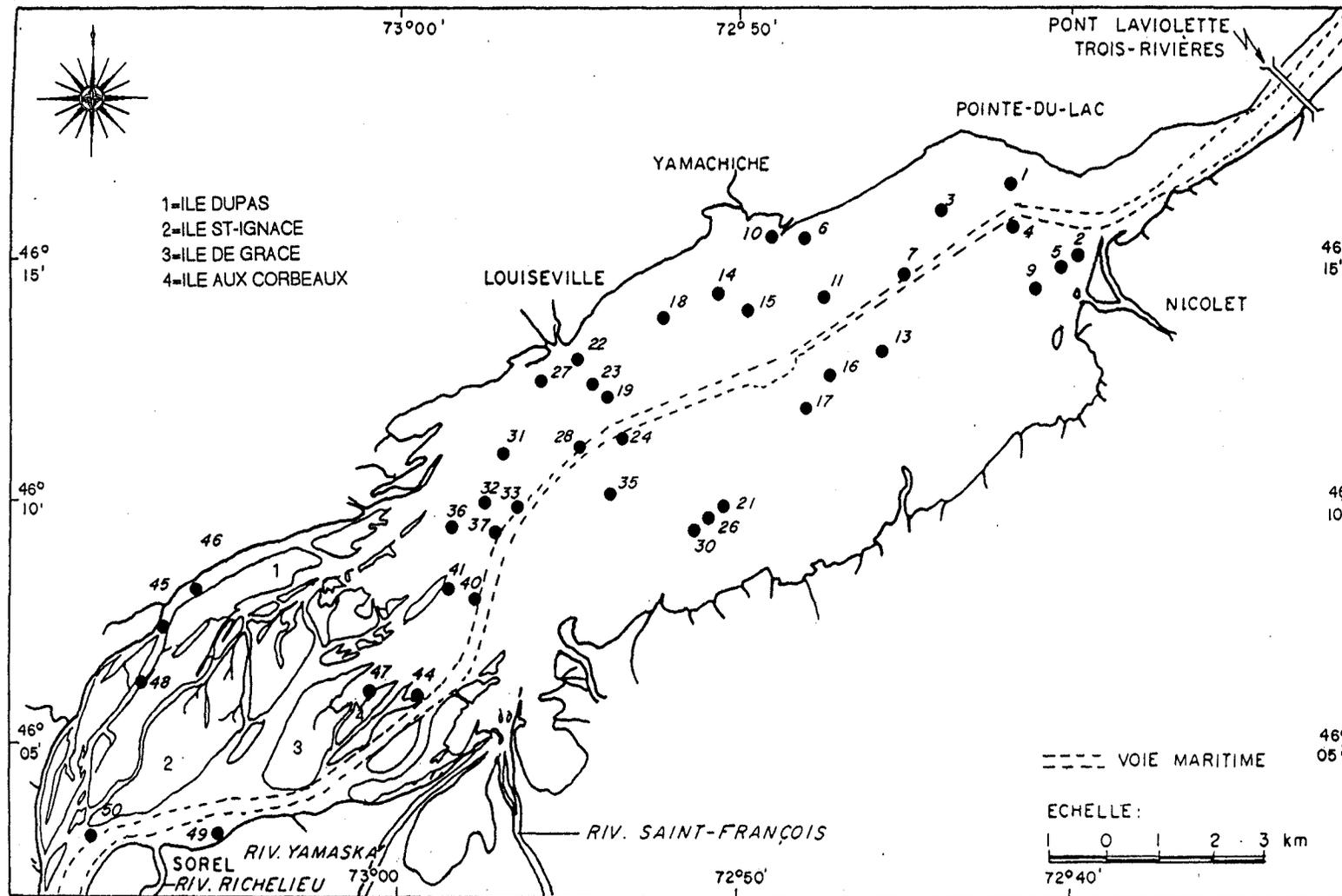


Figure 2.1: Carte de l'emplacement des stations visitées au lac Saint-Pierre en août et octobre 1990.

Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet. La voie maritime du Saint-Laurent, qui passe environ au centre du lac, constitue une barrière hydrodynamique au mélange des eaux (Leclerc et al., 1991). Alors que les eaux en provenance des Grands Lacs sont très minéralisées (conductivité > 300 $\mu\text{mhos/cm}$) et riches en carbonates (alcalinité > 75 mg/L CaCO_3), celles en provenance de la rivière des Outaouais sont peu minéralisées (conductivité < 225 $\mu\text{mhos/cm}$), peu alcalines (< 50 mg/L CaCO_3) et plus riches en Al, Fe et Mn (Hardy et al., 1991; Sérodes, 1978), ainsi qu'en matière humique (tanins et lignines; Pageau et al., 1971). A la sortie du lac Saint-Pierre, les masses d'eau à partir de la rive nord sont: 1°- les eaux des rivières des Prairies, Mille Iles et l'Assomption; 2°- les eaux du fleuve partiellement mélangées avec celles des tributaires de la rive nord; 3°- les eaux du fleuve Saint-Laurent; 4°- les eaux du fleuve partiellement mélangées avec celles des tributaires de la rive sud et 5°- les eaux des tributaires de la rive sud (Béland, 1974).

Compte tenu de sa vaste superficie (plus de 400 km^2), de sa faible profondeur moyenne (moins de 3 m sauf dans la voie maritime) et de la présence d'un archipel et d'un delta importants en amont, le lac Saint-Pierre constitue un réservoir potentiel, plus ou moins temporaire, de contaminants (Langlois et Sloterdijk, 1989). Le lac Saint-Pierre n'est cependant pas la vaste zone de sédimentation à laquelle on pourrait s'attendre. Le taux de sédimentation récente y serait de l'ordre de 0,3 cm/an, mais réfère à la déposition de particules plutôt limoneuses (Sérodes, 1978), avec une vaste zone de sable à l'aval du lac (Hardy et al., 1991). La vitesse du courant est de l'ordre de 1 m/s dans le chenal de la voie maritime et de moins de 0,3 m/s de part et d'autre de ce chenal.

Signalons que la partie sud du lac fait partie d'un territoire réservé au ministère de la Défense Nationale (zone de tir sous la juridiction de la base militaire de Nicolet) et que l'accès à cette région est limité.

2.2 Contamination des sédiments du lac Saint-Pierre (données historiques)

Les données disponibles relativement aux concentrations totales de métaux traces dans la couche superficielle des sédiments de fond du lac Saint-Pierre proviennent de deux sources: Sérodes (1978), qui discute des données recueillies en 1974, et Hardy et al. (1991) qui présentent des données datant de 1986. Le rapport de Hardy et al. (1991) ne considère pas la partie sud du lac, qui n'a pas été échantillonnée pour des raisons de sécurité (des tirs militaires effectués par la Défense Nationale).

Selon ces rapports, les contaminants trouvés dans les sédiments du lac Saint-Pierre proviendraient surtout du fleuve Saint-Laurent ainsi que des tributaires de la rive sud qui drainent des régions industrielles, des municipalités et des terres agricoles. Parmi ces tributaires, la rivière Richelieu est l'affluent le plus polluant en termes de charge, rejetant de grandes quantités de Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb et Zn. La seconde source de contaminants en importance serait des industries riveraines situées dans les municipalités de Sorel et Tracy, qui appartiennent majoritairement à l'industrie de la chimie inorganique (fabrication de pigments) et de la métallurgie, et qui sont responsables surtout de rejets élevés en matières en suspension et en plusieurs métaux traces, tels que le fer et le plomb, ainsi que le Cd, Cr, Cu, Mn, V et Zn.

Les apports en polluants provenant des municipalités riveraines arriveraient au troisième rang en importance (Hardy et al., 1991).

Etant donné la répartition géographique de ces diverses sources de contamination, c'est le secteur sud du lac qui semble le plus contaminé, bien qu'il n'y ait pas eu d'investigations récentes de contamination en métaux traces dans les sédiments dans cette région du lac. Sérodes (1978) y avait noté une accumulation de Cr dans la couche superficielle des sédiments de fond. Des eaux peu profondes et des courants plutôt lents près de la rive sud au niveau de Sorel empêcheraient le mélange des eaux de la rivière Richelieu avec celles du fleuve, à cause de la présence de la voie maritime au débit important et rapide. Les contaminants s'achemineraient alors en direction de la rive sud pour s'accumuler dans les sédiments (Hardy et al., 1991). Le secteur nord du lac recevrait les affluents déversant les plus faibles quantités de la majorité des polluants. Dans le secteur des îles de Sorel, une prédominance de particules fines ainsi que des teneurs élevées en matière organique seraient associées à un enrichissement des sédiments de surface en Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, V et Zn. Bien que la contamination soit moindre dans les secteurs nord et centre du lac que dans les sédiments entourant les îles, les teneurs en Cr, Cu, Fe, Ni et Zn y excèdent fréquemment les critères de qualité des sédiments établis par le Ministère de l'Environnement de l'Ontario pour le dépôt de résidus de dragage en eau libre (Hardy et al., 1991).

2.3 Plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre (données historiques)

Il y a davantage de données disponibles sur la végétation aquatique entourant les îles de Sorel, que sur celle du lac Saint-Pierre lui-même. Gravel et Lévesque (1977) rapportent que les principales espèces de plantes submergées retrouvées autour des îles du delta de Sorel sont la vallisnérie (Vallisneria americana), le myriophylle (Myriophyllum exalbescens ou spicatum?), le rubanier (Sparganium sp.), l'élodée (Elodea canadensis), la cornifle (Ceratophyllum demersum), la grenouillette (Hydrocharis morsus-ranae), le nénuphar (Nuphar spp.), le lis d'eau (Nymphaea spp.) et des algues filamenteuses. Dans le lac même, Gravel et Pageau (1976) rapportent que la végétation est omniprésente, absente seulement des chenaux principaux. Les espèces de pleine eau seraient surtout la vallisnérie et le myriophylle.

Pilon et al. (1981) et Tessier et al. (1981) ont effectué des relevés de la végétation des zones inondables des îles situées en amont du lac Saint-Pierre. Tessier et al. (1981) rapportent deux groupements majeurs qui représentent la végétation des milieux aquatiques, en permanence recouverts par les eaux:

- le groupement à Myriophyllum exalbescens (ou spicatum?) et Elodea canadensis, qui forment de minces bandes autour de chacune des îles. C'est un groupement de végétation toujours dense dont le pourcentage de recouvrement est rarement inférieur à 90%. La nappe d'eau y est toujours élevée, variant de 180 cm à 40 cm. Le myriophylle et l'élodée dominent et sont caractéristiques du groupement. Les espèces accompagnatrices sont le lis d'eau, le nénuphar, la lenticule mineure

(Lemna minor) et trisulquée (Lemna trisulca), l'hétéranthère (Heteranthera dubia) et la cornifle;

- le groupement à Vallisneria americana, situé en aval de l'archipel, dans une nappe d'eau plus profonde, fluctuant de 280 cm au printemps à 80 cm en été. Il occupe une vaste superficie et représente un élément important de la végétation aquatique dans cette portion du fleuve. La vallisnérie domine toutes les autres espèces végétales du groupement et parfois forme un tapis très dense. Les espèces accompagnatrices rapportées sont le Potamogeton zosteriformis (ou pectinatus?), l'hétéranthère litigieuse, le potamot de Richardson (Potamogeton richardsonii), l'élodée et la cornifle.

Tessier et al. (1984) ont étudié la productivité des macrophytes du lac Saint-Pierre suivant les différentes élévations le long de la ligne de rivage. La zone purement aquatique se compose d'une seule unité à Vallisneria americana. Cette zone débute à 300 m du rivage et s'étend sur plusieurs kilomètres. La profondeur de l'eau où la vallisnérie est présente varie de 60 cm à 3 à 4 m. La flore accompagnatrice est composée de potamots de Richardson, d'hétéranthères, d'élodées et de cornifles. Selon ces auteurs, l'unité à vallisnérie possède une biomasse moyenne de 96 g/m², la flore accompagnatrice atteignant une biomasse de 40 g/m², soit près de la moitié de la productivité de l'espèce principale. Dans certains cas, les auteurs ont observé une absence complète d'espèces végétales, qui semblait être causée par une turbidité trop forte provenant des différents affluents.

Denis Jacques Enr. (1986) rapporte que le plus important herbier aquatique se situerait au large de l'entrée de la Baie Saint-François, face à la Pointe de la Grande Commune. Dery,

Rocray et Associés (1983) ont répertorié la végétation dans le secteur de Baie-du-Febvre, au sud du lac Saint-Pierre, entre le chenal Tardif (à l'ouest) et la Longue-Pointe (à l'est) et ont noté que les herbiers aquatiques s'étendaient pratiquement jusqu'à la voie maritime. Ces deux dernières études rapportent comme espèce dominante la vallisnérie, avec l'hétéranthère comme espèce sous-dominante.

2.4 Contaminants dans les plantes aquatiques du lac Saint-Pierre (données historiques)

L'accumulation des métaux traces dans les tissus des macrophytes submergés des lacs a fréquemment été rapporté (McIntosh *et al.*, 1978; Welsh et Denny, 1976). Le site principal d'absorption des nutriments et des métaux traces chez les plantes aquatiques submergées enracinées a longtemps été un sujet de controverse (Bristow, 1975; Denny, 1980). S'agit-il d'une absorption par les parties vertes de la plante, qui baignent dans l'eau, ou encore d'une prise en charge par les racines dans les sédiments? Bien que l'importance du rôle joué par l'une ou l'autre des parties puisse varier selon la biodisponibilité des nutriments et des métaux traces dans l'un et l'autre des média (Carignan et Kalff, 1980), les racines semblent avoir un rôle significatif à jouer dans la prise des éléments nutritifs et des métaux traces (Bristow et Whitcombe, 1971; Campbell et Tessier, 1989; CNRC, 1988; Jackson *et al.*, 1991; Welsh et Denny, 1980).

Des concentrations en métaux traces dans les tissus de plantes aquatiques prélevées au lac Saint-Pierre en 1976 sont rapportées au tableau 2.1 (Béland et Demers, 1977). Les plantes analysées comprenaient la partie verte de la cornifle

Tableau 2.1: Concentrations en métaux traces ($\mu\text{g/g}$ poids sec) dans les tissus de plantes aquatiques (sans égard à l'espèce) récoltées en 1976 au lac Saint-Pierre. Les résultats sont indiqués comme suit: valeur moyenne \pm écart-type (valeur minimale - valeur maximale). Tiré de Béland et Demers (1977).

métaux ($\mu\text{g/g}$)	Stations				
	1	2	3	4	5
Pb	7,5 \pm 8,5 (<1,0 - 35,0)	10,3 \pm 10,5 (2,0 - 35,0)	4,4 \pm 4,2 (<1,0 - 10,0)	9,2 \pm 9,5 (2,0 - 35,0)	3,8 \pm 4,4 (<1,0 - 10,0)
Ni	8,8 \pm 14,6 (<0,5 - 50,4)	2,5 \pm 3,7 (<0,5 - 9,7)	15,8 \pm 19,0 (<0,5 - 50,4)	6,9 \pm 13,7 (<0,5 - 50,4)	13,0 \pm 17,0 (<0,5 - 38,7)
Cu	33,6 \pm 28,5 (2,8 - 134)	39,1 \pm 38,0 (2,8 - 134)	27,5 \pm 10,9 (14,0 - 41,9)	33,9 \pm 34,1 (2,8 - 134)	32,9 \pm 11,5 (14,0 - 46,2)
Zn	210 \pm 198 (36,9 - 808)	153 \pm 118 (37,3 - 450)	273 \pm 252 (36,9 - 808)	212 \pm 213 (37,3 - 496)	205 \pm 178 (36,9 - 808)
Cr	22,9 \pm 9,9 (5,8 - 39,0)	22,7 \pm 11,2 (5,8 - 39,0)	23,1 \pm 8,9 (10,4 - 35,8)	22,6 \pm 10,2 (5,8 - 39,0)	23,5 \pm 10,3 (10,4 - 35,8)
Cd	3,4 \pm 1,4 (1,4 - 6,3)	3,2 \pm 1,3 (1,4 - 6,1)	3,5 \pm 1,5 (1,6 - 6,3)	2,9 \pm 1,2 (1,4 - 6,1)	4,4 \pm 1,3 (2,6 - 6,3)

1 - Delta de Sorel + Lac Saint-Pierre = 19 stations

2 - Delta de Sorel + Lac Saint-Pierre (côté nord) = 10 stations

) 19

3 - Delta de Sorel + Lac Saint-Pierre (côté sud) = 9 stations

4 - Delta de Sorel = 13 stations

) 19

5 - Lac Saint-Pierre = 6 stations

ou du myriophylle ou la partie verte plus une petite partie du système racinaire dans le cas de la vallisnérie. Seulement un échantillon était prélevé par station. Lorsqu'il y avait trace de calcification sur les feuilles, celles-ci étaient lavées avec une solution de HCl à 2% et rincées à l'eau du fleuve.

Du tableau 2.1, nous pouvons déduire que les valeurs les plus élevées de Pb et de Cu dans les tissus végétaux se retrouvaient du côté nord du delta de Sorel, alors que les valeurs les plus élevées de Ni se retrouvaient du côté sud du delta. La valeur la plus élevée de Zn a été notée pour les plantes récoltées du côté sud du lac Saint-Pierre. Aucune tendance spatiale significative ne semblait évidente pour les valeurs de Cr et de Cd dans les tissus des plantes submergées récoltées au lac Saint-Pierre.

2.5 Méthodes d'évaluation de la biomasse végétale submergée dans les plans d'eau.

Etant donné la superficie importante du lac Saint-Pierre, et la quantité anticipée de plantes aquatiques submergées, les méthodes traditionnelles d'estimation de la biomasse par des stations placées régulièrement ou au hasard sur toute la surface du lac (Dennis et Isom, 1984) auraient exigé un travail de terrain de très grande envergure. Nous avons donc cherché une méthode alternative d'évaluation de la biomasse végétale du lac, couplée à des mesures ponctuelles au sol pour fin d'étalonnage. Deux méthodes semblaient s'offrir pour l'interpolation nécessaire entre des points de mesure sur le terrain: la télédétection (l'interprétation d'images numériques prises de satellites ou d'avions) et l'échosondage. C'est la première approche qui a été retenue dans le cadre de la présente étude.

Quelques études rapportent une estimation de la biomasse végétale submergée de bassins d'eau calculée à partir de photographies aéroportées. Vicars (1976) rapporte une telle estimation pour l'estuaire de la rivière Pamlico (Caroline du Nord, E.U.), qui se compose, dans la partie d'eau douce, d'espèces végétales similaires à celles retrouvées dans le lac Saint-Pierre (Vallisneria americana, Potamogeton perfoliatus, Chara et Nitella, algues filamenteuses). Au sol, une biomasse moyenne a été calculée le long de transects. Un facteur de poids sec/100 plantes fut obtenu pour chaque espèce végétale dans chaque type d'herbier pour permettre la conversion de densité de plantes (plantes/m²; tel que calculé dans des quadrats le long des transects) en biomasse (poids sec/m²), et multiplié par la superficie occupée par les plantes. Gustafson et Adams (1973), pour estimer la biomasse littorale du Myriophyllum spicatum du lac Wingra (Madison, Wisconsin), ont quantifié des photographies aéroportées couleur (infra-rouge) à l'aide d'une collecte de plantes menée sur le terrain. Les stations d'échantillonnage ont été repérées sur les photographies et une densité moyenne de tiges de myriophylle a été calculée pour chaque classe (ou tonalité) dans l'image obtenue. Un facteur de conversion du nombre de tiges en biomasse a été déterminé. L'étendue de chaque classe obtenue par photographies aéroportées a été multipliée par les valeurs de densité de tiges correspondantes et le nombre total de tiges converti en biomasse estimée en utilisant le facteur de conversion approprié pour la masse moyenne des tiges en ce temps de la saison. Cette technique se prêterait particulièrement bien à des herbiers de composition floristique homogène, qui montrent des relations uniformes entre le recouvrement, la densité et la biomasse des parties vertes des plantes. L'estimé de la biomasse obtenu par photographies aéroportées était de 67,700 kg alors qu'elle était de 117,900

kg tel qu'estimé par les méthodes de collecte traditionnelle sur le terrain. L'erreur sur l'estimé de la biomasse totale, pour une limite de confiance de 95%, était de 20% pour l'estimé obtenu par photographies aéroportées, alors qu'elle atteignait 58% pour les récoltes au sol.

La cartographie quantitative (superficie et biomasse) a également été utilisée pour estimer la biomasse d'algues marines submergées de la baie des Chaleurs, Québec, à l'aide d'images multispectrales du capteur aéroporté MEIS-II (Grenier et al., 1987). Après corrections pour les effets atmosphériques et pour la profondeur d'eau, une image de biomasse a pu être calculée à l'aide de la corrélation obtenue entre la réflectance et la biomasse réelle, telle que mesurée sur le terrain; les niveaux de gris de l'image de biomasse ont été regroupés en quatre classes. L'estimé de la biomasse obtenu à partir de l'image aérienne (768 tonnes) était inférieur de 75 tonnes (9%) à l'estimé basé sur l'inventaire obtenu en plongée sous-marine (843 tonnes), biomasse calculée en interpolant entre les transects. L'erreur associée à chacun de ces estimés n'est pas mentionnée. De façon similaire, Lavoie et al. (1989) ont estimé la biomasse d'herbiers d'algues en milieu intertidal à Saint-Fabien-sur-Mer, Québec, à partir d'images multispectrales du capteur aéroporté MEIS-II. Après avoir calculé une relation entre les luminances de l'image et les relevés au sol, ils ont estimé la biomasse totale à 556 tonnes, avec une erreur moyenne de 50%.

3.0 METHODOLOGIE

3.1 Echantillonnage

3.1.1 Plan d'échantillonnage

Général. Le plan d'échantillonnage établi au départ avec le Centre Saint-Laurent prévoyait la récolte de plantes aquatiques submergées à 10 stations dans le lac dans des herbiers reflétant le plus possible un gradient de densité, de l'herbier le moins dense à celui contenant le maximum de biomasse par unité de surface lacustre, pour donner une estimation directe de la biomasse présente à chacune des 10 stations. A 40 autres stations, un relevé qualitatif devait être effectué sans collecte de plantes. Les stations échantillonnées sont indiquées à la fig. 2.1. Toutes ces données devaient servir à étalonner, en terme de biomasse végétale submergée, les images numériques obtenues par télédétection. Etant donné la résolution de ces images, les stations devaient avoir une superficie de 49 m² (7 mètres par 7 mètres) correspondant à la superficie d'un "pixel", unité de base des images de télédétection.

En plus d'avoir un gradient de densité d'herbiers dans le lac, de clairsemé à dense, pour avoir une vérité-terrain réaliste il est aussi important de respecter les particularités du terrain, c'est-à-dire la présence d'herbiers à composition floristique différente. Par exemple, les associations végétales entourant les îles de Sorel sont rapportées pour être différentes et plus denses que celles retrouvées en pleine eau du lac (Tessier et al., 1981, 1984). De la même façon, les différences de qualité de l'eau des tributaires des deux rives

du lac (rive nord=Bouclier Canadien; rive sud=Appalaches et Basses Terres du Saint-Laurent), et le mélange encore partiel des eaux provenant des Grands-Lacs et de la rivière des Outaouais dans le lac Saint-Pierre, peuvent amener des compositions floristiques différentes (Pageau et Lévesque, 1970). La qualité de l'eau et des sédiments exerce une influence non-négligeable sur la composition de la communauté végétale (espèces dominantes; densité; diversité) ainsi que sur le degré de contamination de ces plantes. Chaque type d'association devait donc être représenté.

Les 50 stations ont été réparties à l'aide des informations suivantes, qui ont pu donner une idée de la répartition de la végétation submergée du lac.

1. Le traitement et l'interprétation d'une image Landsat du lac Saint-Pierre datant de juillet 1989, qui ont permis de visualiser dans une certaine mesure la répartition des macrophytes atteignant la surface de l'eau. Adams et Gustafson (1977) et Denis Jacques Enr. (1986) ont proposé que de telles images doivent être obtenues avant la collecte de données au sol. Les différentes couleurs sur les images correspondent à des zones d'espèces différentes ou indiquent des différences dans la densité des herbiers. L'échantillonnage au sol doit alors se faire à l'intérieur de chaque région colorée d'intérêt, observée sur l'image aéroportée, pour qu'ensuite chacune de ces régions différemment colorées puisse être quantifiée.
2. Le survol du lac en hydravion en juillet 1990, qui a permis de visualiser les différentes masses d'eau ainsi que les herbiers denses qui arrivaient à la surface de l'eau.

3. Les données historiques de la littérature sur la répartition des différentes espèces de plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre.

Les mêmes stations d'échantillonnage devaient être visitées une première fois en été, près du maximum de biomasse saisonnier des macrophytes submergés, et une deuxième fois à l'automne, lors de la sénescence de ces plantes. A chaque station d'échantillonnage, deux briques fixées aux extrémités d'une corde de 7 mètres étaient descendues au fond de l'eau, servant de repère aux plongeurs pour la délimitation de la station. Pour faciliter le repérage de la station au mois d'octobre, une bouée était laissée sur le site lors de la première visite du mois d'août. Au mois d'octobre, des vents violents accompagnés de grosses vagues et du brouillard ont à plus d'une occasion nuit à l'échantillonnage.

Le plan d'échantillonnage ne visait que les plantes aquatiques submergées; les plantes flottantes ou émergentes n'ont pas été étudiées. La récolte des plantes sur le terrain a été réalisée par des plongeurs en scaphandre autonome. Cette technique de collecte est supérieure aux échantillonneurs mécaniques pour l'estimation de la biomasse des plantes submergées (Adams et Gustafson, 1977; Downing et Anderson, 1985).

La partie sud du lac comprend une zone de tir du Ministère de la Défense nationale. Ce territoire ne pouvait être visité de façon sécuritaire que pendant des périodes limitées (ex.: les fins de semaine où généralement il n'y avait pas de tirs). De plus, vu la présence possible d'obus dans le fond du lac, l'échantillonnage y était fait de manière très prudente. Ces

précautions nécessaires ont quelque peu ralenti l'échantillonnage dans cette partie du lac où seulement une partie des stations prévues ont pu être visitée.

Métaux. Les stations choisies pour y effectuer le dosage des métaux traces dans les plantes devaient être à la fois (i) dispersées pour représenter l'ensemble du lac et (ii) localisées dans un gradient de contamination des sédiments, de moins contaminé à plus contaminé, selon Hardy et al. (1991) et Sérodes (1978).

Des plantes d'une même espèce, récoltées sur toute la grandeur de la station avec des gants pour éviter toute contamination, étaient ramenées au bateau, placées dans des sacs, au froid, et acheminées quotidiennement au laboratoire. Des échantillons composites étaient alors analysés pour les métaux suivants: Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn ainsi que pour le Ca. A deux stations d'échantillonnage (16 et 50), des plantes ont été récoltées séparément dans 5 quadrats, pour être analysées séparément afin d'évaluer la variabilité intra-site, soit la variabilité des concentrations de métaux chez les plantes à l'intérieur d'une station donnée.

3.1.2 Positionnement des stations

L'aspect positionnement a été particulièrement important dans ce projet car les stations échantillonnées devaient être très précisément localisées sur les images de télédétection.

Le Centre Saint-Laurent effectuait le positionnement. La localisation de chaque station était obtenue à l'aide d'un

système de positionnement Mini-Ranger Falcon 484 et Falcon IV Navigator, associé à un émetteur/récepteur à micro-ondes à bord du bateau qui recevait les signaux émis par un réseau d'émetteurs/ récepteurs de la Garde Côtière Canadienne placés sur les rives du lac Saint-Pierre. La précision théorique de cet appareil de radio-localisation est de l'ordre de ± 2 mètres. A chaque station, des distances étaient données en mètres par rapport à quatre balises permanentes situées autour du lac (annexe 1).

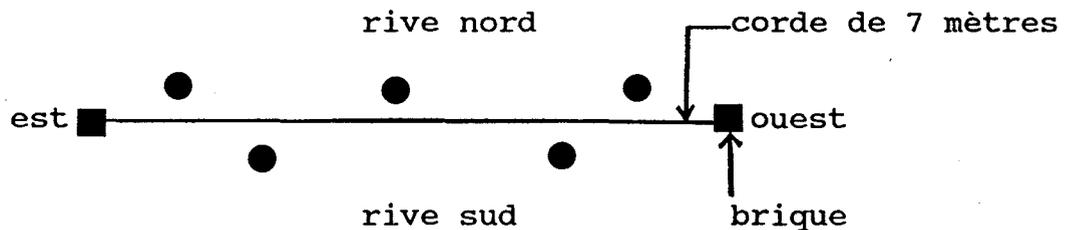
Sur le terrain, le capitaine du bateau essayait de se rapprocher le plus possible du point indiqué sur la carte par repérage visuel (phares, forme du rivage...). Une fois le bateau ancré dans les environs du site à échantillonner, les distances entre la station d'échantillonnage et les quatre balises permanentes de la Garde Côtière Canadienne étaient mesurées précisément à l'aide du système de positionnement. Ces distances ont ensuite été traduites en coordonnées "UTM" (Universal Transverse Mercator) par la Garde Côtière Canadienne à Sorel. Notons que ce système de positionnement était inopérant dans le secteur des îles de Sorel. Le positionnement des stations dans cette partie du lac était obtenu par rapport à des points de repère sur la rive.

Lors de l'échantillonnage du mois d'octobre, probablement dû aux mauvaises conditions sur le lac (froid, humidité élevée, vent...), la réception de certaines balises était souvent mauvaise ou absente. Ainsi, aux stations 3, 5; 9, 10 et 44, une seule distance était reçue, ce qui n'est évidemment pas suffisant pour mener à un site exact. Aux stations 11, 14 et 15, deux signaux provenant des deux balises situées sur la rive nord du lac étaient reçus. La station pouvait donc être située sur un axe est-ouest, mais pas sur l'axe nord-sud. Enfin, aux stations 1, 2 et 31, l'appareil ne fonctionnait pas du tout.

3.2 Estimation de la biomasse des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre

3.2.1 Relevés quantitatifs de la biomasse

Aux stations retenues pour y effectuer des relevés quantitatifs, les plantes étaient récoltées à l'intérieur de superficies délimitées. Des quadrats (généralement 5) étaient placés sur le site de manière pré-déterminée, de part et d'autre de la corde représentative de la station.



Les quadrats utilisés avaient une superficie de $0,1 \text{ m}^2$ ou de $0,25 \text{ m}^2$, dimensions couramment utilisées pour de tels relevés (Adams et Gustafson, 1977; Downing et Anderson, 1985; Duarte, 1987; Vicars, 1976) et la biomasse était estimée dans un mètre carré. Downing et Anderson (1985) ont constaté que des quadrats de cette superficie donnaient autant que les quadrats de 1 m^2 de bonnes approximations de la biomasse des plantes aquatiques, tout en épargnant sur le temps de récolte et de manipulation des plantes. Généralement, lors de l'échantillonnage du mois d'août, les quadrats de $0,25 \text{ m}^2$ étaient utilisés dans les herbiers peu denses, et les quadrats de $0,1 \text{ m}^2$ dans les herbiers denses. La grandeur des quadrats à utiliser à chaque station était déterminée sur le terrain avec les plongeurs en scaphandre autonome, en fonction de la densité

de l'herbier. Pour délimiter les quadrats, des bordures de pelouse plastifiées étaient utilisées, préalablement coupées pour donner, lorsque placées en un rond au fond de l'eau, la superficie voulue. Le biais encouru par l'emploi de clôtures de plastique flexibles est faible, les plongeurs ayant pris soin de toujours bien placer les clôtures en un cercle. Au mois d'octobre, à cause de conditions difficiles de travail, la collecte des plantes s'est souvent limitée à 4 quadrats de 0,1 m² chacun.

Toutes les plantes présentes dans les quadrats étaient récoltées à la main et mises dans des filets par les plongeurs. Dans le bateau, les plantes étaient placées dans différents sacs clairement identifiés, mises au froid dans une glacière et acheminées quotidiennement au laboratoire.

3.2.2 Relevés semi-quantitatifs de la biomasse

A toutes les stations d'échantillonnage, un estimé de la couverture végétale dans la station de 49 m² était fait à l'aide d'indices de densité qui chiffrent celle-ci de pauvre à très dense (Dushenko et al., 1988). Les espèces de plantes présentes étaient notées.

A certaines stations retenues pour y faire un relevé semi-quantitatif, les plantes étaient **comptées** dans des quadrats de même dimensions et installés de façon similaire qu'aux sites où les plantes étaient récoltées. La conversion de densité de plantes (plantes/m²) en biomasse végétale (g/m²) a déjà été rapportée dans la littérature: Adams et Gustafson (1977) et Gustafson et Adams (1973) pour le myriophylle; Tessier et al. (1984) pour toutes les espèces présentes confondues et Vicars

<u>Code</u>	<u>Densité</u>	<u>Remarque</u>
0	absence de végétation	
1	végétation peu abondante	plantes occasionnelles
2	végétation modérée	herbiers apparaissant en touffes régulières
3	végétation dense	grands herbiers, mais bien en-dessous de la surface de l'eau
4	végétation très dense	grands herbiers atteignant la surface de l'eau et qui présentent des difficultés pour la navigation

(1976) qui a dérivé un facteur de poids sec organique/100 plantes pour différentes espèces, dont la vallisnérie. Pour tester cette possibilité dans le lac Saint-Pierre, à quelques sites "quantitatifs", où les plantes avaient été récoltées et pesées, les espèces revenant le plus fréquemment dans le lac, soit la vallisnérie et le potamot de richardson, étaient comptées et pesées séparément des autres plantes. Ces stations étaient choisies pour que le nombre de plantes par quadrat donne une échelle intéressante (ex.: de peu de vallisnéries à beaucoup de vallisnéries). Les plantes n'ont pas été comptées partout car ce travail était difficile à effectuer où le courant était fort.

Lors de l'échantillonnage du mois d'octobre, les plongeurs n'ont pu à plusieurs sites donner un aperçu global de la

répartition et de la densité des plantes dans toute la station (7m X 7m) à cause de la faible visibilité au fond de l'eau et de l'état avancé de décomposition d'une très grande partie des macrophytes. Cette forte turbidité a aussi empêché les plongeurs de compter les plantes dans les quadrats; ils ont donc récoltés celles-ci à tous les sites, lorsque présentes.

3.2.3 Déterminations de biomasse

Au laboratoire, les plantes récoltées à chaque station, dans chaque quadrat, étaient triées par espèce et identifiées. Les parties vertes et souterraines étaient séparées; seule la biomasse des parties vertes est quantifiable par télédétection. Les plantes étaient lavées à l'eau du robinet pour enlever le matériel faiblement associé aux surfaces végétales (ex.: sédiments fins, périphyton). Etant donné les grandes quantités de plantes à faire sécher et le volume restreint des étuves, les plantes étaient d'abord placées dans un grand séchoir ventilé, puis ensuite dans une étuve à 70°C pendant 24 heures. Les plantes séchées étaient finalement pesées et leur biomasse exprimée en grammes de matière sèche, par espèce et par quadrat.

3.3 Estimation de la quantité de contaminants dans les macrophytes submergés du lac Saint-Pierre.

3.3.1 Préparation des échantillons

Au laboratoire, les plantes récoltées pour l'analyse des contaminants étaient soigneusement lavées avec de l'eau déionisée et séchées dans une étuve ventilée à 70°C pendant 24 heures. Des échantillons composites par station d'échantillonnage étaient préparés par espèce et pour les

parties vertes et souterraines. Les tissus étaient broyés avec de l'azote liquide jusqu'à l'obtention d'une poudre. Cette poudre était ensuite digérée avec de l'acide nitrique concentré (HNO_3 , Aristar) dans des bombes de Teflon^R, au four à micro-ondes. Toute la vaisselle utilisée pour faire les analyses avait d'abord trempée dans de l'acide nitrique 15% pendant 24 heures, et avait été rincée à l'eau déionisée.

3.3.2 Dosage des métaux

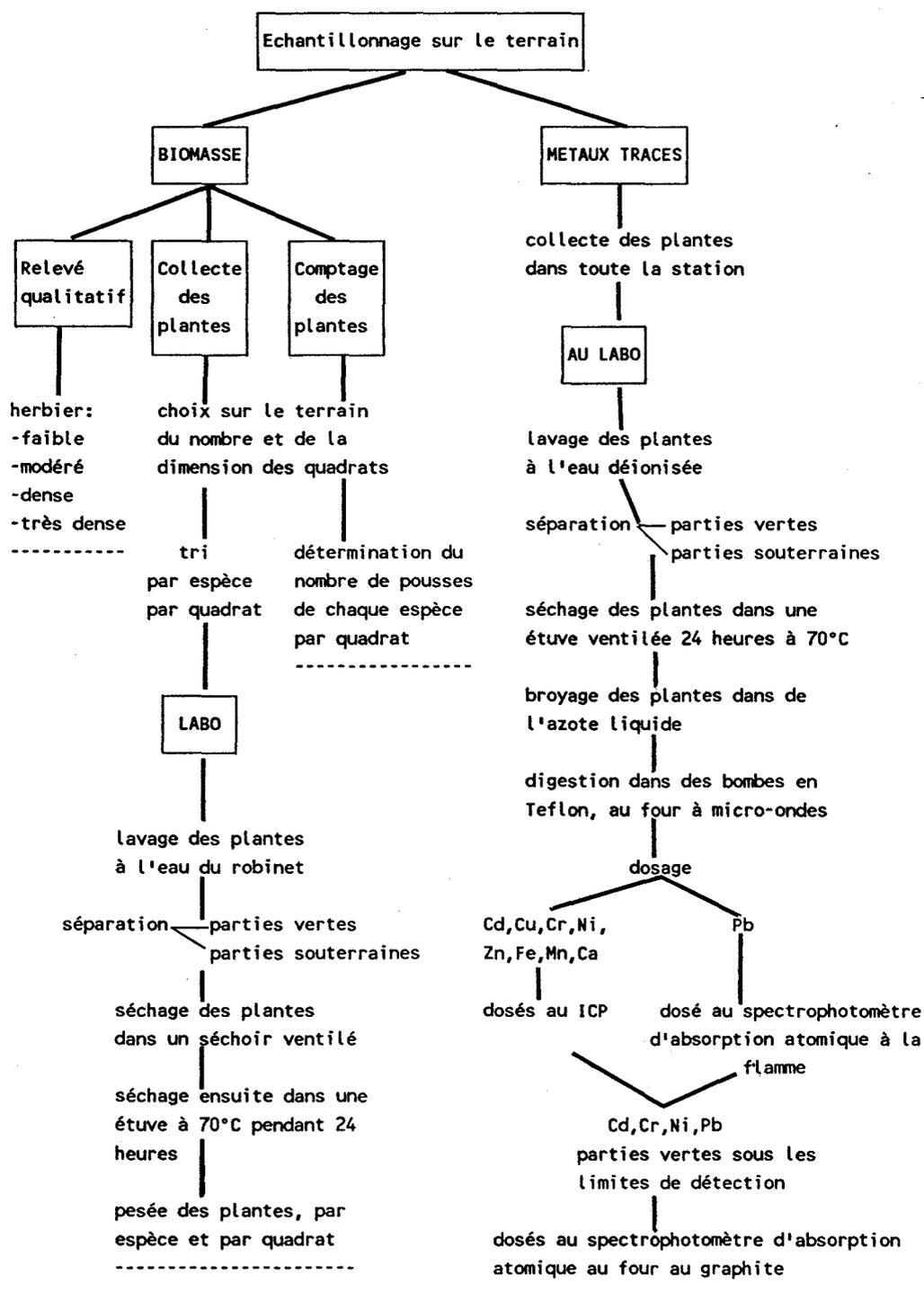
Le digestat était dosé pour le Ca, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni et Zn à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (ICP-AES); le dosage du Pb s'effectuait au spectrophotomètre d'absorption atomique à la flamme. Les échantillons donnant des valeurs de Cd, Cr, Ni et Pb sous les limites de détection de ces deux appareils étaient ensuite redosés au spectrophotomètre d'absorption atomique au four au graphite; cette étape analytique supplémentaire n'a été effectuée que pour les tissus des parties vertes des plantes récoltées au mois d'août.

3.3.3 Contrôle de la qualité des analyses

Des échantillons témoins (blancs) ainsi que des étalons standards ayant des valeurs certifiées pour les métaux d'intérêt ont été analysés sur une base régulière pour s'assurer de la précision et de l'exactitude des résultats analytiques. Les échantillons certifiés provenaient du National Institute of Standards and Technology (Orchard leaves 1571 [pommier] et Citrus leaves 1572) et du Conseil national de la Recherche du Canada (hépatopancreas d'homard Tort-1).

La fig. 3.1 résume les étapes d'échantillonnage et de traitement analytique.

Figure 3.1: Schéma des étapes d'échantillonnage et de traitement analytique (août 1990).



3.4 Extrapolation des données ponctuelles (stations individuelles) à des bilans massiques pour l'ensemble du lac Saint-Pierre.

3.4.1 Biomasse des macrophytes submergés

Afin d'effectuer la cartographie quantitative des plantes aquatiques submergées pour l'ensemble du lac Saint-Pierre, le Centre Saint-Laurent a utilisé des images multispectrales aéroportées, prises à l'aide du capteur MEIS-II, pour en extraire les valeurs de biomasse (à l'aide des données de terrain), avec les superficies correspondantes. Le Centre Saint-Laurent a confié le traitement de ces images quant à la biomasse végétale submergée au CARTEL, de l'Université de Sherbrooke (Lavoie *et al.*, 1991).

Des images aéroportées ont été obtenues à trois dates différentes, avec quatre lignes de vol effectuées le 26 juillet 1990, une ligne de vol le 21 août 1990 et trois lignes de vol effectuées le 20 octobre 1990. Il était évidemment essentiel de synchroniser dans le temps la prise des images aéroportées et les mesures sur le terrain (les campagnes d'échantillonnage au sol avaient été prévues du 30 juillet au 17 août 1990, et du 15 octobre au 2 novembre 1990). L'altitude à laquelle les vols ont été effectués donne une résolution au sol de 7 mètres, ce qui a été considéré lors de l'évaluation de la biomasse sur le terrain.

Une régression a été calculée entre l'image et la densité de végétation mesurée au sol. L'équation de la meilleure régression a été retenue pour étalonner l'image avec des données au sol. Un masque a été généré pour enlever des images la végétation terrestre et émergente, de même que les zones de

recouvrement entre les lignes de vol d'une même date, pour éviter une surestimation de la biomasse (Lavoie et al., 1991).

Les images aéroportées devaient être étalonnées à l'aide des valeurs de biomasse estimées sur le terrain. La précision de la localisation des stations d'échantillonnage sur ces images était donc très importante. Pour diminuer les erreurs engendrées par un mauvais positionnement et pour avoir une valeur plus représentative de la vraie valeur ponctuelle au sol, Lavoie et al. (1991) ont calculé une moyenne des valeurs de biomasse issues d'une fenêtre de 3 X 3 pixels autour de chacun des sites d'échantillonnage, chaque pixel ayant une superficie de 49 m². Au départ, toutes les stations (27) où un estimé de biomasse totale du site sur le terrain était disponible ont été retenues. Ensuite, les stations situées dans les îles de Sorel (#45, 46, 48 et 49) de même que les stations 5 et 28 situées dans le lac ont été retirées de l'analyse statistique à cause de leurs valeurs de réflectance qui n'étaient pas en accord avec celles des autres stations (Lavoie et al., 1991).

La biomasse moyenne obtenue à l'échelle du lac est de 3,35 kg/pixel, avec les limites inférieures et supérieures de 2,35 et 4,65 kg/pixel. Les écarts étant de 30% et de 39% de part et d'autre de la moyenne, l'intervalle de confiance appliquée au tonnage estimé pour l'ensemble du lac Saint-Pierre sera donc de 39% autour de la moyenne, l'écart le plus élevé étant retenu (Lavoie et al., 1991). A l'échelle du lac Saint-Pierre, la densité moyenne calculée en été est de 97 tonnes/km², pour une quantité totale dans le lac de 26,540 tonnes de plantes aquatiques submergées en juillet. Ces données constituent une valeur de biomasse globale, sans égard à l'espèce (Lavoie et al., 1991).

Pour la représentation spatiale de la biomasse des macrophytes du lac Saint-Pierre, un découpage en 5 classes de biomasse a été effectué, avec des valeurs minimales et maximales réalistes du terrain, soit de 0 et 36 kg/pixel. Ces valeurs de biomasse par pixel serviront à calculer des valeurs de biomasse par région de 4 km X 4 km qui seront utilisées pour l'évaluation du contenu total de métaux traces dans les plantes aquatiques submergées du lac. Tous les détails relatifs à l'évaluation de la biomasse végétale submergée du lac Saint-Pierre par télédétection se trouvent dans le rapport du CARTEL (Lavoie et al., 1991).

3.4.2 Quantités de contaminants.

Pour estimer les quantités de divers contaminants dans les plantes aquatiques du lac Saint-Pierre, nous disposons de données de biomasse (valeurs obtenues par télédétection et réparties systématiquement sur la superficie du lac étudié) et des valeurs de concentration des contaminants dans cette biomasse (valeurs discrètes et erratiques, par espèce et par site d'échantillonnage). L'intégration de ces deux types de données a fait appel à une technique couramment utilisée en géostatistique, soit le krigeage ordinaire, afin d'évaluer la biomasse et les quantités de contaminants associées sur une grille commune et régulière recouvrant le lac. Cette analyse ne s'est faite que pour les parties vertes des plantes au mois d'août, pour lesquelles des valeurs de biomasse à l'échelle du lac étaient disponibles.

Le secteur des îles de Sorel a du être retiré de l'analyse géostatistique. Des valeurs extrêmes de biomasse (basse et élevée) y sont retrouvées sur le terrain, si comparées aux valeurs obtenues dans le lac lui-même, mais il n'y avait que 4

données de biomasse associées à des concentrations métalliques. Par ailleurs, il s'agit d'un territoire difficile à cerner par télédétection étant donné que l'eau s'y retrouve dans des chenaux étroits entre des îles; nous n'avons pas d'estimation de la biomasse des plantes aquatiques de ce secteur par télédétection.

Le lac lui-même a été divisé en 16 unités de surface de 4 km X 4 km, délimitant ainsi la zone d'estimation. On y retrouve 25 données de biomasse de fond dont 17 ont des concentrations associées pour les neuf métaux analysés. Les 17 quantités de métaux correspondantes sont obtenues en faisant le produit de la biomasse par la concentration pour chaque métal traité. On dispose également de 403 données de biomasse obtenues par télédétection dont 242 sont situées à l'intérieur de la zone d'estimation.

Dans un premier temps, on a réalisé l'estimation locale des 16 unités de 4 km X 4 km par krigeage ordinaire. On a estimé tout d'abord la biomasse à partir de l'ensemble des valeurs de télédétection, puis on a krigé les quantités de métaux à partir des 17 données de fond disponibles pour chacun des 9 métaux traités. La technique de krigeage étant basée sur une évaluation de la structure de variabilité spatiale des phénomènes étudiés, elle a permis à la fois de minimiser et de quantifier le niveau d'incertitude associé à la valeur estimée de chaque unité de 4 km X 4 km pour chaque variable traitée. Deuxièmement, on a procédé à l'estimation globale (sur l'ensemble des 16 unités de 4 km X 4 km) en regroupant les résultats d'estimation locale obtenus pour la biomasse et les quantités de métaux. Encore une fois, les niveaux d'incertitude associés à ces valeurs estimées globales ont été quantifiés. Les détails de l'approche géostatistique se retrouvent en annexe du présent rapport (annexe 8).

4.0 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Végétation submergée du lac Saint-Pierre

La localisation des stations visitées au lac Saint-Pierre en août et en octobre 1990 est présentée à la fig. 2.1, alors que les espèces de plantes aquatiques submergées dominantes sont indiquées dans la fig. 4.1 pour toutes les stations visitées au mois d'août 1990. La plante dominante du lac Saint-Pierre est sans conteste la vallisnérie américaine (Vallisneria americana Michaux). C'est également la plante aquatique submergée dominante des autres lacs fluviaux du Saint-Laurent (Gravel et Pageau, 1976; Lamoureux et Le Sauter, 1982). Elle forme un tapis de longues feuilles rubannées dans le fond du lac. Sauf dans les endroits peu profonds (<1 m), les feuilles de la vallisnérie n'atteignent pas la surface de l'eau. La vallisnérie se révèle une espèce relativement indifférente à la couleur de l'eau, à la profondeur, à la vitesse du courant ainsi qu'au type de substrat (Grondin et al., 1983). Elle se retrouve comme seule espèce, ou avec le Nitella (une algue), de part et d'autres de la voie maritime de même que près des chenaux nord et sud où le courant est fort et le substrat est dur (ex.: stations 11, 19, 33 et 37) ainsi qu'aux sites où le substrat est principalement composé de sable (ex.: stations 2 et 3). Elle fut trouvée dans 80% de tous les quadrats contenant de la végétation échantillonnés au mois d'août 1990, soit comme seule espèce (39% des quadrats) ou en association avec d'autres espèces (41%) (tableau 4.1). L'espèce accompagnatrice la plus fréquente de la vallisnérie dans le lac Saint-Pierre est le potamot de richardson (Potamogeton richardsonii (A. Bennett) Rydb.), suivie de l'hétéranthère litigieuse (Heteranthera dubia (Jacq.) MacM.).

Figure 4.1: Espèces de plantes aquatiques submergées dominantes par station visitée au cours de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1.

V = Vallisneria americana
P = Potamogeton richardsonii
Pp = Potamogeton pectinatus
N = Nitella
A = Algues filamenteuses
H = Heteranthera dubia
E = Elodea canadensis
M = Myriophyllum spicatum
- = pas de plante submergée

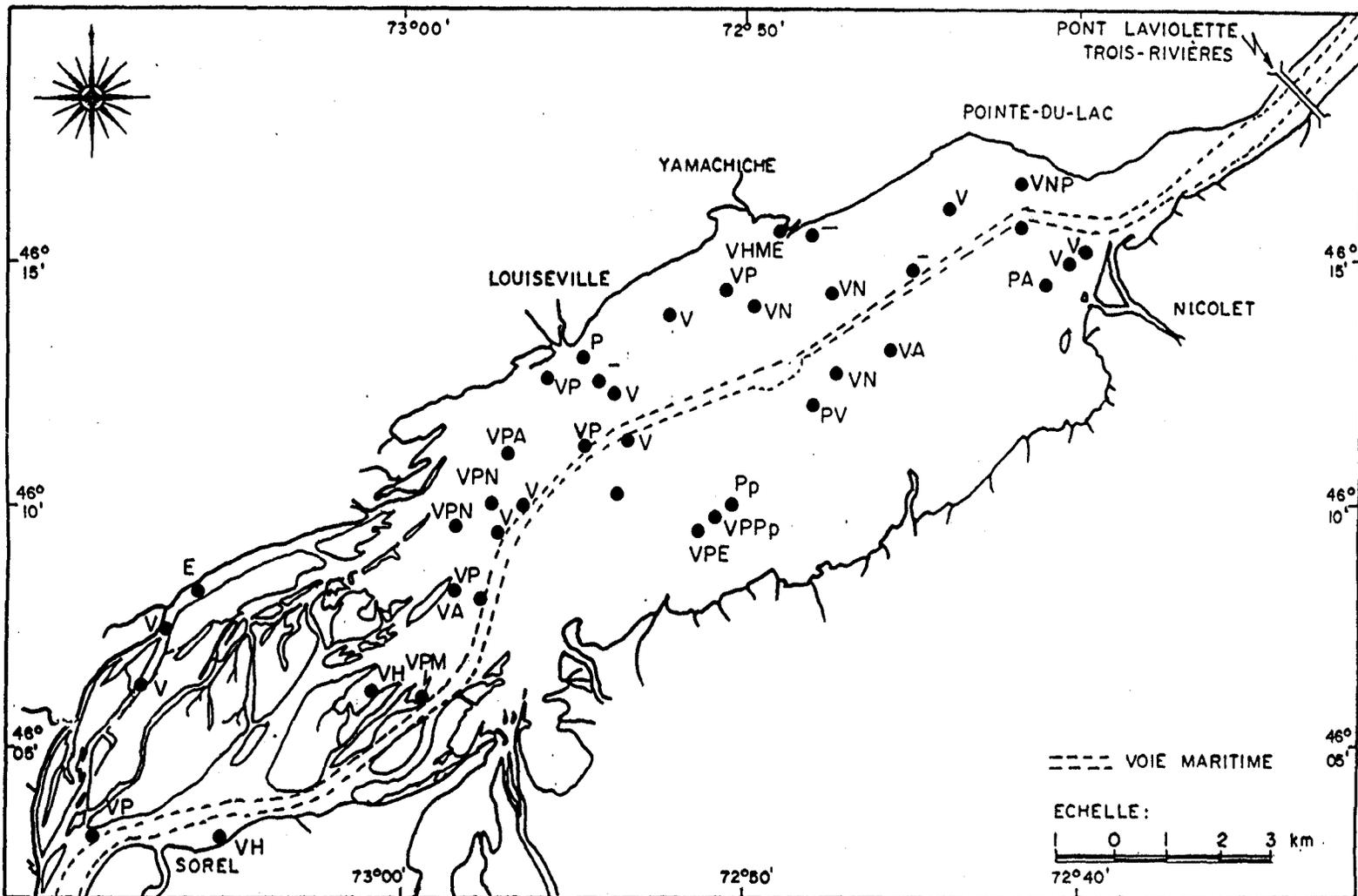


Tableau 4.1: Nombre total et fréquence (%) de la présence d'associations d'espèces de plantes submergées aux stations d'échantillonnage du lac Saint-Pierre, août 1990.

Espèces*	Nombre de quadrats	% du nombre total de quadrats contenant de la végétation
Va seulement	56	39,4%
Pr seulement	5	3,5%
Pp seulement	4	2,8%
Ec seulement	4	2,8%
Ni seulement	2	1,4%
Hd seulement	1	0,7%
Ag seulement	1	0,7%
Va et Pr	11	7,8%
Va et Hd	7	4,9%
Va et Ni	5	3,5%
Va et Af	5	3,5%
Pr et Af	4	2,8%
Va et Ec	1	0,7%
Va et Ms	1	0,7%
Pr et Ni	1	0,7%
Hd et Af	1	0,7%
Va, Pr et Ni	4	2,8%
Va, Pr et Af	3	2,1%
Va, Pr et Ms	3	2,1%
Pr, Hd et Af	3	2,1%
Va, Pr et Cd	1	0,7%
Va, Hd et Af	1	0,7%
Va, Hd et Ms	1	0,7%
Va, Hd et Ec	1	0,7%
Va, Ms et Ec	1	0,7%
Va, Ec et Ni	1	0,7%
Va, Pr, Ni et Ms	2	1,4%
Va, Ni, Ec et Ms	2	1,4%
Va, Pr, Af et Cd	1	0,7%
Va, Pr, Ms et Ec	1	0,7%
Va, Pr, Ni et Na	1	0,7%
Va, Ec, Ni et Cd	1	0,7%
Va, Pr, Af, Ms et Ec	1	0,7%
Va, Pr, Af, Cd et Na	1	0,7%
Va, Pr, Hd, Ec et Ms	1	0,7%
Va, Ni, Hd, Ms et Ec	1	0,7%
Va, Pr, Pp, Pc et Hd	1	0,7%
Pr, Ec, Ms, Cd et Na	1	0,7%

Nombre total de quadrats contenant de la végétation.....142

Nombre total de quadrats sans végétation..... 3

Nombre total de quadrats.....145

* Voir le tableau 4.4 pour la légende d'abréviations des espèces végétales.

Le potamot de richardson est la seconde espèce en importance dans le lac. Il forme des herbiers denses à très denses dans les bordures nord-ouest et sud-ouest du lac et près des îles de Sorel. Cette espèce semble dominer là où le courant est moins fort et le substrat moins dur, plus vaseux. Dans le sud-ouest du lac, le potamot pectiné (Potamogeton pectinatus L.) forme également des herbiers denses. Les tiges des potamots atteignent souvent la surface de l'eau.

Les plantes sont évidemment absentes de la voie maritime de même que de deux chenaux bordant le chenal de navigation au nord et au sud. Comme déjà mentionné, près de ces chenaux, où les courants sont plus rapides, se trouvent de grands tapis de Nitella, une algue macroscopique, ou des herbiers monospécifiques peu denses à vallisnéries. Quant aux algues filamenteuses, elles se présentent comme de gros nuages verts dans l'eau, particulièrement le long de la rive sud du lac et dans les baies des îles de Sorel.

Les autres plantes submergées retrouvées dans le lac sont l'hétéranthère litigieuse, une espèce de sous-étage qui voisine souvent la vallisnérie; l'élodée du Canada (Elodea canadensis Michx) et le myriophylle en épi (Myriophyllum spicatum L.) qui forment des herbiers très denses en bordure des îles de Sorel; l'alisma graminioïde (Alisma gramineum Gmelin), la cornifle nageante (Ceratophyllum demersum L.), le potamot crispé (Potamogeton crispus L.) et le naïas souple (Najas flexilis (Willd.) Rostk. & Schmidt), ce dernier rencontré dans les tapis de Nitella.

L'identification des plantes aquatiques suit la flore Laurentienne de Marie-Victorin (1964), sauf pour Nitella (Fassett, 1966) et pour le myriophylle (Aiken et al., 1979).

La vallisnérie, qui couvre le fond du lac, est reconnue comme une plante aquatique submergée bénéfique pour les écosystèmes aquatiques; elle ne provoque pas de détérioration de la qualité de l'eau, elle soutient une grande productivité biologique en offrant des sites d'attache à une myriade de micro-organismes et en servant comme abri aux jeunes poissons (Sutton, 1991).

Il faut toutefois noter la présence, au sud-ouest du lac, d'herbiers denses à Potamogeton pectinatus (stations #21 et 26) qui est un représentant typique de milieux eutrophes (Dykyjova et al., 1985; Seddon, 1967). Dans une étude d'une série de lacs ayant des états nutritionnels différents, Jones et Cullimore (1973) rapportent que le Potamogeton pectinatus était de plus en plus abondant lorsque la concentration totale de phosphate dans l'eau s'élevait de 0,1 à 0,6 mg PO₄/L, alors que le Potamogeton richardsonii montrait une tendance inverse, c'est-à-dire qu'il dominait dans les eaux avec 0,1 mg PO₄/L mais marquait un déclin progressif lorsque les niveaux de phosphate dans l'eau s'élevaient jusqu'à 0,7 mg PO₄/L. Cette section du lac pourrait être affectée par les eaux du Richelieu qui amèneraient un apport excessif en éléments nutritifs (ex.: le phosphore) dans des conditions physiques du lac par ailleurs propices à la croissance des macrophytes.

4.2 Biomasse végétale du mois d'août

4.2.1 Résultats de la campagne d'échantillonnage

La campagne d'échantillonnage sur le terrain s'est déroulée du 30 juillet au 17 août 1990. Trente-neuf (39) stations ont pu être visitées (fig. 2.1; annexe 2), sur les 50

initialement prévues. Ces stations sont réparties sur tout le lac et le secteur des îles de Sorel, et représentent différentes densités d'herbiers et plusieurs types d'associations végétales. Plusieurs des stations non visitées sont situées dans la partie sud du lac. Les résultats détaillés obtenus à chaque station d'échantillonnage sont présentés dans le rapport d'étape no 1 (St-Cyr et Campbell, 1991a) ainsi qu'en annexe au présent rapport (annexe 3). Au tableau 4.2 se trouve une synthèse du travail effectué à chaque station d'échantillonnage.

Pour améliorer l'évaluation quantitative de la biomasse, des plantes furent **récoltées** à 17 stations plutôt qu'à 10 comme initialement prévu. Par ailleurs, les plantes ont été **comptées** dans des quadrats à 15 stations. Le bilan de l'échantillonnage du mois d'août s'établit donc ainsi:

- 17 stations où les plantes ont été récoltées dans des quadrats pour détermination de leur poids sec (stations #1, 9, 11, 13, 14, 19, 21, 22, 28, 31, 40, 41, 44, 46, 47, 48 et 49);
- 15 stations où les plantes ont été comptées dans des quadrats (stations #2, 3, 5, 10, 15, 16, 17, 18, 26, 27, 30, 32, 36, 45 et 50);
- 7 stations où n'a été effectué qu'un relevé qualitatif de la biomasse (dont 4 où il n'y avait aucune plante aquatique submergée) (stations #4, 6, 7, 23, 24, 33 et 37).

TOTAL: 39

Tableau 4.2: Tableau synthèse de la liste des stations d'échantillonnage visitées au lac Saint-Pierre en août 1990 et du type de travail effectué.

Station	Travail effectué sur le terrain				
	Relevé qualitatif	Collecte/comptage des plantes pour la biomasse	Nombre de quadrats	Dimension des quadrats	Collecte de plantes pour métaux traces
1	+	collecte comptage	4	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>Nitella</u> <u>P. richardsonii</u>
			2	0,1 m ²	
2	+	comptage	4	0,25 m ²	<u>V. americana</u>
3	+	comptage	5	0,1 m ²	-
4	+	-	-	-	-
5	+	comptage	5	0,25 m ²	-
6	+	-	-	-	-
7	+	-	-	-	-
9	+	collecte	5	0,1 m ²	-
10	+	comptage	5	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. richardsonii</u>
11	+	collecte	2	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>Nitella</u>
13	+	collecte	5	0,25 m ²	<u>V. americana</u> <u>H. dubia</u> algues filamenteuses
14	+	collecte	5	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. richardsonii</u>
15	+	comptage	5	0,1 m ²	-
16	+	comptage	5	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>Nitella</u>
17	+	comptage	1	0,25 m ²	-
			2	0,1 m ²	
18	+	comptage	5	0,1 m ²	-
19	+	collecte	5	0,25 m ²	<u>V. americana</u>
21	+	collecte	4	0,1 m ²	-
22	+	collecte	5	0,25 m ²	-
23	+	-	-	-	-
24	+	-	-	-	-

Tableau 4.2 (suite)

Station	Travail effectué sur le terrain				
	Relevé qualitatif	Collecte/comptage des plantes pour la biomasse	Nombre de quadrats	Dimension des quadrats	Collecte de plantes pour métaux traces
26	+	comptage	4	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. pectinatus</u>
27	+	comptage	4	0,1 m ²	-
28	+	collecte	5	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. richardsonii</u>
30	+	comptage	5	0,25 m ²	-
31	+	collecte	5	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. richardsonii</u> algues filamenteuses
32	+	comptage	5	0,25 m ²	-
33	+	-	-	-	-
36	+	comptage	5	0,1 m ²	-
37	+	-	-	-	-
40	+	collecte	4	0,1 m ²	<u>V. americana</u> algues filamenteuses
41	+	collecte	4	0,1 m ²	-
44	+	collecte	4	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. richardsonii</u> <u>M. spicatum</u>
45	+	comptage	5	0,25 m ²	<u>V. americana</u>
46	+	collecte	4	0,1 m ²	<u>E. canadensis</u>
47	+	collecte	4	0,25 m ²	<u>V. americana</u> <u>H. dubia</u>
48	+	collecte	4	0,1 m ²	<u>V. americana</u>
49	+	collecte	4	0,1 m ²	<u>V. americana</u>
50	+	comptage	5	0,1 m ²	<u>V. americana</u> <u>P. richardsonii</u>

4.2.2 Relation densité-biomasse

Les relations entre la densité de plantes et leur biomasse ont été étudiées pour deux plantes, la vallisnérie et le potamot de richardson. Pour la vallisnérie, cette relation est très bonne pour des rosettes récoltées à diverses stations dans le lac. Le coefficient de corrélation de Pearson entre le nombre de plantes et la biomasse sèche associée, après transformation logarithmique, est de 0,918, $p < 0,001$ (fig. 4.2), les distributions étant log-normales. Les données brutes sont présentées en annexe (annexe 4). La droite d'estimation a été calculée, ce qui permet une estimation de la biomasse sèche de la vallisnérie là où le nombre de rosettes a été compté par quadrat ($y = a + bx$, où $a =$ l'ordonnée à l'origine, soit -0,67, et $b =$ la pente, soit 1,28; $N=25$). Ainsi, aux stations où les plantes ont été comptées et que l'herbier était dominé par la vallisnérie (herbiers monospécifiques, stations #2, 3, 5, 15, 18 et 45), la biomasse des rosettes a pu être estimée. Cette information a été ajoutée aux données de biomasse obtenues directement (par pesée).

Une telle relation n'a cependant pu être obtenue avec le potamot de richardson, où le coefficient de corrélation entre le nombre de plantes et la masse sèche associée n'était pas statistiquement significatif ($r = 0,739$, $p > 0,05$, $N=6$). La morphologie même de cette plante dont la tige est très feuillée et très ramifiée (annexe 5) amène une grande variation de la biomasse d'une plante à l'autre. De plus, le potamot de richardson se retrouvait à moins de sites d'échantillonnage dans le lac que la vallisnérie, et donc l'échantillon statistique était plus restreint ($N=6$).

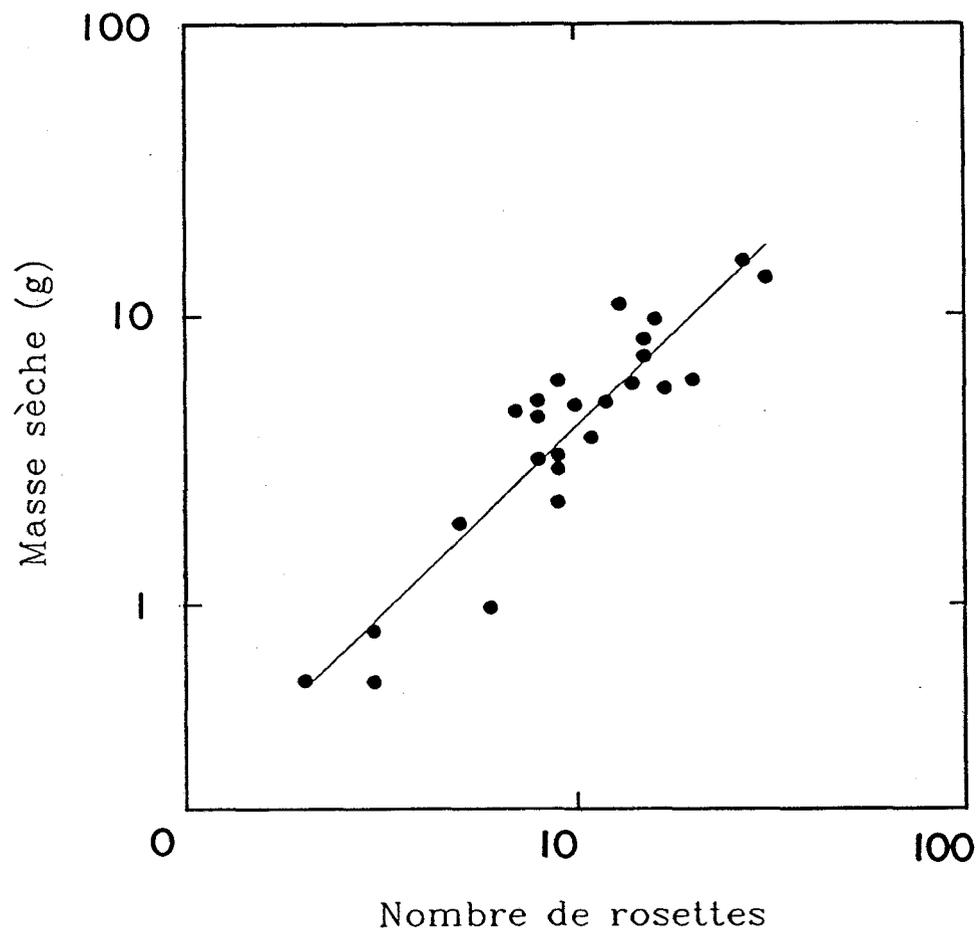


Figure 4.2: Diagramme de dispersion de la masse sèche (grammes) en fonction du nombre de rosettes de Vallisneria americana récoltées au mois d'août 1990 au lac Saint-Pierre. Les échelles sont logarithmiques. $r = 0,918$, $p < 0,001$; $y = -0,67 + 1,28x$; $N=25$

Les valeurs de biomasse par station sont indiquées au tableau 4.3, là où des données de biomasse furent obtenues. Il s'agit soit de valeurs obtenues directement (récolte/triage/séchage/pesée), soit de valeurs estimées à partir de la droite d'estimation pour la vallisnérie (herbiers monospécifiques).

4.2.3 Variabilité spatiale de la biomasse végétale

En excluant les stations où il n'y avait pas de plantes aquatiques, l'étendue des valeurs de biomasse moyenne par mètre carré par station varie de 2,6 grammes masse sèche/m² (station 45) à 734 grammes masse sèche/m² (station 46) (tableau 4.3). A partir de la biomasse moyenne par mètre carré, un estimé de la biomasse végétale submergée à chaque station de 49 m² a été calculé. Aux stations #11, 14 et 15, la répartition des espèces de plantes aquatiques submergées à l'intérieur du site a été prise en considération pour ce calcul.

Tessier et al. (1984), lors d'une étude sur la productivité littorale du lac Saint-Pierre, ont rapporté une biomasse moyenne (sèche) de 96 g/m² pour la vallisnérie, et une flore accompagnatrice qui atteignait une biomasse moyenne de 40 g/m², pour donner une biomasse totale moyenne de 136 g/m². Notre échantillonnage, qui s'étendait sur plus que seulement le rivage, a donné une biomasse moyenne par station de 0,4 g/m² (station 22) à 178 g/m² (station 50) pour la vallisnérie; 81% des stations ont une biomasse moyenne de vallisnérie de moins de 100 g/m². La biomasse des espèces accompagnatrices diffère selon leurs natures, variant de 0,2 g/m² (H. dubia - station 45) à 421 g/m² (P. richardsonii et M. spicatum - station 44) en moyenne par station. Les plus hautes valeurs de biomasse se rencontrent dans des herbiers dominés par P. richardsonii

Tableau 4.3: Moyenne de la biomasse (B, grammes de matière sèche/m²) avec l'écart-type de la moyenne (ainsi que l'incertitude qui affecte la moyenne), le coefficient de variation, l'estimé de la biomasse dans 49 m² ainsi qu'un indice de densité à chacune des stations du lac Saint-Pierre, en août 1990, où des données de biomasse furent obtenues (voir annexe 3).

Station	N	B (g/m ²) ± écart-type de la moyenne	Coefficient de variation	B (g/49 m ²)	Indice de densité
1	6	63,5 ± 21,4 (34%)	82,5%	3113	2
2	4	130,3 ± 1,6 (1%)	2,4%	6384	2
3	5	92,2 ± 14,5 (16%)	35,2%	4518	2
4	-	0	-	0	0
5	5	16,9 ± 3,8 (23%)	50,5%	829	2
6	-	0	-	0	0
7	-	0	-	0	0
9	5	96,0 ± 18,2 (19%)	42,4%	4706	2
11	2	108,1 ± 35,7 (33%)	Ni 46,7%	/37m ² 4000	
	5	74,3 ± 16,3 (22%)	Va 49,1%	/12m ² 892	
				4892	2
13	5	20,1 ± 3,4 (17%)	37,3%	987	2
14	3	113,5 ± 22,4 (20%)	Va 34,2%	/37m ² 4200	
	2	470,3 ± 83,1 (18%)	Pr 25,0%	/12m ² 5644	
				9844	3
15	2	108,1 ± 35,7 (33%)	Ni 46,7%	/16m ² 1730	
	5	74,3 ± 16,3 (22%)	Va 49,1%	/33m ² 2453	
				4183	2
18	5	77,4 ± 13,0 (17%)	37,6%	3794	2
19	5	36,4 ± 6,9 (19%)	42,2%	1785	2
21	4	107,4 ± 27,4 (26%)	51,0%	5261	3
22	5	137,1 ± 37,9 (28%)	61,7%	6720	3
23	-	0	-	0	0
28	5	305,0 ± 159,7 (52%)	117,1%	14944	4
31	5	189,9 ± 55,1 (29%)	64,8%	9303	3
40	4	186,5 ± 46,3 (25%)	49,6%	9138	3
41	4	203,3 ± 39,0 (19%)	38,3%	9964	3
44	4	460,2 ± 132,0 (29%)	57,3%	22552	4
45	5	2,6 ± 1,2 (46%)	106,4%	128	1
46	4	734,0 ± 94,2 (13%)	25,7%	35964	4
47	4	28,0 ± 5,7 (20%)	40,4%	1373	2
48	4	62,3 ± 12,3 (20%)	39,5%	3053	2
49	4	77,8 ± 61,5 (79%)	158,1%	3811	2

Note: Ni = Nitella; Pr = Potamogeton ; Va = Vallisneria richardsonii americana

(stations #14 et 28) de même que dans les îles de Sorel (stations #41, 44 et 46). Si le centre des chenaux entourant les îles sont plutôt pauvres en plantes aquatiques (stations #45 et 48), les bordures immédiates de myriophylles ou d'élodées (station 46) ainsi que les baies (stations #41 et 44) ont des valeurs de biomasse élevées. La biomasse dans l'herbier d'Elodea canadensis (station 46 - 734 g/m² en moyenne) est semblable à la valeur de 600 g/m² (poids sec) pour des herbiers de plantes submergées dans un lac enrichi en matière nutritive (Peeverly, 1985).

La variabilité intra-site de la biomasse (c'est-à-dire la variabilité inter-quadrat) est souvent très grande, tel que reflété par le coefficient de variation (tableau 4.3). L'hétérogénéité spatiale est une caractéristique propre aux herbiers aquatiques; de fortes variabilités ont été observées par nombre d'autres chercheurs lors de la collecte de plantes submergées (Anderson et Kalff, 1986; Downing et Anderson, 1985). Anderson et Kalff (1986) rapportent que de grands herbiers, où les plantes sont à une profondeur et soumises à une exposition (lumière, vagues...) similaires, montrent quand même une répartition hétérogène des espèces. L'écart-type de la moyenne donne un estimé de l'incertitude qui affecte la moyenne (tableau 4.3). Pour ce qui est de la biomasse des plantes aquatiques submergées, un niveau de précision autour de 20% de la moyenne est généralement accepté (Downing et Anderson, 1985; Vicars, 1976). Cette valeur est dépassée à plusieurs reprises dans le lac Saint-Pierre (5 cas sur 27 dépassent 30%; tableau 4.3). L'intervalle de confiance autour de la moyenne pour l'estimation de la biomasse des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre par télédétection a de ce fait été fixée à 39% (Lavoie et al., 1991). Quelques exemples serviront à illustrer les sources des variations rencontrées.

A la station #2 par exemple (annexe 3), où l'herbier est monospécifique et uniforme, la variation intra-site est faible et l'extrapolation de la biomasse à un site de 49 m² se fait aisément. A la station #28 (annexe 3), il y a une touffe dense de Potamogeton richardsonii dans un herbier de Vallisneria americana. La variation intra-site s'avère alors très forte (tableau 4.3). Dans les cinq quadrats ramassés, la biomasse de la vallisnérie reste relativement stable (de 11,3 g/0,1 m² à 19 g/0,1 m²), alors que dans le quadrat situé dans la touffe de Potamogeton, la biomasse obtenue est très supérieure (annexe 3). Récolter des plantes dans plus de quadrats aurait diminué cette variabilité; la biomasse par quadrat pour la vallisnérie serait probablement restée dans le même ordre de grandeur mais l'importance de la biomasse du potamot se serait atténuée par rapport au restant du site. La moyenne se serait alors rapprochée d'une valeur plus représentative du site, mais le coefficient de variation serait demeuré élevé. Le potamot de richardson a une biomasse par plante beaucoup plus importante que la vallisnérie et même lorsqu'il n'est pas l'espèce dominante d'une station, la biomasse qu'il représente peut être la plus importante. Le potamot, comme beaucoup d'autres espèces de plantes aquatiques, se reproduit végétativement et peut former des thalles distinctes. A des stations où de telles thalles sont présentes, l'extrapolation de 5 quadrats au site entier (49 m²) s'avère plus hasardeuse. Les quadrats étaient placés à chaque station de manière pré-déterminée, et non pas laissé au hasard des plongeurs, ce qui devrait contribuer à améliorer la fiabilité de l'extrapolation.

A la station #44 (annexe 3), des thalles de potamots, de vallisnéries et de myriophylles se voient les unes les autres, ce qui donne une variation élevée dans les valeurs de biomasse. Finalement, à la station #49, l'endroit est très

accidenté, donnant des quadrats vides et d'autres avec une biomasse végétale élevée. Les herbiers de macrophytes aquatiques sont par nature très variables et bien que la variance dans l'échantillonnage doive être réduite où c'est possible, cette variance demeure néanmoins un reflet réel de la nature du système (Dennis, 1984).

La proportion de biomasse sèche de chaque espèce de plantes par station est présentée au tableau 4.4, là où les données recueillies en permettent le calcul.

Dans le lac dans son ensemble, la biomasse des plantes submergées semble diminuer de l'amont vers l'aval. Ce gradient peut être associé avec la répartition du potamot, qui forme des herbiers denses à très denses au nord-ouest et sud-ouest du lac et près des îles de Sorel, alors que plus d'herbiers monospécifiques à vallisnéries, de biomasses moindres que les herbiers à potamots, se retrouvent à l'aval du lac. En amont du lac Saint-Pierre, la présence des îles de Sorel a une influence certaine sur la densité des herbiers. Les baies qui s'ouvrent vers le lac sont riches en plantes aquatiques. De même, la présence d'herbiers denses à potamots près des dernières îles qui composent le delta pourrait être une conséquence des phénomènes naturels d'érosion et de sédimentation. La partie des îles située en amont est la plus élevée et a tendance à subir l'érosion, tandis que la partie en aval s'incline doucement sous la nappe d'eau et correspond à une zone de sédimentation (Tessier et al., 1981) qui pourrait favoriser la prolifération d'herbiers aquatiques. Dans le lac, il y aurait également une transition de sédiments fins (limon) à des sédiments plus grossiers de l'amont vers l'aval (Hardy et al., 1991) où se trouverait une vaste étendue de fond sableux, moins favorable à l'établissement d'herbiers que des sédiments

Tableau 4.4: Proportion de la biomasse sèche (grammes) de chaque espèce de plantes aquatiques submergées aux stations du lac Saint-Pierre, en août 1990, où les données obtenues sur le terrain en permettent le calcul.

STATION	Va	Pr	Ni	Hd	Af	Pp	Ec	Ms	Autre *
1	43,0%	38,1%	16,3%	-	-	-	2,5%	-	0,1%
2	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
3	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
5	96,5%	-	-	3,5%	-	-	-	-	-
9	1,2%	54,6%	-	5,1%	39,1%	-	-	-	-
11	18,2%	-	81,8%	-	-	-	-	-	-
13	49,0%	-	-	7,7%	43,3%	-	-	-	-
14	44,5%	55,4%	-	-	-	-	-	-	0,1%
15	58,6%	-	41,4%	-	-	-	-	-	-
18	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
19	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
21	7,4%	1,6%	-	0,1%	-	90,8%	-	-	0,1%
22	0,3%	98,0%	-	-	0,9%	-	0,1%	0,1%	0,6%
24	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
28	45,4%	54,6%	-	-	-	-	-	-	-
31	31,0%	60,0%	-	-	8,0%	-	-	-	1,0%
33	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
37	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
40	69,2%	1,5%	-	-	24,3%	-	0,3%	4,7%	-
41	78,0%	22,0%	-	-	-	-	-	-	-
44	8,5%	70,0%	0,7%	-	-	-	-	20,8%	-
45	92,2%	-	-	7,8%	-	-	-	-	-
46	-	-	-	-	-	-	100,0%	-	-
47	74,7%	-	-	25,3%	-	-	-	-	-
48	100,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
49	66,9%	-	-	26,2%	-	-	-	-	6,9%

Va = Vallisneria americana

Pr = Potamogeton richardsonii

Ni = Nitella

Hd = Heteranthera dubia

Af = Algues filamenteuses

Pp = Potamogeton pectinatus

Ec = Elodea canadensis

Ms = Myriophyllum spicatum

Autres: Pc = Potamogeton crispus

Ag = Alisma gramineum

Na = Najas flexilis

Cd = Ceratophyllum demersum

plus fins. L'analyse en télédétection a de plus suggéré une densité plus élevée de macrophytes submergés au sud de la voie maritime, si comparée au nord du lac (Lavoie et al., 1991).

4.3 Biomasse végétale du mois d'octobre

4.3.1 Résultats de la campagne d'échantillonnage

La campagne de terrain a eu lieu du 15 octobre au 2 novembre 1990. Le plan d'échantillonnage était le même que celui suivi au mois d'août 1990 (fig. 2.1) et tous les sites ont été revisités, sauf ceux où l'absence de plantes avait déjà été notée, car à ces sites il n'y avait évidemment pas davantage de plantes au mois d'octobre. La station 35, située près de la sortie de la rivière Saint-François, a été ajoutée au plan d'échantillonnage; cette station n'avait pas été échantillonnée lors de la campagne du mois d'août.

En octobre, le niveau d'eau du lac était supérieur d'environ 60 à 80 cm par rapport au niveau du mois d'août. De plus, la visibilité dans l'eau avait grandement diminué; en octobre, l'eau était de turbide à très turbide (visibilité de moins de 15 cm, au fond de l'eau) à plusieurs stations où elle avait pourtant été très claire lors de la campagne d'échantillonnage du mois d'août (ex.: stations #1, 2, 5, 9, 10, 13, 22, 32 et 36).

Pour faciliter le repérage des stations, comme complément au système de positionnement, des bouées avaient été installées à tous les sites au mois d'août; ceci devait permettre un échantillonnage plus précis et aux mêmes stations que la campagne précédente. A seize (16) stations,

les bouées ont effectivement été retrouvées (tableau 4.5). Cependant, aux autres stations (19) nous n'avons retrouvé ni la bouée, ni la corde au fond de l'eau qui avait servi à délimiter la station au mois d'août. Les coordonnées obtenues aux sites #19, 21, 24, 27 et 50 étaient néanmoins très près de celles du mois d'août. Pour les stations #27, 28, 31 et 32, de nouvelles coordonnées "UTM" ont dû être calculées, de même que pour la nouvelle station #35 (annexe 2).

Les résultats détaillés de biomasse obtenus à chaque station d'échantillonnage sont présentés dans le rapport d'étape no 2 (St-Cyr et Campbell, 1991b), ainsi qu'en annexe au présent rapport (annexe 6). Les valeurs de biomasse par station sont indiquées au tableau 4.5. En excluant les stations où il n'y avait pas de plantes aquatiques, l'étendue des valeurs de biomasse moyenne par mètre carré par station varie de 0,2 grammes masse sèche/m² (station 22) à 460 g masse sèche/m² (station 46). A partir de la biomasse moyenne par mètre carré, un estimé de la biomasse végétale submergée à chaque station de 49 m² a été calculé.

La variabilité intra-site de la biomasse (c'est-à-dire la variabilité inter-quadrat) est encore très grande, avec l'écart-type de la moyenne qui dépasse presque toujours 20% de la moyenne, à cause notamment de l'observation fréquente de quadrats vides: des 152 quadrats échantillonnés, 38 (25%) étaient vides.

Tableau 4.5: Moyenne de la biomasse (B, grammes de matière sèche/m²) avec l'écart-type de la moyenne, le coefficient de variation, l'estimé de la biomasse dans 49 m² et une indication si la station a été retrouvée, à chacune des stations du lac Saint-Pierre visitée en octobre 1990.

Station	N	B (g/m ²) ± écart-type de la moyenne	Coefficient de variation	B (g/49 m ²)	Station retrouvée
1	5	5,6 ± 2,9	116%	275	NON
2	0	0	-	0	NON
3	4	0,8 ± 0,6	139%	40	NON
4	0	0	-	0	-
5	4	0,5 ± 0,3	139%	23	NON
6	0	0	-	0	-
7	0	0	-	0	-
9	4	3,2 ± 2,8	172%	158	NON
10	4	5,8 ± 2,1	71%	287	NON
11	2	57,0 ± 7,7	19%	/16m ² 912	
	2	5,1 ± 3,3	91%	/33m ² 168	
				1080	NON
13	5	0,8 ± 0,8	224%	41	OUI
14	4	33,1 ± 10,3	62%	1622	NON
15	0	0	-	0	NON
16	5	39,3 ± 4,3	25%	1928	OUI
17	4	47,7 ± 25,8	108%	2336	OUI
18	4	7,0 ± 2,7	78%	345	OUI
19	4	1,2 ± 0,6	91%	61	NON
21	7	2,7 ± 1,7	171%	131	NON
22	6	0,2 ± 0,2	245%	11	OUI
23	0	0	-	0	-
24	4	21,6 ± 7,4	68%	1061	NON
26	7	5,5 ± 3,8	183%	268	OUI
27	3	20,9 ± 8,9	74%	1026	NON
28	4	7,0 ± 2,7	77%	343	NON
30	5	18,9 ± 18,5	218%	926	OUI
31	4	3,3 ± 2,4	145%	164	NON
32	4	11,1 ± 4,5	81%	545	NON
33	4	6,7 ± 1,4	42%	331	OUI
35	4	12,9 ± 4,6	72%	631	-
36	4	50,9 ± 18,6	73%	2495	OUI
37	5	17,1 ± 2,5	33%	837	NON
40	5	50,8 ± 16,5	73%	2489	OUI
41	5	76,1 ± 24,8	73%	3731	OUI
44	4	304,1 ± 58,0	38%	14901	NON
45	5	4,8 ± 4,3	200%	234	OUI
46	4	460,2 ± 139,4	61%	22549	OUI
47	4	51,8 ± 13,9	54%	2537	OUI
48	4	1,9 ± 0,7	70%	93	OUI
49	5	5,4 ± 4,1	171%	265	OUI
50	4	16,3 ± 6,4	79%	799	NON

4.4 Changement dans la biomasse entre août et octobre

La biomasse des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre a beaucoup diminué du mois d'août au mois d'octobre. Au tableau 4.6, les espèces dominantes (les plus abondantes sur le site) retrouvées lors des deux campagnes d'échantillonnage, de même que la biomasse estimée pour chaque station (49 m²), sont comparées et le pourcentage de perte calculé. Il faut noter qu'à cause des problèmes de localisation mentionnés antérieurement, certaines stations visitées au mois d'août n'ont pu être précisément retrouvées au mois d'octobre. Alors, les données inscrites dans le tableau 4.6 proviennent d'un site qui se veut être le plus près possible de celui du mois d'août. Dû à l'hétérogénéité dans la répartition et l'abondance des plantes dans le lac, à ces sites les valeurs de comparaison demeurent approximatives. Cependant, nous pouvons tout de même constater que les diminutions de biomasse végétale calculées pour ces sites ressemblent beaucoup à celles obtenues aux stations qui ont été retrouvées. Au tableau 4.7, le même type de compilation a été effectuée, mais pour les deux espèces les plus fréquemment retrouvées dans le lac, prises individuellement, soient Vallisneria americana et Potamogeton richardsonii. De ces deux tableaux peuvent se dégager les renseignements suivants.

La majorité des stations d'échantillonnage situées dans le lac Saint-Pierre montrent un pourcentage de perte de biomasse végétale supérieur à 90%. De plus, plusieurs des plantes récoltées au mois d'octobre étaient partiellement ou beaucoup décomposées; au printemps suivant, il ne resterait plus ou très peu de parties vertes des plantes aquatiques submergées dans le lac. Le Potamogeton pectinatus, qui formait de grands herbiers dans le sud-ouest du lac, semble avoir complètement "disparu"

Tableau 4.6: Compilation des données obtenues lors des échantillonnages des mois d'août et octobre 1990 au lac Saint-Pierre: espèces de plantes aquatiques dominantes par station, biomasse totale estimée à chaque station (49 m²) et pourcentage de perte calculé par station.

Station	Plantes août	Plantes oct.	Biomasse août	Biomasse oct.	% perte
1	Va-Ni-Pr	Va-Ni	3113	275	91
2	Va	0	6384	0	100%
3	Va	Va-Hd	4518	40	99%
5	Va	Hd	829	23	97%
9	Pr-Af	Hd-Ag	4706	158	97%
10	Va-Hd-Ms-Ec	Pr-Hd-Ms	>3342	287	>91%
11	Va-Ni	Ni	4892	1080	78%
13 (*)	Va-Af	Hd	987	41	96%
14	Va-Pr	Hd-Ni	9844	1622	84%
15	Va-Ni	0	4183	0	100%
16 (*)	Va-Ni	Ni	>5822	1928	>67%
17 (*)	Pr-Va	Pr	?	2336	?
18 (*)	Va	Va	3794	345	91%
19	Va	Va	1785	61	97%
21	Pp	Va-Pr	5261	131	98%
22 (*)	Pr	Pr	6720	11	99,8%
24	Va	Va	?	1061	?
26 (*)	Va-Pp-Pr	Va	?	268	?
27	Va-Pr	Pr	?	1026	?
28	Va-Pr	Va	14944	343	98%
30 (*)	Va-Pr-Ec	Va-Pr	?	926	?
31	Va-Pr-Af	Va-Pr-Ni	9303	164	98%
32	Va-Pr-Ni	Va-Pr	?	545	?
33 (*)	Va	Va	?	331	?
36 (*)	Va-Pr-Ni	Va-Pr-Ni	?	2495	?
37	Va	Va	?	837	?
40 (*)	Va-Af	Va-Ag-Ms	9138	2489	73%
41 (*)	Va-Pr	Va-Pr	9964	3731	63%
44	Va-Pr-Ms	Ec-Ms-Hd-Ni	22552	14901	34%
45 (*)	Va	Hd	128	234	0%
46 (*)	Ec	Ec	35963	22549	37%
47 (*)	Va-Hd	Va-Hd	1373	2537	0%
48 (*)	Va	Va	3053	93	97%
49 (*)	Va-Hd	Va-Hd	3811	265	93%
50	Va-Pr	Va-Ms	>8731	799	>91%

(*) Station retrouvée au mois d'octobre.

Af Algues filamenteuses	Ms <u>Myriophyllum spicatum</u>
Ag <u>Alisma gramineum</u> , Ni <u>Nitella</u>	Pp <u>Potamogeton pectinatus</u>
Ec <u>Elodea canadensis</u>	Pr <u>Potamogeton richardsonii</u>
Hd <u>Heteranthera dubia</u>	Va <u>Vallisneria americana</u>

Tableau 4.7: Compilation des données de biomasse végétale (en grammes de masse sèche, estimée pour 49 m²) obtenues lors des échantillonnages des mois d'août et octobre 1990 au lac Saint-Pierre, pour Vallisneria americana et Potamogeton richardsonii, avec le pourcentage de perte calculé par espèce.

Station	<u>Vallisneria americana</u>			<u>Potamogeton richardsonii</u>		
	août	oct	perte	août	oct	perte
1	1338	26	98%	1186	0	100%
2	6384	0	100%	-	-	-
3	4518	25	99%	-	-	-
5	800	0	100%	-	-	-
9	54	0	100%	2570	0	100%
10	3048	0	100%	?	174	?
11	892	0	100%	-	-	-
13 (*)	484	?	>90%	-	-	-
14	4387	40	99%	5451	49	99%
15	2453	0	100%	-	-	-
16 (*)	5822	65	99%	-	-	-
17 (*)	3615	53	98%	?	2279	?
18 (*)	3794	345	91%	-	-	-
19	1785	61	97%	-	-	-
21	390	67	83%	81	64	21%
22 (*)	20	0	100%	6588	11	99%
24	?	1061	?	-	-	-
26 (*)	1675	268	84%	?	0	100%
27	4159	0	100%	?	1026	?
28	6782	343	95%	8162	0	100%
30 (*)	504	18	96%	?	908	?
31	2883	87	97%	5589	28	99%
32	1956	500	74%	?	45	?
33 (*)	?	331	?	-	-	-
36 (*)	3091	358	88%	?	714	?
37	?	837	?	-	-	-
40 (*)	6327	757	88%	135	71	47%
41 (*)	7747	2526	67%	2217	1204	46%
44	1910	0	100%	15787	889	94%
45 (*)	119	?	>90%	-	-	-
47 (*)	1026	1737	0%	-	-	-
48 (*)	3053	93	97%	-	-	-
49 (*)	2549	38	98%	-	-	-
50	8731	391	95%	?	0	100%

(*) station retrouvée au mois d'octobre.

Les "?" du mois d'octobre signifient que la plante a été vue éparsée sur le site, mais n'a pas été ramassée dans les quadrats.

puisque aucune plante n'a été retrouvée au mois d'octobre. Les algues filamenteuses semblent également avoir disparues. Les grands herbiers de Potamogeton richardsonii, avec leur biomasse végétale très importante, ont grandement diminué. Aux sites où ce potamot est l'espèce dominante (ex.: station 22), avec des groupements de longues tiges denses qui atteignaient la surface de l'eau au mois d'août, il ne restait pratiquement rien sauf de petites plantes qui ne se rendaient plus à la surface de l'eau et qui étaient souvent partiellement ou beaucoup décomposées. La biomasse de la vallisnérie, qui couvre presque tout le fond du lac, a elle aussi beaucoup diminué, les valeurs obtenues en octobre étant généralement <10% de celles obtenues en août. A plusieurs endroits sur le lac, nous pouvions clairement voir flotter à la surface de l'eau de gros amas de débris de plantes (entre autres aux stations #1, 2, 5 et 36), qui suivaient le courant vers l'aval du lac.

Le Nitella semble se décomposer ou être emporté hors du lac moins vite que les plantes à fleurs, car des pertes en biomasse moins importantes ont été notées pour cette espèce au mois d'octobre. Peut-être que ce tapis d'algues, qui couvre le fond du lac par endroit, est plus persistant que les autres plantes qui ont leurs feuilles dans la colonne d'eau. Egalement, au mois d'octobre, nous avons retrouvé une biomasse végétale plus importante dans le secteur des îles de Sorel que dans le lac lui-même. Les stations situées dans le lac mais tout près des îles (#36, 40, 44), celles situées dans les baies des îles (#41, 47) ou encore dans les chenaux entre les îles (#45, 46) semblent avoir perdu moins de biomasse végétale comparativement au restant du lac. Il est probable que dans ces baies et chenaux, les plantes soient plus protégées des grands courants, à cause entre autres des barrages érigés en amont des îles et de la protection naturelle qu'offrent les baies.

4.5 BIOMASSE - SYNTHÈSE

- Dans les îles de Sorel, il y a des herbiers très denses à Elodea canadensis ou Myriophyllum spicatum en bordure des chenaux, alors qu'au centre de ceux-ci, il y a peu de végétation. Les baies supportent également une végétation submergée dense.
- Dans le lac lui-même, les herbiers à potamots (Potamogeton richardsonii et pectinatus), qui sont de grandes plantes à tige très feuillée et très ramifiée, ont des valeurs de biomasse plus élevées que les herbiers monospécifiques à vallisnèries. Vallisneria americana, l'espèce dominante du lac Saint-Pierre, forme un grand tapis qui couvre tout le fond du lac, sauf dans les chenaux au débit rapide (voie maritime, chenaux nord et sud).
- La variabilité de la biomasse des plantes aquatiques submergées récoltées à chaque station d'échantillonnage est élevée; ce fait n'est pas unique au lac Saint-Pierre mais reflète la forte variabilité rapportée dans la littérature pour les herbiers aquatiques. Dans le lac dans son ensemble, il semble y avoir un gradient dans la biomasse qui serait plus importante en amont qu'en aval, et au sud qu'au nord; ce gradient serait le reflet de la répartition des herbiers de potamots.
- En octobre, d'après les observations de terrain, près de 90% des parties vertes de la végétation aquatique submergée du lac est disparue. De gros amas de plantes ont été observés flottant à la surface, entraînés par le courant vers l'aval du lac. Près des îles de Sorel, cette perte semble moindre, se chiffrant autour de 65%.

4.6 Contaminants (métaux traces) dans les plantes

Les stations retenues et les plantes récoltées pour le dosage des métaux traces lors de l'échantillonnage du mois d'août 1990 sont les suivantes:

Station	Plantes
1	<u>Vallisneria</u> , <u>Nitella</u> , <u>Potamogeton</u>
2	<u>Vallisneria</u>
10	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u>
11	<u>Vallisneria</u> , <u>Nitella</u>
13	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u> , algues filamenteuses
14	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u>
16	<u>Vallisneria</u> , <u>Nitella</u>
19	<u>Vallisneria</u>
26	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u>
28	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u>
31	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u> , algues filamenteuses
40	<u>Vallisneria</u> , algues filamenteuses
44	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u> , <u>Myriophyllum</u>
45	<u>Vallisneria</u>
46	<u>Elodea</u>
47	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u>
49	<u>Vallisneria</u>
50	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u>

Les résultats des dosages, exprimés en concentrations ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec), sont présentés en annexe au présent rapport (annexe 7) pour les parties vertes et souterraines. Des dosages furent également effectués sur des échantillons de référence avec des concentrations certifiées, pour s'assurer de la précision des analyses; ces résultats sont présentés en annexe (annexe 7). Les limites de détection sont également rapportées à l'annexe 7.

4.6.1 Variabilité inter-spécifique des concentrations en contaminants.

Avant de commenter individuellement chaque métal, des remarques générales peuvent être formulées.

- En général, les concentrations en métaux sont plus élevées dans les parties souterraines (racines, stolons) que dans les parties vertes des plantes aquatiques submergées enracinées.

- Les concentrations de métaux dans les parties vertes de la vallisnérie sont très fréquemment supérieures aux concentrations trouvées dans les parties vertes des autres plantes aquatiques enracinées. Il faut noter que les parties vertes de la vallisnérie ne sont composées que de longues feuilles rubanées; la tige est minuscule. Chez les potamots par exemple, les parties vertes sont composées d'une longue tige ramifiée avec beaucoup de petites feuilles. Les concentrations dans les feuilles des potamots peuvent être de 2 à 3 fois supérieures à celles dans la tige (St-Cyr et Campbell, données non publiées; Kovacs *et al.*, 1984), bien que la biomasse par plante de la tige soit supérieure à celle des feuilles. Par conséquent, les plantes à tige (Potamogeton richardsonii, P. pectinatus, Heteranthera dubia, Myriophyllum spicatum et Elodea canadensis) peuvent donc présenter des concentrations en métaux plus faibles que les plantes en rosette (comme la vallisnérie) dans les parties vertes lorsque celles-ci sont analysées globalement.

- Les algues filamenteuses présentent pour certains métaux, tels que le Cu, le Cr et le Pb, des concentrations très élevées. Cependant, il faut noter les difficultés rencontrées

pour effectuer un bon lavage de ces plantes. Les algues filamenteuses sont constituées de quantités de filaments très fins, tous entremêlés les uns aux autres. Ces filaments peuvent facilement intercepter de la matière particulaire en suspension dans l'eau et il est très ardue de l'en dégager totalement. Lorsque l'on considère les métaux tels que le Cu et le Cr, qui sont reconnus pour s'adsorber facilement à la matière particulaire en suspension dans l'eau, les grandes concentrations retrouvées dans les algues filamenteuses peuvent refléter la présence de cette matière particulaire contaminée du milieu. Une partie de ces métaux ne serait alors pas prise en charge par le tissu biologique de l'algue, mais seulement captée dans ses longs filaments.

Nous avons voulu comparer les valeurs de concentration en métaux traces obtenues dans les parties vertes des espèces de plantes analysées au lac Saint-Pierre avec des valeurs publiées dans la littérature (tableau 4.8; figure 4.3). Les valeurs rapportées dans le tableau 4.8 proviennent autant que possible d'études où ont été analysées des parties vertes des mêmes espèces de plantes submergées. Toutes les concentrations en métaux sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de tissu sec. Cladophora y est à titre informatif, étant une algue filamenteuse très répandue dans les eaux douces. Des comparaisons ont également été faites avec des concentrations précédemment rapportées pour les plantes du lac Saint-Pierre (tableau 2.1); cependant, une partie des racines ayant été analysée avec les parties vertes, les valeurs de ce dernier tableau ne peuvent être comparées qu'avec précaution, les parties souterraines ayant souvent des concentrations en métaux plus élevées que les parties vertes.

Tableau 4.8: Concentrations en métaux ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les plantes aquatiques submergées d'autres plans d'eau que le lac Saint-Pierre; valeurs publiées dans la littérature*, ainsi que les valeurs obtenues dans cette étude.

Espèce	N**	Site***	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe	Ca	Ref
<u>Cladophora</u>	4	C	ND	4-18	-	ND-13	-	40-160	-	-	-	1
	3	C	-	2-40	29-56	13-80	8-34	95-179	-	-	-	5
	3	NC	-	-	10-16	-	-	91-315	-	1200-3200	12,200-118,000	7
	-	NC	-	-	31,4	-	-	20,5	150	800	46,000	9
<u>Elodea canadensis</u>	1	C	5,7	3,5	-	25,3	-	47,0	-	-	-	1
	-	NC	2,5	15,0	10,0	18,0	32,0	18,0	-	-	200,000	2
	8	NC	1,9 \pm 0,7	-	6,4 \pm 3,1	-	14 \pm 7	-	-	-	-	3
	5	NC	0,6 \pm 0,1	-	8,9 \pm 0,3	-	4,4 \pm 1,0	89 \pm 4	-	-	-	4
	2	NC	-	-	11-24	-	-	251-385	-	4500-16,000	23,500-28,300	7
	-	NC	-	-	8,3	-	-	17,6	46	200	26,000	9
1		0,6	3,6	13,3	7,9	4,2	65,3	3182	2507	17,960	12	
<u>Myriophyllum spicatum</u>	2	C	ND	2,5-5,5	-	ND	-	22-63	-	-	-	1
	5	NC	0,2 \pm 0,02	-	5,2 \pm 0,1	-	4,1 \pm 0,4	38 \pm 4	-	-	-	4
	2	C	-	8-66	49-57	12-66	10-22	295-349	-	-	-	5
	3	NC	-	-	5-14	-	-	17-22	141-709	140-300	23,800-208,100	9
	4	C	-	33,0	4,0	11,9	6,0	-	703	-	-	11
	4	NC	-	23,0	4,2	10,3	6,5	-	420	-	-	11
1		0,2	3,2	8,2	3,7	1,8	53,6	892	1654	50,180	12	
<u>Potamogeton pectinatus</u>	4	C	ND	3,3-6,9	-	ND	-	24-458	-	-	-	1
	4	NC	0,5 \pm 0,03	-	3,3 \pm 0,4	-	2,2 \pm 0,3	16 \pm 2	-	-	-	4
	2	C	-	5,2-6,4	3-21	9-24	2-16	12-128	-	-	-	5
	2	NC	-	-	16-17	-	-	130-170	-	3500-5800	24,200-46,000	7
	-	NC	-	-	-	-	-	-	535	1171	37,600	10
1		0,9	1,1	13,3	2,8	0,9	60,1	2749	1582	16,350	12	

Tableau 4.8 (suite)

Espèce	N	** Site	*** Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe	Ca	Ref
<u>Potamogeton</u>	3	C	ND-3,2	3,3-4,4	-	ND-7,6	-	25-35	-	-	-	1
<u>richardsonii</u>	1	NC	2,3	1,1	-	ND	-	45,1	-	-	-	1
	6	NC	5,5±2,2	-	5,0±1,3	-	21±13	-	-	-	-	3
	-	C	4,9	-	171	-	4,8	2878	-	-	-	6
	-	NC	0,7	-	2,8	-	2,5	112	-	-	-	6
	-	NC	-	-	-	-	-	-	109	218	40,300	10
	7		0,2-1,5	1,6-6,8	7,3-34	1,2-15	0,7-18	27-96	203-2952	871-4226	12,000-50,180	12
<u>Vallisneria</u>	2	C	ND	2,9	-	7-12	-	20-32	-	-	-	1
<u>americana</u>	1	NC	ND	2,5	-	ND	-	26,3	-	-	-	1
	14	NC	0,6-3,6	-	7-15	-	7-11	28-115	-	-	-	4
	2	NC	-	1,1-1,5	11-13	-	2,1-7,8	65-125	-	-	-	8
	2	NC	-	-	5-17	-	-	34-42	315-653	200-4900	18,600-99,500	9
	-	NC	-	-	-	-	-	-	176	323	18,200	10
	4	C	-	28,0	5,3	13,3	<1,0	-	656	-	-	11
	4	NC	-	29,0	5,0	9,5	<1,0	-	522	-	-	11
	26		0,4-5,1	1,4-9,7	9-40	3-46	0,6-8,0	62-306	1122-7335	805-12,943	9871-37,470	12

* ND: non détectable; -: n'a pas été analysé; certaines valeurs ont été arrondies.

Notes: ** N : nombre d'échantillons analysés.

*** C : site contaminé; NC: site non contaminé

REFERENCES: 1- Wells et al. (1980) (voir aussi Estabrook et al., 1985): Lacs du Michigan et la baie Saginaw, lac Huron.

2- Mudroch (1980): Big Creek Marsh, lac Erié, Ontario.

3- Pip (1990): Lac Shoal (Manitoba-Ontario). Concentrations moyennes saisonnières ± écart-type.

4- DiGiulio et Scanlon (1985): Chesapeake Bay, E.U., plantes entières.

5- Kovacs et al. (1984): Lac Balaton, Hongrie.

6- Ray et White (1976): Nepisiguit River, New Brunswick.

7- Peverly (1985): Oak Orchard Creek, N.Y., E.U.

8- Friant (1979): Kennebec River, Maine, E.U.

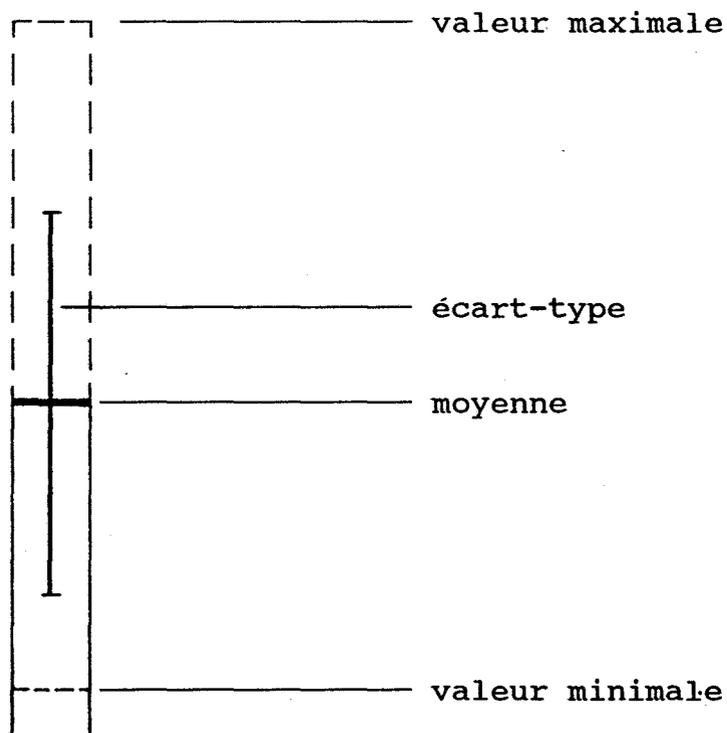
9- Muztar et al. (1978): Lac Chemung, Ontario.

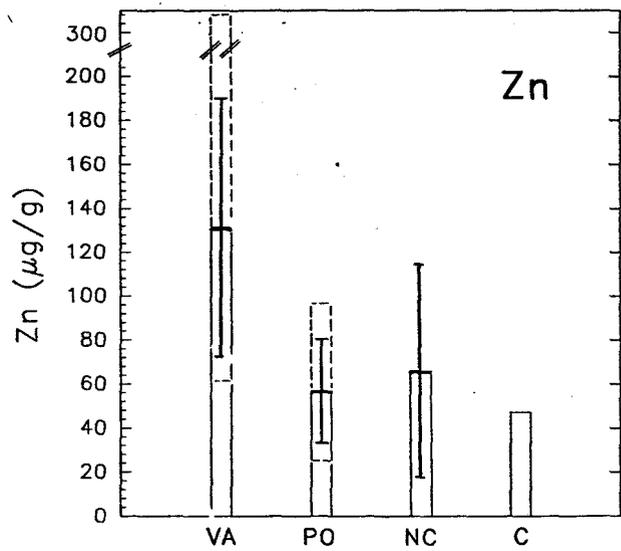
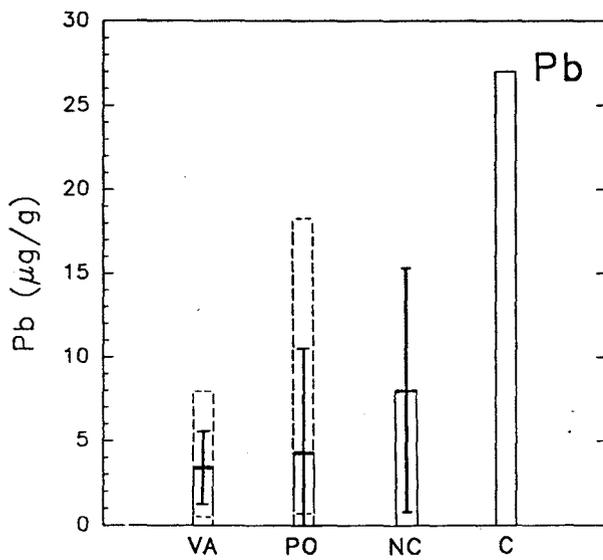
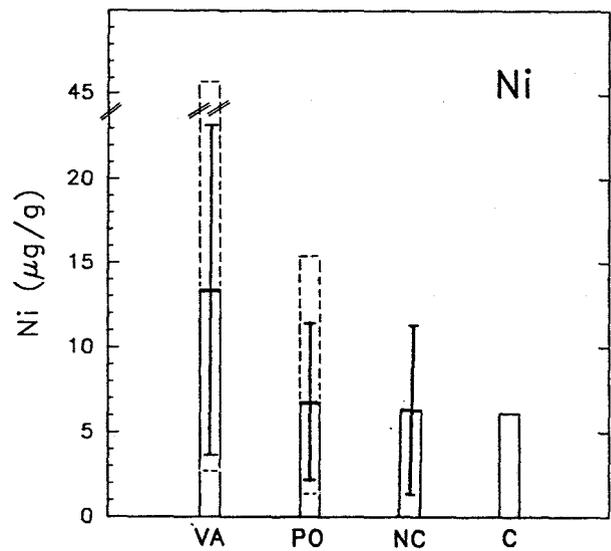
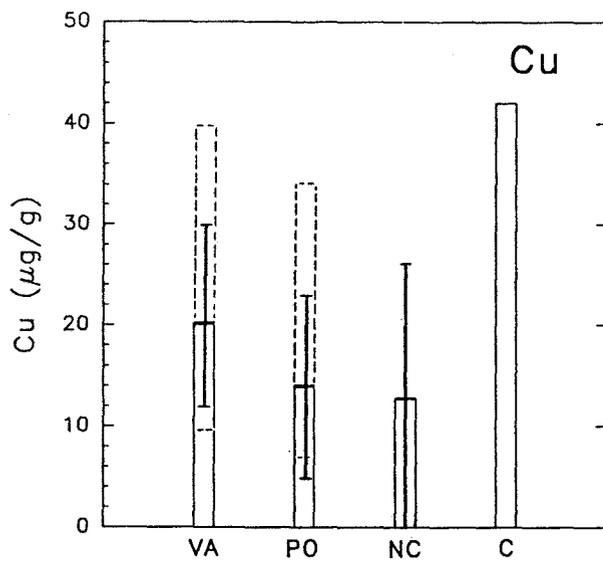
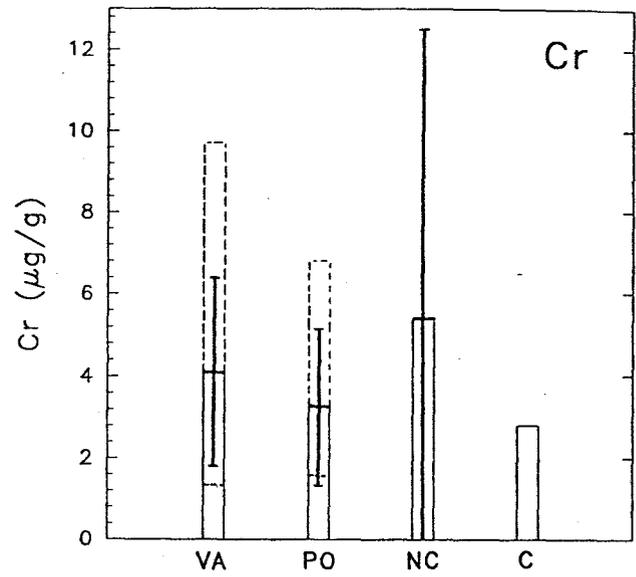
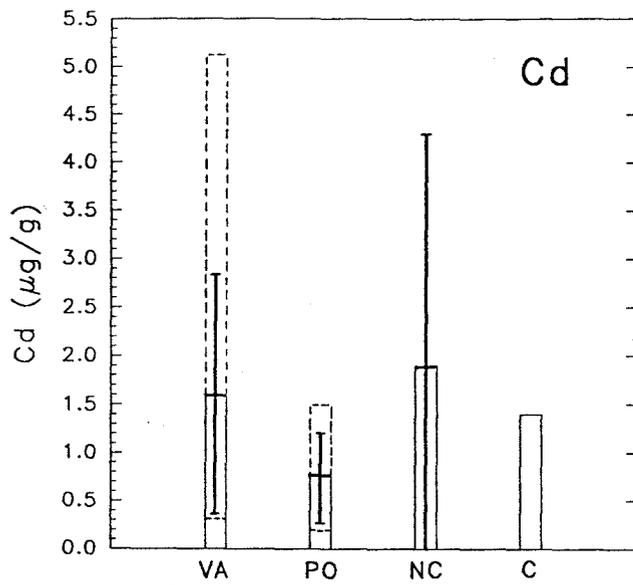
10- Linn et al. (1975): Lacs du Minnesota, E.U.

11- Crowder et al. (1989): Baie de Quinte, Lac Ontario.

12- Les valeurs obtenues dans cette étude (annexe 7).

Figure 4.3: Comparaisons des concentrations ($\mu\text{g/g}$ de poids sec) de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn dosées chez Vallisneria americana (VA) (n=26) et Potamogeton richardsonii (PO) (n=7) récoltés au lac Saint-Pierre en août 1990 avec les moyennes et les médianes des concentrations pour ces mêmes métaux, compilées par Outridge et Noller (1991), pour des plantes aquatiques (sans égard à l'espèce) provenant respectivement de sites non-contaminés (NC) et contaminés (C).





A la figure 4.3, les concentrations en métaux dosées dans les parties vertes de Vallisneria americana et de Potamogeton richardsonii au lac Saint-Pierre sont comparées aux médianes de ces concentrations obtenues pour des plantes aquatiques de sites contaminés et aux moyennes pour les sites non-contaminés, sans égard à l'espèce ou au type de plantes aquatiques (submergée, émergente, flottante), tel que rapporté dans Outridge et Noller (1991). Il faut noter la grande variabilité associée aux données dans la littérature provenant de sites "non-contaminés".

Cadmium. Les valeurs de concentration en Cd sont élevées chez la vallisnérie, variant de 0,35 $\mu\text{g/g}$ (station 49) à 5,12 $\mu\text{g/g}$ (station 19) dans les parties vertes (fig. 4.4). Les concentrations les plus élevées dosées dans la vallisnérie du lac Saint-Pierre dépassent la médiane des concentrations en Cd dosées chez des plantes aquatiques provenant de lieux dits contaminés (fig. 4.3). Les concentrations en Cd sont plus élevées dans les parties souterraines que dans les parties vertes (annexe 7), comme souvent rapporté chez les plantes submergées (Outridge et Noller, 1991). Chez les potamots, les concentrations dans les parties vertes varient de 0,21 $\mu\text{g/g}$ (station 10) à 1,5 $\mu\text{g/g}$ (station 14) (fig. 4.4).

Chrome. Les concentrations en Cr dans les parties vertes de la vallisnérie, exprimées en $\mu\text{g/g}$ de tissu sec, varient de 1,4 (station 50) à 9,7 (station 26) (fig. 4.5), et de 1,1 (station 26) à 6,8 (station 50) pour les parties vertes du potamot. L'hétéranthère montre des concentrations en Cr plus élevées que celles de la vallisnérie dans les parties vertes, aux deux sites où elle fut analysée, avec 5,1 $\mu\text{g/g}$ (station 13) et 14,2 $\mu\text{g/g}$ (station 47) (annexe 7). Les concentrations de Cr dosées chez la vallisnérie du lac Saint-Pierre dépassent la valeur médiane rapportée par Outridge et Noller (1991) pour les

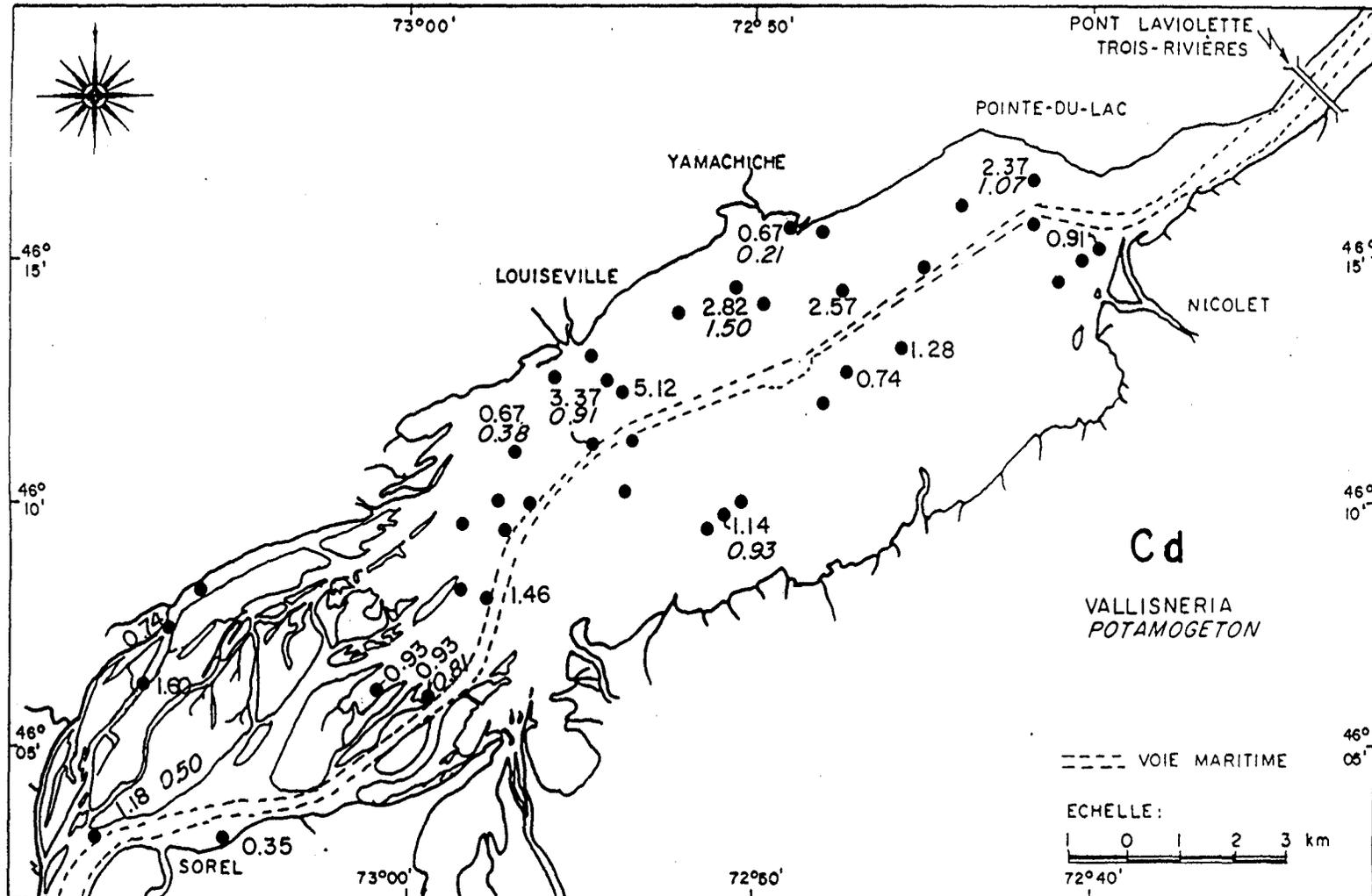


Figure 4.4: Répartition spatiale des concentrations en cadmium ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et du potamot provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. (Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1).

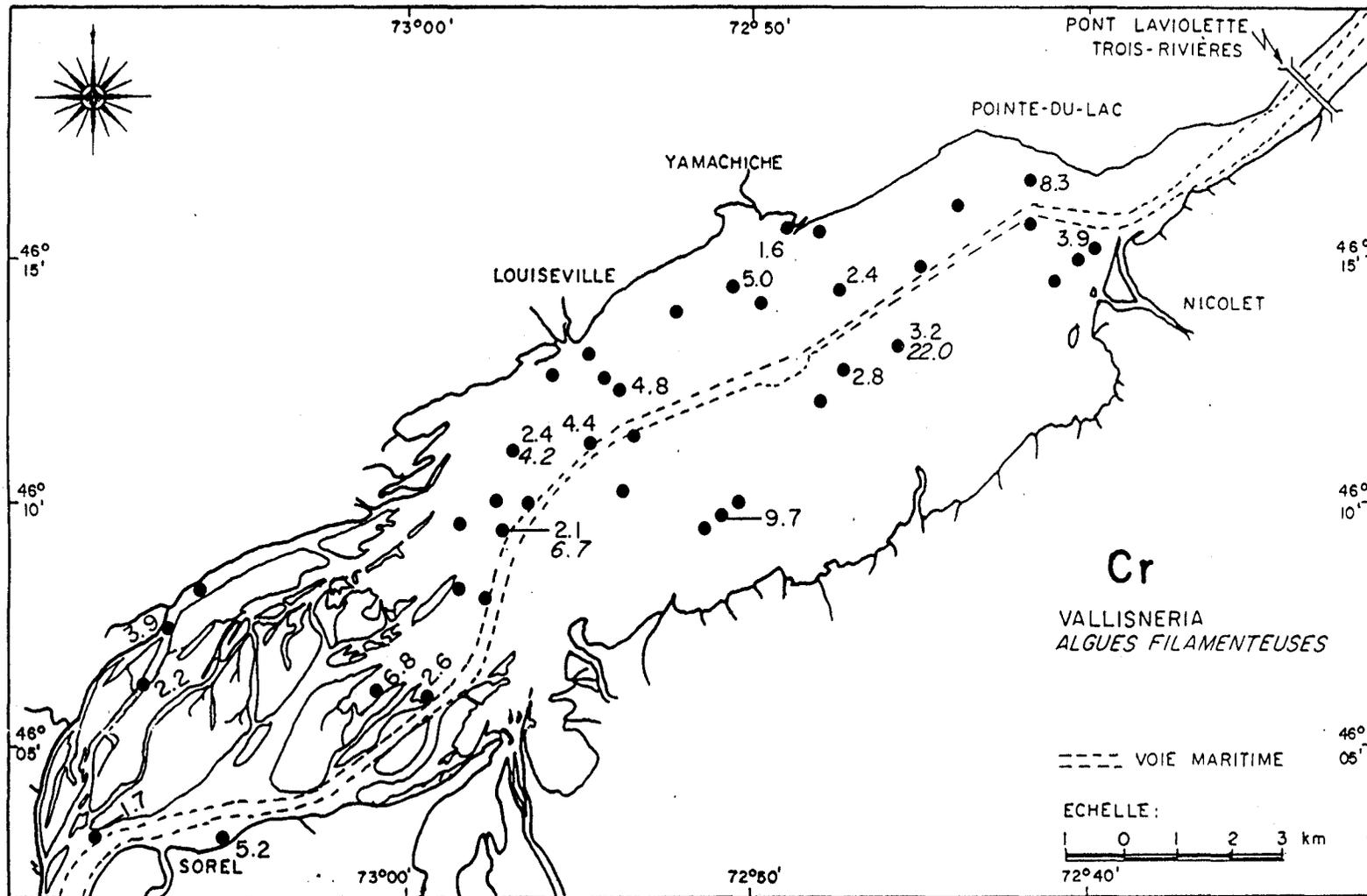


Figure 4.5: Répartition spatiale des concentrations en chrome ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et chez les algues filamenteuses provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. (Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1).

plantes aquatiques provenant de sites contaminés (fig. 4.3). Les concentrations rapportées par Béland et Demers (1977; tableau 2.1) sont nettement supérieures à celles rapportées ici pour le lac Saint-Pierre. Les concentrations les plus élevées se retrouvent chez les algues filamenteuses, avec une valeur de 22 $\mu\text{g/g}$ à la station 13 (fig. 4.5).

Cuivre. Dans les parties vertes de la vallisnérie, les concentrations de Cu varient de 9,1 $\mu\text{g/g}$ (station 10) à 40 $\mu\text{g/g}$ (station 28) (fig. 4.6). Les concentrations de Cu sont à peu près comparables dans les parties vertes des potamots, variant de 7,3 $\mu\text{g/g}$ (station 10) à 34 $\mu\text{g/g}$ (station 28). Ces valeurs sont sous la concentration médiane rapportée par Outridge et Noller (1991) pour les plantes aquatiques provenant de sites contaminés (fig. 4.3); il y a cependant un gradient dans les concentrations de Cu dosées chez la vallisnérie du lac Saint-Pierre. Les valeurs moyennes rapportées par Béland et Demers (1977; tableau 2.1) sont plus élevées que celles rapportées ici pour le lac Saint-Pierre. Chez les plantes submergées enracinées, les valeurs sont toujours plus élevées dans les parties souterraines que dans les parties dans la colonne d'eau (annexe 7, Outridge et Noller, 1991).

Comme pour le Cr, les plus fortes concentrations ont été retrouvées chez les algues filamenteuses, avec jusqu'à 40 $\mu\text{g/g}$ de Cu/g de tissu sec d'algues.

Nickel. Pour le Ni, la valeur de concentration la moins élevée dans les parties vertes de la vallisnérie est de 2,6 $\mu\text{g/g}$ (station 10) alors que la plus élevée est de 46 $\mu\text{g/g}$ (station 26) (fig. 4.7). Les concentrations sont moins élevées dans les parties vertes des potamots variant de 1,2 $\mu\text{g/g}$ (station 10) à

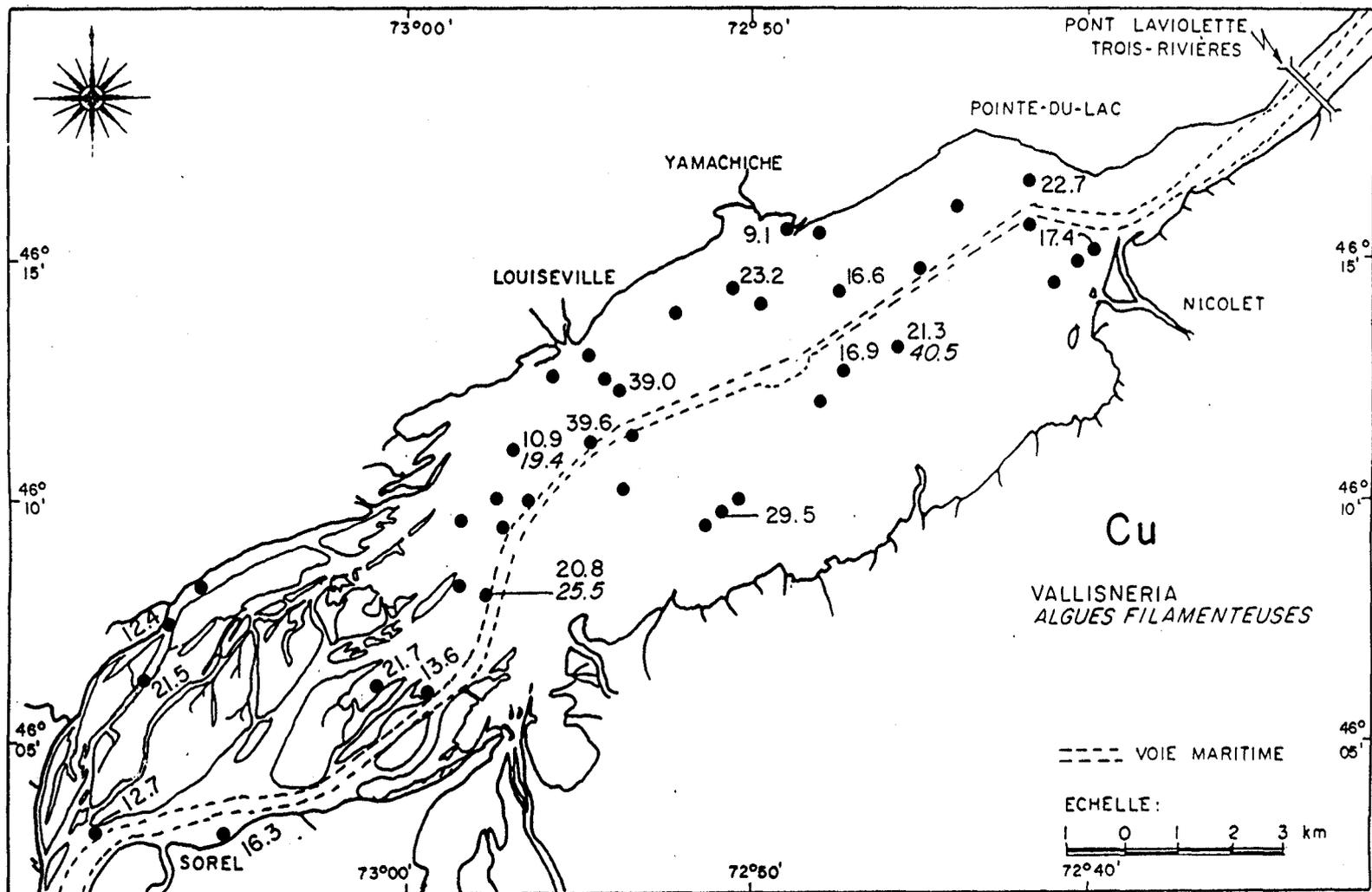


Figure 4.6: Répartition spatiale des concentrations en cuivre ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et chez les algues filamenteuses provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. (Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1).

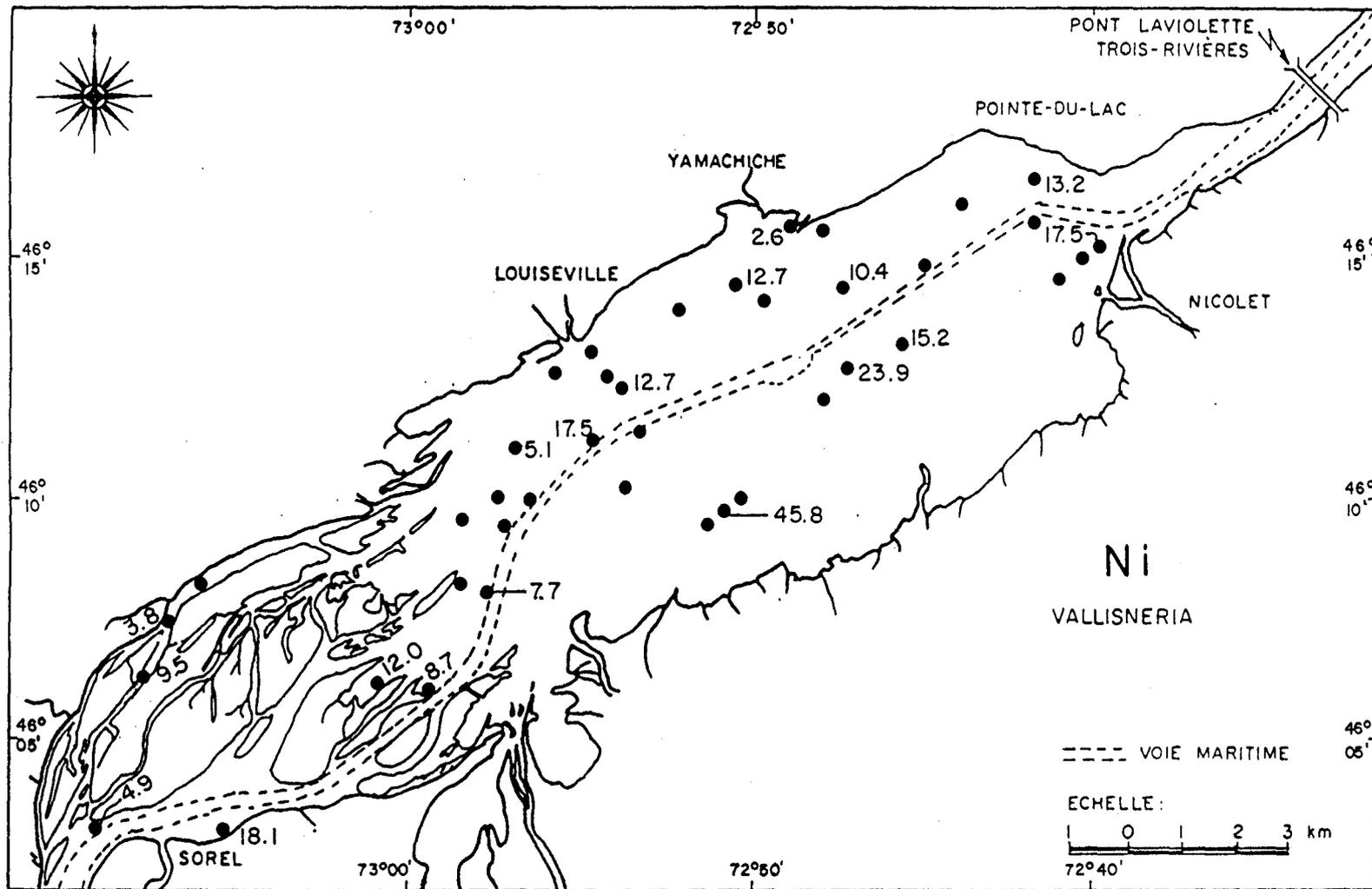


Figure 4.7: Répartition spatiale des concentrations en nickel ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. (Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1).

15 $\mu\text{g/g}$ (station 50). Ces concentrations excèdent de beaucoup la valeur médiane rapportée pour les plantes aquatiques de sites contaminés (fig. 4.3). Les valeurs moyennes rapportées par Béland et Demers (1977; tableau 2.1) sont similaires à celles trouvées dans ce travail pour le lac Saint-Pierre. Contrairement à ce qui est généralement observé pour les autres métaux, les concentrations en Ni sont souvent inférieures ou du même ordre de grandeur dans les parties souterraines, comparées aux parties vertes (annexe 7).

Zinc. Les concentrations de Zn sont les plus fortes dans les parties vertes de la vallisnérie si comparées aux autres parties vertes analysées, et varient de 62 $\mu\text{g/g}$ (station 31) à 306 $\mu\text{g/g}$ (station 26) (fig. 4.8). Pour le potamot, les concentrations dans les parties vertes sont beaucoup moindres, variant de 27 $\mu\text{g/g}$ (station 31) à 96 $\mu\text{g/g}$ (station 14). Il y a beaucoup de variabilité dans les concentrations de Zn rapportées pour ces espèces provenant de sites contaminés ou non (tableau 4.8); cependant, les concentrations dosées chez la vallisnérie excèdent de beaucoup la valeur médiane des concentrations dosées chez des plantes aquatiques provenant de sites contaminés (fig. 4.3). Les valeurs de Béland et Demers (1977; tableau 2.1) sont plus élevées que les valeurs rapportées ici. En général, les parties souterraines des plantes enracinées sont plus concentrées en Zn, bien que ce ne soit pas toujours vrai pour le potamot de richardson (annexe 7).

Plomb. Les plus fortes teneurs en Pb ont été retrouvées chez les algues filamenteuses de la station 13 (17 $\mu\text{g/g}$) ainsi que dans les parties vertes des potamots de la station 1 (18 $\mu\text{g/g}$). Le Nitella provenant de la station 1 montre aussi une concentration élevée de Pb (9 $\mu\text{g/g}$; annexe 7). Dans les parties

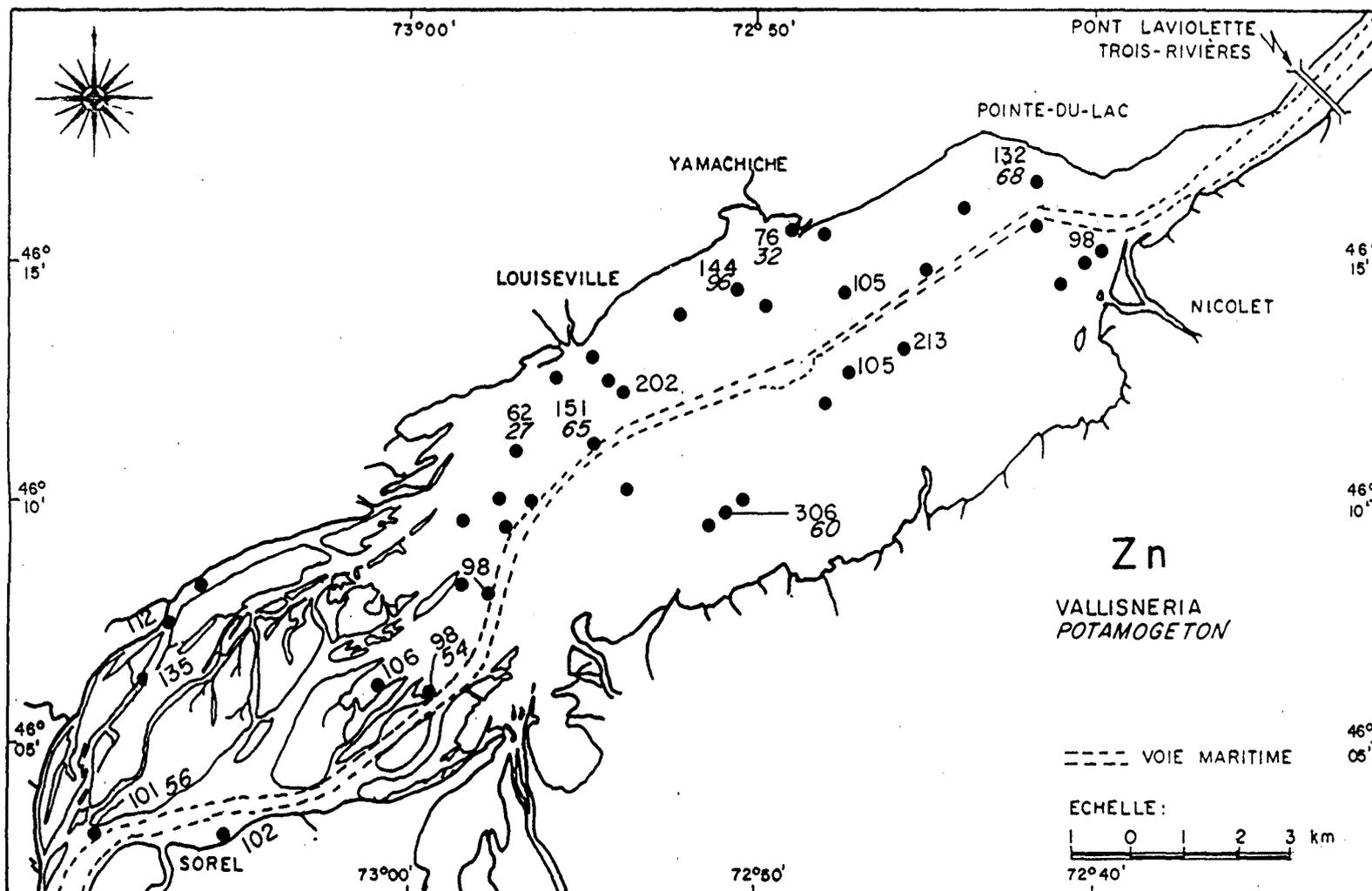


Figure 4.8: Répartition spatiale des concentrations en zinc ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et du potamot provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. (Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1).

vertes de la vallisnérie, les concentrations varient de 0,6 $\mu\text{g/g}$ (station 16) à 8 $\mu\text{g/g}$ (station 47) (fig. 4.9). L'hétéranthère montre des concentrations en Pb plus élevées que celles de la vallisnérie dans les parties vertes, aux deux sites où elle fut analysée, avec 2,1 $\mu\text{g/g}$ (station 13) et 9 $\mu\text{g/g}$ (station 47) (annexe 7). Comme pour le Zn, il y a beaucoup de recouvrement entre les concentrations de Pb dans les plantes aquatiques enracinées provenant de sites contaminés et non contaminés (tableau 4.8). Outridge et Noller (1991) rapportent une concentration médiane de 27 $\mu\text{g/g}$ de Pb pour les plantes aquatiques provenant de milieux contaminés (fig. 4.3). Compte-tenu des valeurs rapportées au tableau 4.8, il ne semble pas que les concentrations de Pb dosées dans les plantes du lac Saint-Pierre atteignent des valeurs typiques de milieux contaminés, bien qu'il existe un gradient dans les concentrations de Pb des plantes aquatiques du lac (fig. 4.9).

De ces comparaisons entre d'une part les concentrations en métaux retrouvées chez les différentes espèces de plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre, et d'autre part les concentrations de ces métaux dans les plantes aquatiques de plans d'eau contaminés (Outridge et Noller, 1991), peuvent se dégager les points suivants:

i) Dans le lac Saint-Pierre, sauf pour le Pb, la vallisnérie bioconcentre davantage les métaux traces dans ses parties vertes si comparée aux autres plantes aquatiques, surtout au Potamogeton richardsonii qui est la deuxième espèce en abondance dans le lac;

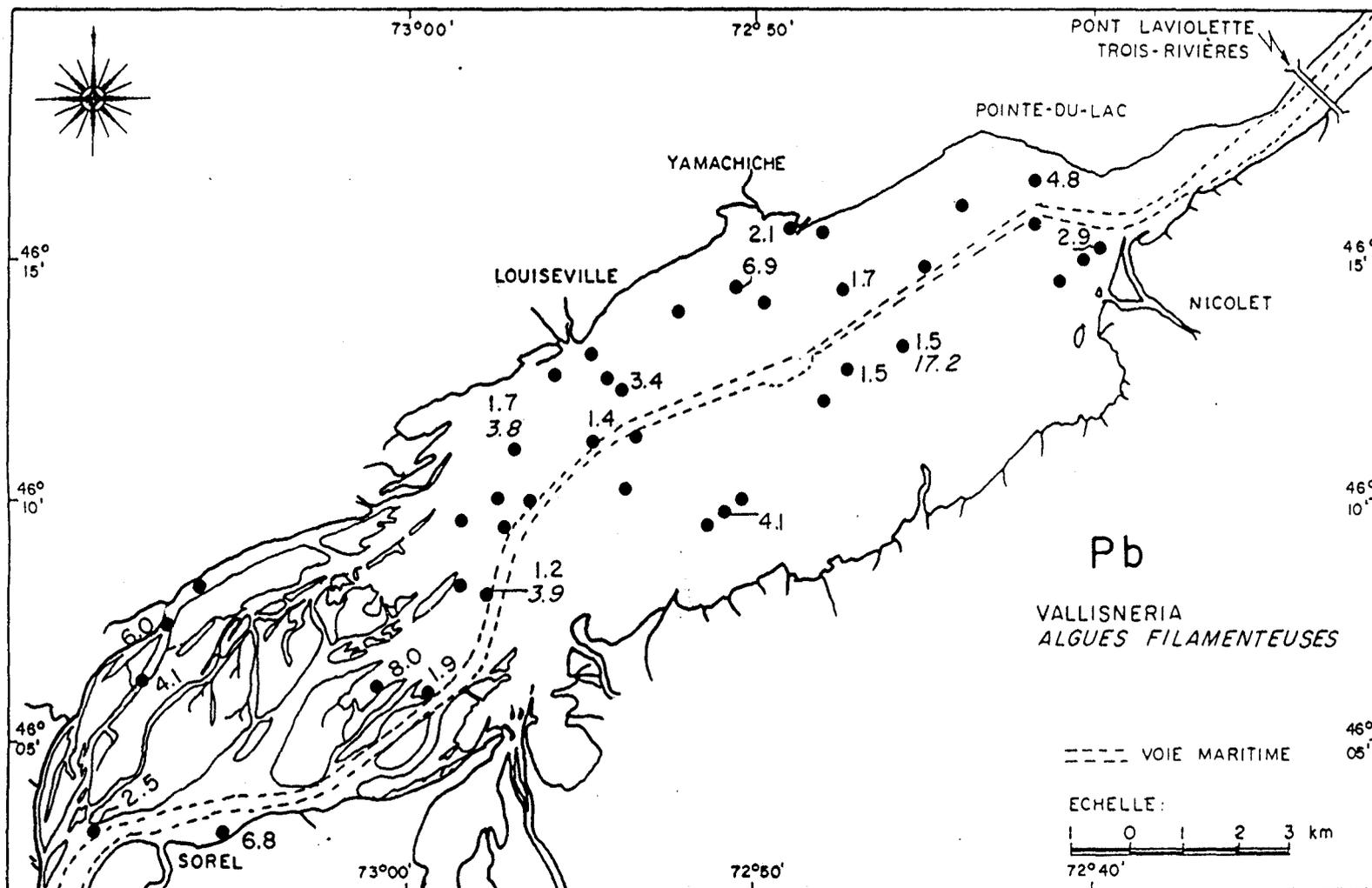


Figure 4.9: Répartition spatiale des concentrations en plomb ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dans les parties vertes de la vallisnérie et chez les algues filamenteuses provenant de l'échantillonnage d'août 1990 au lac Saint-Pierre. (Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1).

ii) Les concentrations de Cd, Cr, Ni et Zn dosées dans les parties vertes de la vallisnérie du lac Saint-Pierre excèdent souvent les valeurs médianes rapportées par Outridge et Noller (1991) pour ces concentrations retrouvées dans des plantes aquatiques provenant de plans d'eau contaminés. Cependant, les valeurs de Cd et de Cr citées par ces auteurs pour des sites non-contaminés sont très variables (fig. 4.3). Notons aussi que la vallisnérie du lac Saint-Pierre n'est pas également contaminée sur toute la superficie du lac et que les moyennes sont gonflées par des valeurs extrêmes provenant de sites particuliers.

4.6.2 Variabilité spatiale des concentrations en contaminants.

La plante la plus indiquée pour refléter la variabilité spatiale de la concentration en métaux traces dans les tissus des plantes submergées du lac Saint-Pierre est Vallisneria americana, puisque celle-ci a été récoltée pour les analyses chimiques au plus grand nombre de stations, réparties sur toute la superficie du lac. La seconde espèce quant au nombre de stations où elle fut récoltée pour les analyses chimiques est Potamogeton richardsonii. Les métaux seront discutés un à un. La variabilité spatiale des contaminants ne sera discutée que pour les parties vertes des plantes submergées, les seules quantifiables en terme de biomasse par télédétection.

Cadmium. Les concentrations en Cd dans les plantes aquatiques submergées ne sont pas homogènes sur toute la superficie du lac. Les valeurs les moins élevées de Cd se retrouvent aux stations 10, 31 et 49, avec des valeurs de moins de 1 $\mu\text{g/g}$ dans les parties vertes, alors que les concentrations les plus élevées, de plus de 2 $\mu\text{g/g}$, se retrouvent aux stations 1, 11, 14 et 28, et de plus de 5 $\mu\text{g/g}$ à la station 19, toutes situées au nord de la voie maritime (fig. 4.4).

Chrome. Les concentrations en Cr les plus fortes dans les parties vertes de la vallisnérie se retrouvent surtout dans le sud du lac (stations #26 et 49), ainsi qu'aux stations au nord de la voie maritime (stations #1, 14, 19 et 47) qui ont toutes des concentrations supérieures à $5,0 \mu\text{g}$ de Cr/g de tissu sec; à la station 26, la concentration dépasse $9 \mu\text{g/g}$ (fig. 4.5). La valeur la plus élevée ($22 \mu\text{g/g}$) est retrouvée à la station 13, au sud du lac, chez les algues filamenteuses. Les concentrations les plus basses se retrouvent à la station 10.

Cuivre. Les valeurs de Cu les moins élevées sont notées à la station 10 pour les parties vertes des potamots et de la vallisnérie, avec des concentrations de moins de $10 \mu\text{g/g}$. Des valeurs de Cu supérieures à $30 \mu\text{g/g}$ dans les parties vertes sont détectées aux stations 26 (au sud du lac), ainsi qu'aux stations 19 et 28, au nord de la voie maritime (fig. 4.6). A la station 13, les concentrations de Cu chez les algues filamenteuses sont elles aussi élevées.

Nickel. La concentration de Ni la moins élevée se retrouve encore à la station 10, alors que dans la partie sud du lac, aux stations 16 et 26, les valeurs dans les parties vertes de la vallisnérie dépassent $20 \mu\text{g}$ de Ni/g de tissu sec, allant jusqu'à près de $46 \mu\text{g/g}$ de Ni à la station 26 (fig. 4.7).

Zinc. La station du lac ayant les plus faibles concentrations en Zn est la station 31, alors que des valeurs de plus de $200 \mu\text{g/g}$ se trouvent aux stations 19 et 13, et de plus de $300 \mu\text{g/g}$ à la station 26, les deux dernières étant situées dans la partie sud du lac (fig. 4.8).

Plomb. La concentration de Pb la moins élevée dans les parties vertes de la vallisnérie se trouve à la station 40, alors

qu'elle se trouve à la station 10 pour le potamot. Les plus hautes concentrations chez la vallisnérie, de plus de 6 $\mu\text{g/g}$, ont été dosées aux stations 45, 47 et 14, au nord de la voie maritime, ainsi qu'à la station 49 au sud. Il faut aussi souligner la très haute concentration, de plus de 17 $\mu\text{g/g}$, dosée chez les algues filamenteuses de la station 13, dans le sud du lac, et les hautes concentrations notées pour le potamot (plus de 18 $\mu\text{g/g}$) et le Nitella (plus de 9 $\mu\text{g/g}$) de la station 1.

En résumé, pour ce qui est de la variabilité spatiale de la contamination des parties vertes des plantes aquatiques par les métaux traces, nous constatons que:

- la station 10 peut servir de station "contrôle" dans le lac Saint-Pierre, vu les faibles concentrations pour tous les métaux dans les tissus végétaux récoltés à ce site;
- il semble y avoir deux "points chauds" de contamination par les métaux traces dans le lac, étant donné les hautes concentrations dosées dans les tissus végétaux:
 - la station 26, au sud du lac, où les concentrations de Cr, Ni, Zn et, dans une moindre mesure, de Cu sont élevées dans les parties vertes;
 - les stations 19 et 28, immédiatement au nord de la voie maritime, où se trouvent des concentrations élevées de Cd et de Cu dans les parties vertes des plantes submergées.
- dans une moindre mesure, il faudrait retenir aussi les stations 1, 47 et 49, qui montrent des concentrations élevées de Cr et de Pb dans les parties vertes des plantes analysées.

4.6.3 Variabilité temporelle (août-octobre) des concentrations en contaminants.

Lors de l'échantillonnage du mois d'octobre, à cause du degré de décomposition avancée ou de la disparition de certaines espèces à plusieurs sites, et dû aussi à la non-correspondance directe de quelques stations visitées par rapport à celles du mois d'août, les plantes dosées pour les métaux traces peuvent différer. Les stations et les plantes récoltées pour le dosage des métaux traces lors de l'échantillonnage du mois d'octobre sont les suivantes:

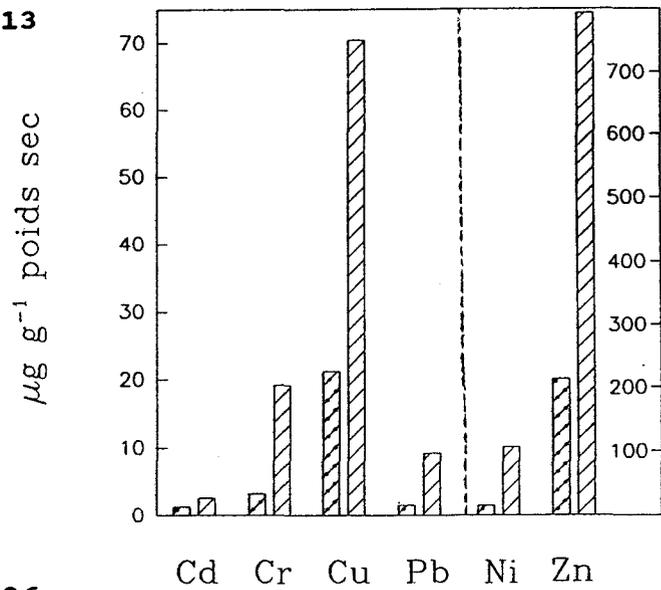
Station	Plantes
11	<u>Nitella</u>
13	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u>
14	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u> , <u>Potamogeton</u> , <u>Alisma</u>
26	<u>Vallisneria</u>
31	<u>Vallisneria</u> , <u>Potamogeton</u> , <u>Heteranthera</u>
35	<u>Vallisneria</u>
44	<u>Nitella</u> , <u>Myriophyllum</u>
45	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u>
46	<u>Elodea</u>
47	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u>
48	<u>Vallisneria</u>
49	<u>Vallisneria</u> , <u>Heteranthera</u> , <u>Myriophyllum</u>
50	<u>Vallisneria</u>

Les résultats des dosages, exprimés en concentrations ($\mu\text{g/g}$ de tissu sec), sont présentés à l'annexe 7. Si ces résultats sont comparés avec ceux obtenus pour le mois d'août (annexe 7), nous pouvons noter qu'il y a une augmentation générale des concentrations en métaux chez les plantes aquatiques récoltées au mois d'octobre. Cette augmentation en métaux traces peut être visualisée à la fig. 4.10 pour les parties vertes de la vallisnérie récoltée à trois stations dans le lac Saint-Pierre, en août et en octobre 1990. Pip (1990) rapporte que les changements saisonniers dans les concentrations en métaux traces

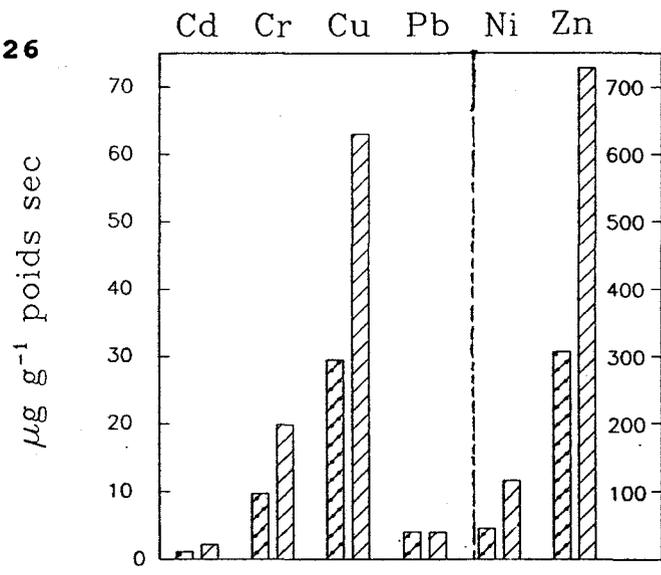
Figure 4.10: Comparaison des concentrations ($\mu\text{g/g}$ tissu poids sec) en Cd, Cr, Cu, Pb, Ni et Zn, dosées dans les parties vertes de Vallisneria americana récoltées aux stations 13, 26 et 47 du lac Saint-Pierre, en août (///) et en octobre (///) 1990.

Porter attention aux changements d'échelle, à gauche et à droite du graphique.

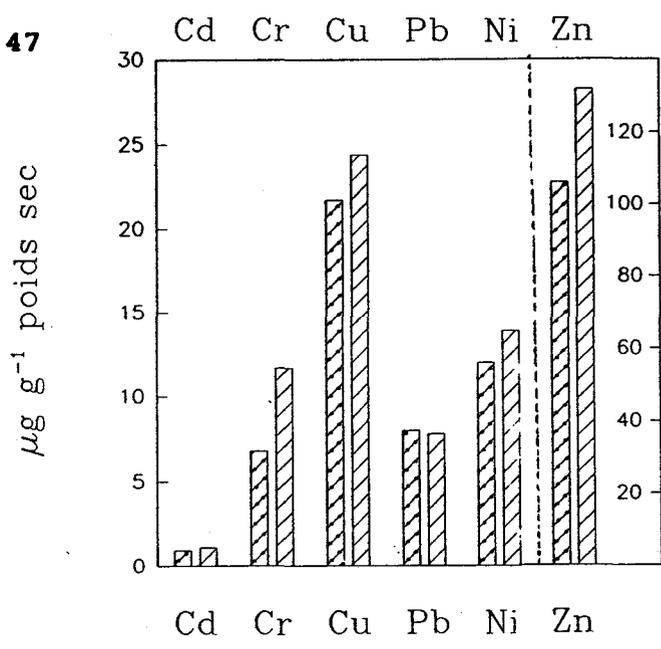
Station 13



Station 26



Station 47



chez les plantes aquatiques submergées sont très variables. Cependant, des concentrations en métaux traces plus élevées ont également été notées par Lyngby et Brix (1982) chez une plante submergée marine à la toute fin de la saison de croissance. Due à un accroissement de la biomasse pendant la saison de croissance active, il y a un effet de dilution des concentrations en métaux. Des concentrations maximales en métaux traces sont donc notées lorsque la croissance cesse, et qu'il y a prise en charge de métaux sans accroissement de la biomasse.

Il faut aussi noter les concentrations élevées en métaux traces, particulièrement en Cr, Cu, Ni et Zn, dans les tissus des plantes aquatiques submergées récoltées à la station 35 (qui fut ajoutée à l'échantillonnage du mois d'octobre), comparativement aux autres stations.

4.7 Estimé du contenu total en contaminants dans les plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre.

Les détails de l'analyse géostatistique se trouvent en annexe au présent rapport (annexe 8). Les figures 4.11 et 4.12 présentent les cartes des valeurs krigées pour le Cu et le Pb, avec les quantités de métaux dans chaque sous-unité du lac de 4 X 4 km². Ces quantités de métaux sont le reflet des concentrations trouvées pour chaque espèce, pondérées par la biomasse associée à chacune de ces espèces. Les cartes des valeurs krigées pour les autres métaux sont en annexe (annexe 8).

Un gradient semble se dessiner de l'amont vers l'aval pour les quantités de métaux dans les parties vertes des plantes

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

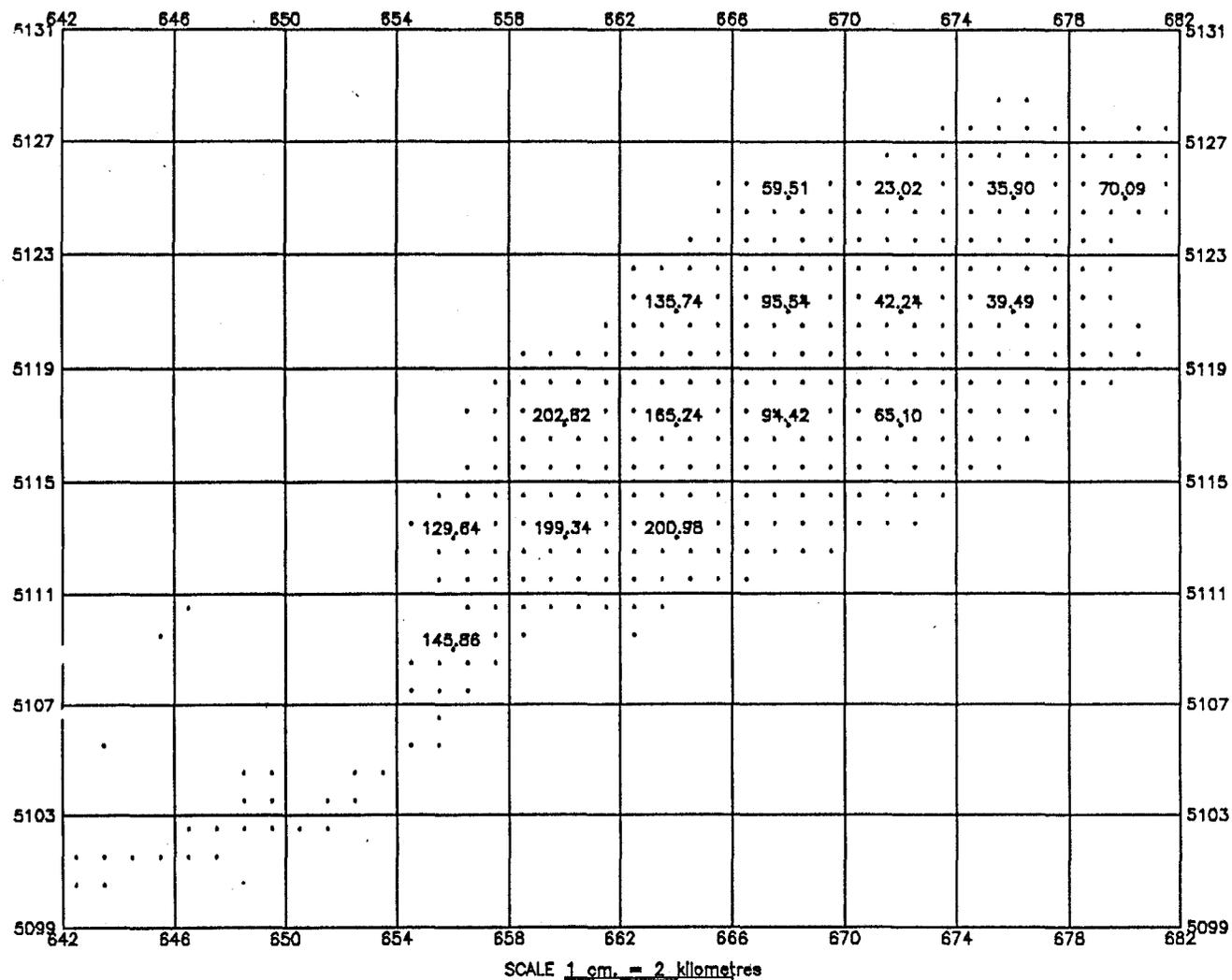


Figure 4.11: Carte des valeurs krigées des quantités de Cu (en mg/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

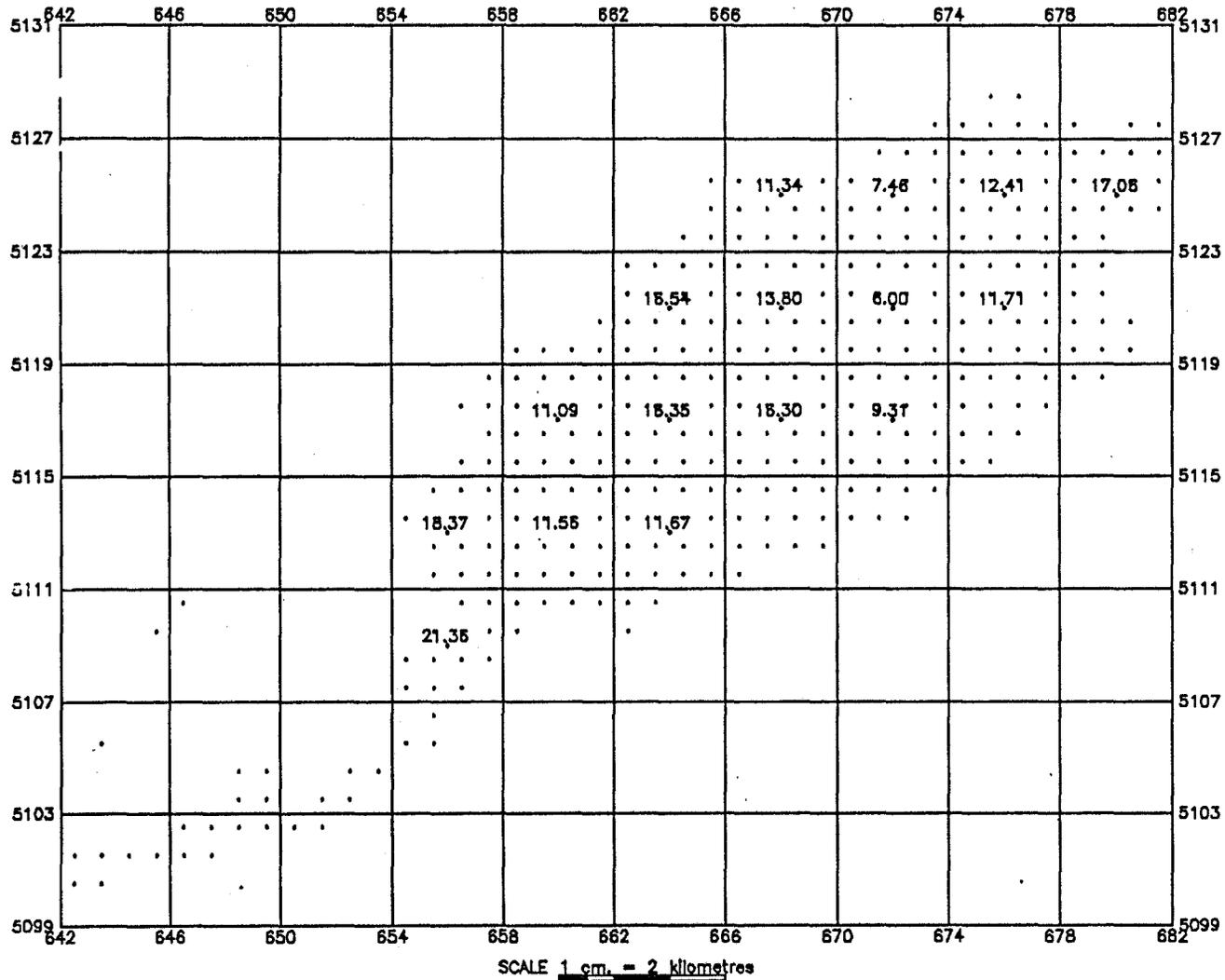


Figure 4.12: Carte des valeurs krigées des quantités de Pb (en g/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

submergées du lac Saint-Pierre (figures 4.11 et 4.12; annexe 8). Deux raisons pourraient en partie expliquer ce gradient:

i) Intuitivement, une relation empirique se devine entre les concentrations de métaux dans les sédiments et dans les plantes aquatiques (Jackson et al., 1991). Puisqu'un gradient dans la contamination des sédiments en métaux traces semble aussi exister de l'amont vers l'aval (Hardy et al., 1991), il n'est pas surprenant que les concentrations de métaux dans les plantes suivent la même tendance;

ii) Comme mentionné précédemment, il semble également y exister un gradient dans la biomasse, plus importante en amont qu'en aval, d'où des quantités de métaux dans les parties vertes des plantes plus grandes en amont qu'en aval.

La quantité totale de biomasse des parties vertes des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre en août 1990 ainsi que la quantité totale de métaux associés ont été calculées à partir des résultats de krigeage obtenus pour des unités de 4 X 4 km² délimitant la zone d'estimation du lac. Les résultats finaux sont présentés au tableau 4.9 (voir annexe 8 pour tous les détails). Bien que cette analyse géostatistique couvre un grand pourcentage de la superficie du lac occupée par des herbiers de plantes aquatiques, il faut noter que les quantités de métaux traces rapportées dans le tableau 4.9 sont sous-estimées puisque i) toutes les plantes, ainsi que les métaux associés, de la partie des îles de Sorel, en amont du lac, n'ont pas été inclus dans ce bilan; et ii) le lac ayant été découpé en zone d'estimation de 4 X 4 km² pour les besoins de l'analyse géostatistique, une certaine partie de la biomasse située dans la partie sud du lac a dû être retirée, qui ne représente toutefois qu'une petite partie du lac.

Tableau 4.9: Résultats d'estimation de la quantité totale de biomasse et de la quantité totale de métaux associés aux parties vertes des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, en août 1990.

Variable	Unité	Quantité totale	Ecart-type global relatif*
BIOMASSE	kg	22,810,122	± 2,4%
CADMIUM	kg	36	± 26%
CHROME	kg	98	± 17%
CUIVRE	kg	557	± 23%
NICKEL	kg	314	± 18%
PLOMB	kg	69	± 32%
ZINC	kg	2,580	± 20%
MANGANESE	kg	73,362	± 43%
FER	kg	57,543	± 16%
CALCIUM	kg	653,255	± 17%

* Calculé en supposant que les données de biomasse obtenues par télédétection sont sans erreur (voir annexe 8).

4.8 METAUX - SYNTHESE

- Dans le lac Saint-Pierre, sauf pour le Pb, la vallisnérie bioconcentre davantage les métaux traces dans ses parties vertes, si comparée aux autres plantes aquatiques.
- Les concentrations moyennes de Cd, Cr, Ni et Zn dans les parties vertes de la vallisnérie du lac Saint-Pierre excèdent les valeurs médianes rapportées par Outridge et Noller (1991) pour ces concentrations dans des plantes aquatiques provenant de sites contaminés.
- Quelques stations d'échantillonnage se démarquent quant aux concentrations de métaux traces dosées dans les parties vertes des plantes aquatiques submergées: i) la station 10 montre de faibles concentrations pour tous les métaux, ii) la station 26 montrent des concentrations élevées en Cr, Ni, Zn et Cu, iii) les stations 19 et 28 montrent des concentrations élevées en Cd et Cu et iv) dans une moindre mesure, de hautes concentrations en Cr et Pb se retrouvent aux stations 1, 47 et 49.
- Un gradient dans la contamination des parties vertes des plantes aquatiques semble se dessiner de l'amont vers l'aval dans le lac Saint-Pierre, probablement dû à l'éloignement des sources de contamination en métaux, lesquelles sont localisées surtout en amont du lac.
- Les concentrations en métaux traces dans les parties vertes des plantes submergées récoltées au mois d'octobre sont supérieures à celles dosées dans les parties vertes des plantes échantillonnées au mois d'août.

5.0 DISCUSSION GENERALE

Bilan massique

Le rôle des plantes aquatiques submergées dans le cycle des nutriments, des métaux traces et des composés organiques de bassins d'eau plus ou moins grands a déjà attiré l'attention de divers auteurs. Les plantes peuvent concentrer ces éléments dans leurs tissus et donc pourraient jouer un rôle non négligeable dans l'entreposage et la remise en circulation de divers composés. A partir de données sur la biomasse des espèces végétales submergées et de leur contenu en divers éléments, Brix et Lyngby (1983), Gobas et al. (1991), Landers (1982), McIntosh et al. (1978), Peverly (1985), Varenko et Chuiko (1971) et Vicars (1976) ont évalué l'influence que pouvaient avoir les plantes aquatiques submergées sur le cycle saisonnier de ces éléments.

Dans un premier temps, en visant une photographie instantanée du lac, nous avons voulu comparer les quantités de métal entreposées dans les macrophytes submergés avec celles présentes dans la colonne d'eau ou encore dans les sédiments récents. Pour estimer les quantités dans l'eau du lac, nous avons multiplié le volume du lac (c'est-à-dire le volume correspondant au secteur krigé: $6.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ [superficie de la zone d'estimation: $256 \text{ km}^2 \times$ profondeur moyenne: 2.5 m]) par les concentrations de chaque métal (valeurs moyennes pour le métal dissout, rapportées par Lum et al. (1991) pour leur station #243 située à Les Grèves, dans la région de Lanoraie, en amont du lac Saint-Pierre et des industries de Sorel). De même, pour estimer les quantités de métal présentes dans la couche de sédiments mobiles, nous avons employé une valeur de $27,1 \text{ kg}$ de sédiment par m^2 (Dr R. Carignan, INRS-Eau,

communication personnelle); en multipliant cette valeur par la superficie du lac étudié, et en utilisant une concentration moyenne de métaux traces dans la partie argile + limon de la couche superficielle des sédiments de fond (selon Hardy et al. (1991), qui ne comprend toutefois pas la partie sud du lac, ce qui pourrait conduire à une sous-estimation de la valeur réelle), nous avons pu estimer grossièrement les quantités de métal présentes dans ce compartiment géochimique (annexe 9). Selon cette comparaison (tableau 5.1), les quantités de métal stockées dans les plantes aquatiques (tableau 4.9) à un instant donné sont supérieures à celles dissoutes dans la colonne d'eau pour le Cd, le Pb et le Zn, mais nettement inférieures à celles retrouvées dans les sédiments mobiles pour les six métaux rapportés dans ce tableau.

Dans un second temps, afin d'évaluer l'effet des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre sur la dynamique saisonnière des métaux traces dans le lac, nous devons comparer les quantités de métaux retenues dans les parties vertes des plantes pendant la saison de croissance (valeurs rapportées au tableau 4.9) aux apports entrant dans le lac. Pour évaluer les quantités de métaux entrant dans le lac Saint-Pierre, nous avons retenu les données rapportées par Lum et al. (1991), qui proviennent d'une campagne d'échantillonnage ayant eu lieu du 15 juin au 1 juillet 1987 à Les Grèves, en amont de Sorel. La période de croissance des macrophytes dans le lac Saint-Pierre s'étend globalement de juin à septembre (120 jours). Les débits massiques de métaux traces entrant dans le lac avec les eaux du fleuve peuvent être calculés en considérant la concentration dissoute du métal dans l'eau (la fraction la plus biodisponible) et le débit du fleuve en période estivale, pendant la période de croissance active des macrophytes (120 jours). Les résultats de ce calcul approximatif sont rapportés au tableau 5.2. Les valeurs dans ce dernier tableau

Tableau 5.1: Calcul des quantités approximatives de métaux traces, pour un temps donné, dans l'eau (Lum et al., 1991), dans les sédiments mobiles (Hardy et al., 1991; Carignan, communication personnelle (annexe 9)) et dans les plantes aquatiques submergées (tableau 4.9) du lac Saint-Pierre.

Dans la zone d'estimation:

Volume d'eau: $6,4 \times 10^8 \text{ m}^3$

Sédiment mobile: $6,9 \times 10^9 \text{ kg}$

Métaux traces	Concentration moyenne		Quantités de contaminants (kg)		
	dissoute ($\mu\text{g/L}$)	sédiment (limon+argile) ($\mu\text{g/g}$)	Eau	Sédiment	Plantes
Cd	0,011	<2,5	7,0	$<1,7 \times 10^4$	36
Cr	-	240	-	$1,7 \times 10^6$	98
Cu	0,83	106	530	$7,3 \times 10^5$	557
Ni	0,58	69	370	$4,8 \times 10^5$	314
Pb	0,013	48	8,3	$3,3 \times 10^5$	69
Zn	0,94	287	600	$2,0 \times 10^6$	2580

Tableau 5.2: Calcul de la quantité relative de métaux traces retenue dans les parties vertes des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre à l'été 1990 par rapport (a) aux quantités totales de métaux dissous entrant dans le lac (tirées de Lum et al., 1991) et (b) aux quantités de métaux affectant directement les herbiers, en retirant du calcul les volumes d'eau transitant par les chenaux du lac, où il n'y a pas d'herbiers.

(a)	Débit de l'eau (période estivale)		$1,07 \times 10^9$ m ³ /jour	
(b)	Débit de l'eau affectant les herbiers (35% du débit total)		$3,75 \times 10^8$ m ³ /jour	
		(a)		(b)
Métaux traces	Débit massique pour 120 jours (kg)	% retenue par les plantes	Débit massique pour 120 jours (kg)	% retenu par les plantes
Cd	1,420	2,5%	495	7,3%
Cu	107,000	0,5%	37,400	1,5%
Ni	74,500	0,4%	26,100	1,2%
Pb	1,670	4,1%	585	11,8%
Zn	120,000	2,2%	42,300	6,1%

indiquent que le compartiment "macrophytes" à l'intérieur du système du lac Saint-Pierre retiendrait 0,4% du Ni dissous dans l'eau qui passe dans le lac durant l'été, 0,5% du Cu, 2,2% du Zn, 2,5% du Cd et 4,1% du Pb, au maximum de la période de croissance. Cependant, de la quantité d'eau qui entre dans le lac, seulement une partie affectera directement les herbiers, une grande quantité empruntant les chenaux (voie maritime, chenaux nord et sud) où il n'y a pas d'herbiers. Pendant la période estivale, environ 65% de l'eau entrant dans le lac Saint-Pierre s'engagera dans ces chenaux (Paul Boudreau, affiliation: INRS-Eau, communication personnelle, juin 1991; calculé à partir du logiciel PANACHE en utilisant la fonction courant). Le calcul obtenu du pourcentage de métaux traces retenu par les parties vertes des plantes aquatiques, en retirant le volume d'eau qui transite par les chenaux où il n'y a pas d'herbiers, est indiqué au tableau 5.2, et donne cette fois 7,3% pour le Cd, 1,5% pour le Cu, 1,2% pour le Ni, 11,8% pour le Pb et 6,1% pour le Zn. Il faut souligner la limitation de ces résultats, étant donné que les concentrations de métaux dissous dans l'eau, telles que rapportées par Lum et al. (1991), ne représentent pas les concentrations retrouvées à l'entrée du lac tout au long de la période estivale, mais proviennent d'un relevé fixe dans le temps et dans l'espace. Signalons de plus que ce calcul ne tient pas compte d'apports provenant des tributaires du lac Saint-Pierre.

Les pourcentages plutôt faibles de métaux retenus dans les tissus végétaux, relativement aux quantités entrant dans le lac, indiquent que l'effet direct des plantes aquatiques submergées sur le budget total des métaux transitant dans le lac est négligeable. De tels pourcentages faibles ont déjà été observé dans d'autres bassins d'eau, pour d'autres espèces de plantes submergées (McIntosh et al., 1978; Manny et al., 1991;

Wassermann et al. 1991). Cependant, il est évident que les macrophytes changent la dynamique de ces métaux dans le lac (Hill, 1979). La prise en charge de métaux par les macrophytes accroît le temps de résidence de ces métaux dans le lac. De plus, la présence des plantes aquatiques peut physiquement accroître également le temps de résidence des métaux associés à la matière particulaire en suspension en réduisant la vitesse du courant de l'eau qui passe au travers des herbiers, favorisant ainsi une sédimentation (transitoire).

Les macrophytes comme bioindicateurs

La plante la plus indiquée pour refléter la variabilité spatiale de la concentration en métaux traces est la vallisnérie américaine (Vallisneria americana) qui est présente à la grandeur du lac, dans toutes les associations végétales et dans tous les types d'eau. De plus, sauf pour le Pb, la vallisnérie en général bioconcentre davantage les métaux traces dans ses parties vertes si comparé aux autres plantes submergées enracinées du lac, particulièrement au Potamogeton richardsonii. Bien qu'il y ait beaucoup de variabilité dans les valeurs de référence (Outridge et Noller, 1991), les concentrations moyennes de Cd, Cr, Ni et Zn dosées dans les parties vertes de la vallisnérie du lac Saint-Pierre excèdent les valeurs médianes de ces concentrations pour des plantes aquatiques provenant de sites contaminés (fig. 4.3). Cependant, les concentrations en métaux traces dans les plantes aquatiques submergées ne sont pas homogènes sur toute la superficie du lac Saint-Pierre, mais peuvent être localement faibles ou plus grandes, selon les masses d'eau dans lesquelles les plantes baignent. A partir des valeurs ponctuelles de contenu en métaux traces, il nous semble y avoir deux "points

chauds" de contamination, soient le sud-ouest du lac (station 26) avec des concentrations élevées en Cr, Cu, Ni et Zn dans les parties vertes si comparées aux plantes du restant du lac, et une autre zone plus centrale, au nord-ouest de la voie maritime (stations 19 et 28) avec des concentrations élevées en Cd et en Cu, si comparées au restant du lac.

Leclerc et collaborateurs (1991) ont récemment modélisé les écoulements hydrodynamiques du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre, au sud du lac, pour tous les événements hydrologiques probables qui peuvent survenir pendant l'année (en fonction des débits du fleuve Saint-Laurent et des tributaires de la rive sud du lac Saint-Pierre, de la vitesse du vent et de l'état de la végétation aquatique submergée [croissance minimale, maximale, absence]). Nous avons superposé nos stations d'échantillonnage à ces profils d'écoulement (fig. 5.1) pour l'"événement" hydrodynamique le plus fréquemment observé pendant l'été. Cet événement est caractérisé par les variables suivantes: débit du Saint-Laurent: 9,240 m³/s; de la rivière Richelieu: 172 m³/s; Saint-François: 59 m³/s; Yamaska: 15 m³/s et Nicolet: 30 m³/s; vitesse du vent nulle et croissance maximale des macrophytes. Les stations 21, 26 (pour laquelle on dispose de données sur les concentrations en métaux traces) et 30 sont situées à la limite du mélange des eaux du fleuve et celles de la rivière Richelieu, et sont fort probablement affectées par les rejets en provenance des usines de Sorel-Tracy, ce qui expliquerait les hautes concentrations en métaux qui s'y trouvent. Quant aux stations 19 et 28, selon la fig. 5.1, elles subirait l'influence de sources situées plus en amont, vraisemblablement dans la région montréalaise (Lum et al., 1991).

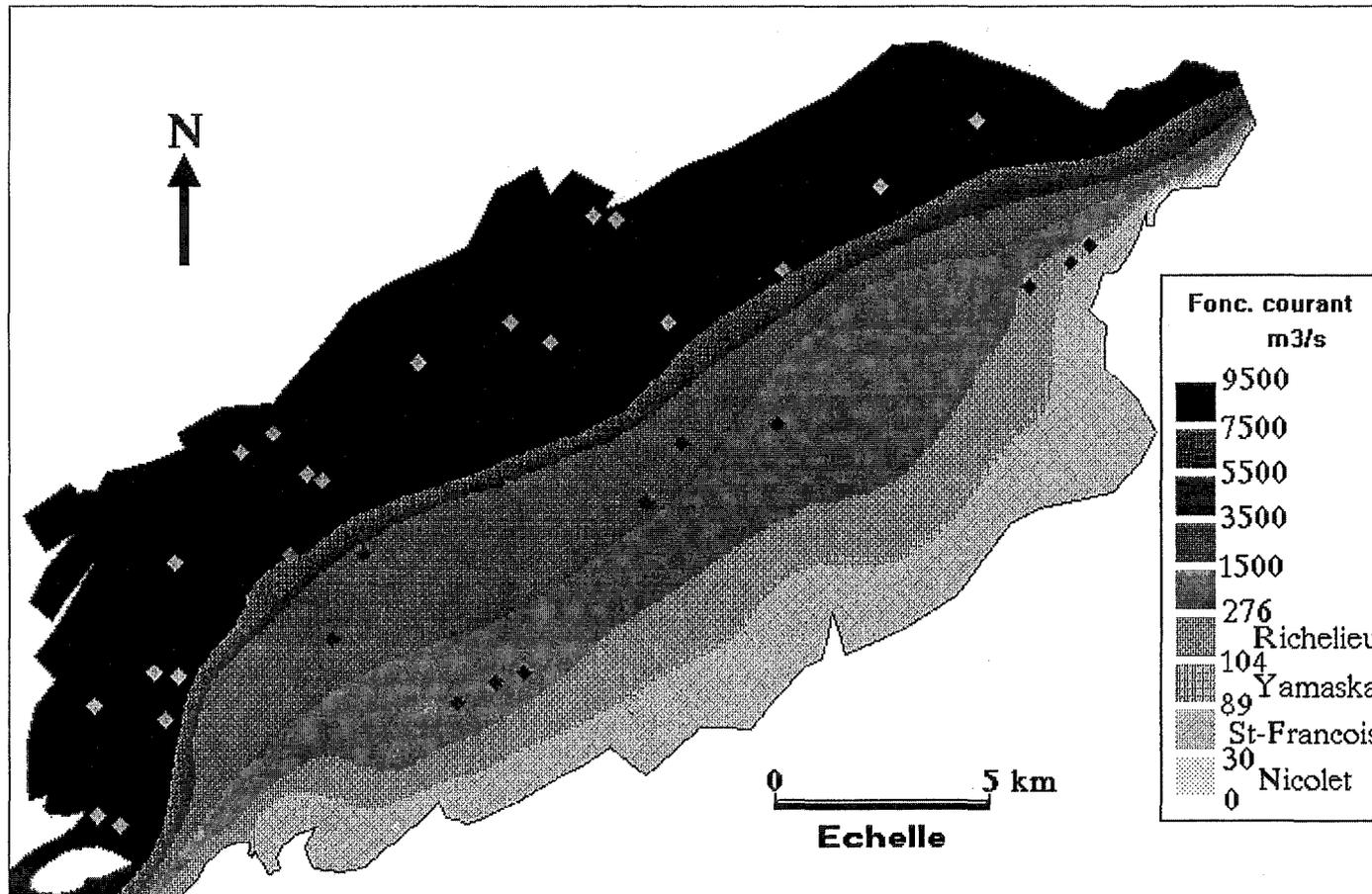


Figure 5.1: Carte des profils d'écoulement des eaux du fleuve Saint-Laurent et des tributaires sud du lac Saint-Pierre, selon Leclerc et collaborateurs (1991), pour l'"événement" hydrodynamique le plus fréquemment observé pendant l'été. Noter qu'il y a sommation des débits, de la rive sud à la rive nord. Pour les numéros des stations, voir la fig. 2.1.

Les plus faibles teneurs en métaux traces dans les parties vertes des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre ont été décelées aux stations situées le long de la rive nord du lac, la station 10 pouvant servir de station contrôle. Ceci est en accord avec les données de Hardy et al. (1991) qui rapportent que les indices de contamination des sédiments de fond superficiels les plus faibles de toute leur zone d'étude, avec les plus faibles teneurs en contaminants, se manifestaient dans le secteur nord du lac.

Il faut noter les hautes concentrations de Pb dans les parties vertes de la vallisnérie provenant de la station 47, située dans une baie de l'île aux Corbeaux, ainsi que dans les parties vertes du potamot de richardson de la station 1, à l'extrémité nord-est du lac. Selon Sérodes (1978), le Pb proviendrait essentiellement des gaz d'échappement de moteurs hors-bord et des munitions de chasse. La contamination du sédiment par le Pb peut être considérée, avec celle par le Hg, comme le plus grave risque d'intoxication métallique pour les ressources biologiques du fleuve (Sérodes, 1978). Si la vallisnérie, selon les données obtenues dans cette étude, semble un meilleur bioaccumulateur de métaux traces (tels que le Cd, Cr, Cu, Ni...) dans les parties vertes que les autres espèces végétales retrouvées dans le lac, il en va autrement pour le Pb; ce sont les potamots qui bioconcentrent davantage le Pb dans leurs parties vertes. De même, Crowder et al. (1989) rapportent que dans la baie de Quinte, lac Ontario, le myriophylle bioaccumule beaucoup plus de Pb (jusqu'à 9.6 ppm) à des sites où ce métal demeure indétectable chez la vallisnérie (< 1 ppm).

Les algues filamenteuses retrouvées en plusieurs endroits dans le lac Saint-Pierre présentaient de hautes concentrations

en Cr, Cu et Pb. Les algues filamenteuses sont souvent rapportées dans la littérature pour accumuler de grandes quantités de métaux, lorsque comparées aux autres plantes submergées d'un même plan d'eau. Ceci est vrai par exemple pour Cladophora, qui est une algue filamenteuse verte fréquemment recensée dans les eaux douces, et qui accumule souvent plus de métaux traces que les autres plantes du même plan d'eau (Sawidis et al., 1991; Wells et al., 1980). Cependant, comme le mentionne Gale et al. (1973) et Leland et McNurney (1974), il s'agit de savoir si ces métaux sont réellement absorbés/adsorbés par la plante, ou s'y trouvent simplement en association étroite avec elle. Les tapis d'algues filamenteuses peuvent capturer les métaux traces en suspension dans l'eau et les retenir. Le cuivre, le chrome et le plomb s'adsorbent facilement à cette matière particulaire en suspension dans l'eau et seraient alors retenus entre les filaments des algues, sans toutefois traverser la membrane biologique. Les techniques de lavage utilisées ne permettent pas de déloger complètement ces particules contaminées qui sont digérées et dosées avec les tissus végétaux. Cependant, en retenant ces particules en suspension entre ses filaments, les algues filamenteuses jouent certainement un rôle dans la rétention de ces métaux traces, jusqu'à ce que la plante se décompose et relâche le matériel inorganique qui s'y était associé.

Variabilité saisonnière

La rétention des métaux traces dans les tissus végétaux ne semble que temporaire. A l'automne, le lac Saint-Pierre se vide pour ainsi dire de ses plantes aquatiques submergées, qui se décomposent et sont entraînées vers l'aval avec le courant.

A la fin du mois d'octobre, nous estimions pour le lac Saint-Pierre une perte de biomasse végétale submergée de l'ordre de 90%. Il est à prévoir qu'au printemps suivant, il ne restera plus rien de la flore submergée de l'année précédente, si ce n'est des graines et des turions qui représentent une faible proportion de la biomasse des plantes. Les turions sont des organes souterrains qui entrent en dormance à l'automne et permettent une propagation végétative de la plante le printemps suivant.

Selon nos observations à l'automne 1990, les grands tapis de Nitella, situés en bordure des chenaux au courant rapide, surtout dans le nord du lac, se retiraient moins vite que les autres plantes submergées dominantes (vallisnérie, potamots, algues filamenteuses...). Harding et Whitton (1978) rapportaient que des plantes telles que le Nitella, qui est une algue et n'a donc pas de vraies racines et qui accumulent les métaux majoritairement, sinon entièrement, de la colonne d'eau, peuvent influencer les sédiments de deux façons différentes. Si la plante est incorporée rapidement aux sédiments à la fin de la saison de croissance, enterrée au fond du lac, alors les métaux deviennent partie des sédiments; d'autre part, si la plante n'est pas incorporée aux sédiments, elle se décompose et alors les métaux sont relâchés avec les tissus végétaux dans l'eau du lac. Dans ces zones du lac Saint-Pierre, le pourcentage de matière organique des sédiments, rapporté par Hardy et al. (1991), est de l'ordre de 1 à 4%; d'autre part, des observations de terrain dans cette partie du lac au courant rapide laisse croire à un sédiment dur, peu organique. Il est donc probable que la très grande partie du Nitella ne soit pas incorporée aux sédiments, mais soit disséminée dans la colonne d'eau.

Lors de l'échantillonnage de la fin du mois d'octobre, de gros amas de morceaux de plantes, surtout des feuilles de vallisnérie, flottaient à la surface de l'eau et étaient entraînés vers la sortie du lac. A cette période de l'année, déjà les potamots et les algues filamenteuses étaient presque totalement disparus, la vallisnérie grandement réduite. Ainsi, les métaux traces bioaccumulés dans les parties vertes des plantes submergées du lac au cours de l'été seraient remis en circulation dans la colonne d'eau à l'automne. La décomposition des tissus végétaux retournerait dans la colonne d'eau les métaux qui y sont associés. Les métaux traces associés aux parties souterraines, qui se décomposent elles-aussi, excepté pour des organes tels que les turions, resteront vraisemblablement dans les sédiments, liés à la matière organique jusqu'à la décomposition totale de celle-ci. Bien que la biomasse des racines soit faible comparée à celle des parties vertes, les concentrations en métaux traces y sont souvent supérieures.

La dérive des parties vertes des plantes vers l'extérieur du bassin d'eau à l'étude à la fin de la saison de croissance, là où la vallisnérie est reconnue comme une espèce dominante comme au lac Saint-Pierre, a déjà été rapportée dans la littérature (Manny et al., 1991; Vicars, 1976). Vicars (1976), dans le secteur d'eaux douces de l'estuaire de la rivière Pamlico, Caroline du Nord, E.U., a récolté les débris de plantes de l'année flottant sur l'eau, en laissant traîner un grillage à l'arrière d'un bateau. Les quantités recueillies étaient exprimées en grammes de débris de plantes par unité d'effort (minutes) de collecte. Il en a conclu que la biomasse flottante s'accroissait de beaucoup à l'automne, après que la biomasse maximale des plantes aquatiques submergées soit atteinte et que les plantes commencent à se décomposer. Le

maximum de ces débris flottants récoltés par effort de collecte se situait en octobre et en novembre. Selon Vicars (1976), la très grande majorité de la biomasse des plantes aquatiques submergées vivant dans l'estuaire au cours de l'été était perdue en débris flottant entre août et novembre.

Manny et al. (1991) ont quantifié la perte en biomasse, ainsi que des métaux associés, des plantes aquatiques qui dérivait dans la rivière Détroit, du lac Saint-Clair vers le lac Erié. Les débris flottants furent ramassés de mai à octobre. La dérive des débris de plantes de l'année, majoritairement de la vallisnérie, passait par un maximum en octobre. Par ailleurs, des débris de plantes mortes étaient ramassées en grandes quantités au mois de mai, ceux-ci représentant vraisemblablement la croissance végétale de l'été précédent. Bien que ces débris de plantes montraient un enrichissement appréciable en métaux traces relativement aux concentrations de ces métaux retrouvées dans l'eau, particulièrement pour le Cd et le Pb, la quantité de chacun des 8 métaux étudiés associés aux tissus végétaux exportée annuellement par la rivière Détroit était faible relativement à celle transportée par l'eau de la rivière. Ainsi, les quantités de métaux traces transportées par les débris de plantes qui dérivent avec le courant ne représentent qu'une petite fraction de la quantité totale de chacun de ces métaux qui entre dans le lac Erié via la rivière Détroit chaque année. Cette conclusion s'appliquerait également au lac Saint-Pierre où les métaux traces associés aux tissus végétaux ne représentent qu'une faible partie de la quantité totale qui transite par le lac. L'étude de Manny et al. (1991) sur une partie des Grands-Lacs et la nôtre sur une section du fleuve Saint-Laurent arrivent à la même conclusion que bien que les plantes aquatiques submergées bioconcentrent effectivement les

métaux traces dans leurs tissus, les quantités totales retenues sont presque négligeables lorsque comparées aux quantités qui transitent annuellement dans ces cours d'eau. Cependant, comme le mentionne Manny et al. (1991), si ce matériel végétal en décomposition dans le lac lui-même ou en dérive est pour être ultérieurement consommé par divers animaux (canards, poissons, macroinvertébrés benthiques) qui se nourrissent de macrophytes, alors la bioaccumulation devient écologiquement significative. Les métaux traces dans les tissus végétaux sont beaucoup plus biodisponibles pour les consommateurs que les métaux dans les sédiments. Le transfert des métaux traces des plantes aux animaux a cependant été peu étudié jusqu'à présent. Une évaluation de ce transfert le long de la chaîne trophique nous indiquerait si les métaux stockés dans les plantes aquatiques submergées représentent un réservoir biologique significatif ou non.

Si, à la fin du mois d'octobre, il ne reste que très peu de la biomasse végétale submergée dans le lac Saint-Pierre en soit, il semble en être autrement dans la région des îles de Sorel. Aux stations situées dans le lac mais tout près des îles, de même que dans les baies et dans les chenaux entre les îles, la perte de biomasse végétale était beaucoup moins marquée. D'ailleurs, les pourcentages de matière organique dans les sédiments sont supérieurs à 5% dans cette région (Hardy et al., 1991 et INRS-Eau, données non publiées). Les plantes aquatiques s'y décomposeraient plus sur place, avec une plus grande partie des tissus végétaux non pas exportée vers l'aval, mais déposée au fond. Alors, les métaux absorbés par les parties vertes des macrophytes peuvent éventuellement être incorporés aux sédiments de fond après la décomposition des plantes et contribuer ainsi au transport des métaux de l'eau vers les sédiments.

6.0 RECOMMANDATIONS

- Dans la présente étude, le secteur sud du lac Saint-Pierre n'a été que partiellement caractérisé. Soulignons, cependant, que les quelques plantes récoltées dans ce secteur se sont avérées parmi les plus contaminées (Cu, Cr, Ni, Zn). Afin de mieux connaître ce secteur souvent négligé, il est recommandé pour les études ultérieures que le secteur sud du lac soit étudié en détail quant aux concentrations de métaux traces dans les plantes aquatiques submergées. Un arrangement avec la base militaire de Nicolet devrait être négocié pour y permettre un échantillonnage sécuritaire.
- Tout comme le sud du lac Saint-Pierre, le secteur des îles de Sorel a aussi été moins étudié, cette fois-ci à cause du réseau complexe de canaux étroits entre les îles. Nous n'avons obtenu aucune donnée de la biomasse totale des plantes aquatiques de ce secteur au mois d'août, de même qu'aucune quantification de la quantité totale de métaux y étant associée, les analyses géostatistiques y étant difficilement réalisables. Si on voulait bien cerner cette région du lac, il faudrait modifier sensiblement le plan d'échantillonnage (ex.: densité de stations plus élevée; recourir à des relevés d'échosondage plutôt qu'à la télédétection).
- Etant donné que l'estimation de la biomasse totale des végétaux submergés du lac par télédétection à l'aide des données au sol ne s'est faite qu'à partir des stations où un relevé quantitatif de la biomasse avait été effectué (collecte des plantes), il est recommandé dans les études ultérieures qu'un estimé quantitatif de la biomasse soit effectué à chaque station (quitte à réduire le nombre total de stations, si nécessaire).

- Toujours au sujet de l'estimation de la biomasse totale des plantes submergées et de la répartition spatiale de cette biomasse, et compte tenu de l'existence pour l'année 1990 de données complémentaires (obtenues par échosondage), il serait particulièrement intéressant de comparer les résultats obtenus par les deux approches.

- Selon les résultats de la présente étude, la vallisnérie offre un potentiel intéressant comme indicateur de la biodisponibilité des métaux traces dans le fleuve (ex.: espèce omniprésente, apte à bioconcentrer plusieurs métaux de son milieu). En effet, elle affiche un rapport de bioconcentration ($[M]_{\text{plante}}/[M]_{\text{milieu}}$) intéressant pour tous les métaux, sauf le Pb. Cependant, avant de l'adopter comme espèce biosentinelle, il faudrait quantifier les relations qui existent entre les concentrations en métaux traces dans le milieu ambiant (eau; sédiments) et celles chez la plante.

- Quoique plusieurs auteurs aient suggéré que les plantes aquatiques pourraient constituer un réservoir de métaux "biodisponibles", très peu d'études ont été réalisées sur le transfert trophique des métaux à partir des plantes aquatiques jusqu'aux consommateurs immédiats. Une telle étude permettrait d'évaluer l'importance réelle des plantes aquatiques comme réservoir biologique de métaux traces.

7.0 REFERENCES

- Adams, M.S. et T. Gustafson, 1977. Macrophyte mapping. Dans: J.P. Scherz, éd. Assessment of aquatic environments by remote sensing. Institute for Environmental Studies, Report No 84, University of Wisconsin, Madison. pp. 135-149.
- Aiken, S.G., P.R. Newroth et I. Wile, 1979. The biology of Canadian weeds. 34. Myriophyllum spicatum L. Can. J. Plant Sci., 59: 201-215.
- Anderson, M.R. et J. Kalff, 1986. Regulation of submerged aquatic plant distribution in a uniform area of a weedbed. J. Ecol., 74: 953-961.
- Béland, J., 1974. Etude de la qualité des eaux, fleuve Saint-Laurent. Tronçon Varennes - Montmagny. Service de Protection de l'Environnement. Rapport rédigé en collaboration avec Envirolab Inc. 256p.
- Béland, J. et R. Demers, 1977. La teneur en substances toxiques dans les plantes aquatiques et les facteurs limitant leur croissance. Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent. Rapport technique No 8. Béland et Demers Inc., 179p.
- Bristow, J.M., 1975. The structure and function of roots in aquatic vascular plants. Dans: J.G. Torrey et D.T. Clarkson, éd. The development and function of roots. Third Cabot Symposium. Academic Press, New York, pp. 221-236.
- Bristow, J.M. et M. Whitcombe, 1971. The role of roots in the nutrition of aquatic vascular plants. Am. J. Bot., 58: 8-13.
- Brix, H. et J.E. Lyngby, 1983. The distribution of some metallic elements in eelgrass (Zostera marina L.) and sediment in the Limfjord, Denmark. Est. Coast. Shelf Sci., 16: 455-467.
- Campbell, P.G.C. et A. Tessier, 1989. Biological availability of metals in sediments: analytical approaches. Dans: J.P. Vernet, éd. Proc. Int. Conf. Heavy Metals in the Environment, Genève, Septembre 1989. CEP Consultants Ltd, Publ., Edinburgh. 1: 516-525.

- Carignan, R. et J. Kalff, 1980. Phosphorus sources for aquatic weeds: water or sediments? *Science*, 207: 987-989.
- Clark, I., 1979. *Practical geostatistics*. Applied Sciences Publ. Ltd., London. 129 p.
- CNRC, 1988. *Biologically available metals in sediments*. P.G.C. Campbell, A.G. Lewis, P.M. Chapman, A.A. Crowder, W.K. Fletcher, B. Imber, S.N. Luoma, P.M. Stokes et M. Winfrey, édés. Conseil National de Recherches du Canada, Rapport CNRC No 27694. 298 p.
- Crowder, A., W.T. Dushenko, J. Greig et J.S. Poland, 1989. Metal contamination in sediments and biota of the Bay of Quinte, Lake Ontario, Canada. *Hydrobiologia*, 188-189: 337-343.
- David, M., 1977. *Geostatistical ore reserve estimation*. Elsevier, New York.
- Denis Jacques Enr, 1986. *Cartographie des terres humides et des milieux environnants du lac Saint-Pierre*. Préparée pour la Corporation pour la mise en valeur du lac Saint-Pierre (COLASP). 70 p. + 1 carte à échelle de 1:66,949 et 23 cartes à échelle de 1:10,000 avec description de la végétation. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec.
- Dennis, W.M., 1984. Aquatic macrophyton sampling: an overview. Dans: W.M. Dennis et B.G. Isom, édés. *Ecological assessment of macrophyton: collection, use and meaning of data*. ASTM Special Technical Publication 843. American Society for Testing and Materials. pp. 2-6.
- Dennis, W.M. et B.G. Isom, édés., 1984. *Ecological assessment of macrophyton: collection, use and meaning of data*. ASTM Special Technical Publication 843. American Society for Testing and Materials. 122 p.
- Denny, P., 1980. Solute movement in submerged angiosperms. *Biol. Rev.*, 55: 65-92.
- Dery, Rocray et associés, 1983. *Classification des terres humides de la rive sud du lac Saint-Pierre, secteur Baie-du-Febvre*. Rapport présenté au Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec. 34 p. + annexe cartographique.

- DiGiulio, R.T. et P.F. Scanlon, 1985. Heavy metals in aquatic plants, clams and sediments from the Chesapeake Bay, USA. Implications for waterfowl. *Sc. Total Environ.*, 41: 259-274.
- Downing, J.A. et M.R. Anderson, 1985. Estimating the standing biomass of aquatic macrophytes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42: 1860-1869.
- Duarte, C.M., 1987. Use of echosounder tracings to estimate the aboveground biomass of submerged plants in lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44: 732-735.
- Dushenko, W.T., A. Crowder et J. Greig, 1988. Shoreline distribution of contaminants and submerged macrophytes in the Bay of Quinte, Ontario. Dans: M.J. Bardecki et N. Patterson, éds. *Proc. Conf. Wetlands: inertia or momentum*. Toronto, Ontario. pp. 377-384.
- Dykyjova, D., A. Kosanova, S. Husak et A. Sladeckova, 1985. Macrophytes and water pollution of the Zlata Stoka (Golden Canal), Trebon Biosphere Reserve, Czechoslovakia. *Arch. Hydrobiol.*, 105: 31-58.
- Environnement Canada, 1981. Les substances toxiques dans le fleuve Saint-Laurent. Résumé. Préparé par Béland et Demers Inc. pour le Service de la Protection de l'Environnement, Région du Québec. BEST-Volume 8. 95 p.
- Estabrook, G.F., D.W. Burk, D.R. Inman, P.B. Kaufman, J.R. Wells, J.D. Jones et N. Ghosheh, 1985. Comparison of heavy metals in aquatic plants on Charity island, Saginaw Bay, Lake Huron, U.S.A., with plants along the shoreline of Saginaw Bay. *Amer. J. Bot.*, 72: 209-216.
- Fassett, N.C., 1966. A manual of aquatic plants. The University of Wisconsin Press, Madison. 405 p.
- Friant, S.L. 1979. Trace metal concentration in selected biological, sediment, and water column samples in a Northern New England River. *Water, Air and Soil Pollut.*, 11: 455-465.
- Gale, N.L., B.G. Wixson, M.G. Hardie et J.C. Jennett, 1973. Aquatic organisms and heavy metals in Missouri's New Load Belt. *Water Resour. Bull.*, 9: 673-688.
- Gobas, F.A.P.C., E.J. McNeil, L. Lovett-Doust et G.D. Haffner, 1991. Bioconcentration of chlorinated aromatic hydrocarbons in aquatic macrophytes. *Environ. Sci. Technol.*, 25: 924-929.

- Gravel, Y. et L. Lévesque, Fr., 1977. Localisation et cartographie des zones d'herbiers du fleuve Saint-Laurent. Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent. Rapport Technique No 1. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche du Québec, 160 p.
- Gravel, Y. et G. Pageau, 1976. Les ressources biologiques et récréatives du Saint-Laurent sont-elles inépuisables? L'ingénieur, 314: 21-36.
- Grenier, M., J.-M. Dubois et A. Royer, 1987. Cartographie quantitative des algues marines à l'aide du capteur MEIS-II. Dans: Compte-Rendus du 11ième Symposium Canadien sur la télédétection, Université de Waterloo, Ontario. pp. 709-717.
- Grondin, P., R. Jean, L. Couillard et R. Dubuc, 1983. Végétation aquatique et riveraine du lac Saint-Louis et du bassin de Laprairie. Le Groupe Dryade pour Hydro-Québec (vice-présidence environnement), le Secrétariat Archipel et le Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec. Tome I, 85 p. avec annexes.
- Guertin, K., J.P. Villeneuve, S. Deschenes et G. Jacques, 1988. The choice of working variables in the geostatistical estimation of the spatial distribution of ion concentration from acid precipitation. Atmos. Environ., 22: 2787-2801.
- Gustafson, T.D. et M.S. Adams, 1973. The remote sensing of aquatic macrophytes. Part I: Color-infrared aerial photography as a tool for identification and mapping of littoral vegetation and Part II: Aerial photography as a quantitative tool for the investigation of aquatic ecosystems. Report No 24, Remote Sensing Program, Inst. for Environmental Studies, Univ. of Wisconsin, Madison, Wisconsin. 26 p.
- Harding, J.P.C. et B.A. Whitton, 1978. Zinc, cadmium and lead in water, sediments and submerged plants of the Derwent Reservoir, Northern England. Water Res., 12: 307-316.
- Hardy, B., L. Champoux, H. Sloterdijk et J. Bureau, 1991. Caractérisation des sédiments de fond du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent. Centre Saint-Laurent, Direction écotoxicologie et écosystèmes, Conservation et Protection, Environnement Canada. 74 p.
- Hill, B.H., 1979. Uptake and release of nutrients by aquatic macrophytes. Aquat. Bot., 7: 87-93.

- Jackson, L.J., J.B. Rasmussen, R.H. Peters et J. Kalff, 1991. Empirical relationships between the element composition of aquatic macrophytes and their underlying sediments. *Biogeochem.*, 12: 71-86.
- James, W.F. et J.W. Barko, 1990. Macrophyte influence on the zonation of sediment accretion and composition in a north-temperate reservoir. *Arch. Hydrobiol.*, 120: 129-142.
- Jones, G. et D.R. Cullimore, 1973. Influence of macro-nutrients on the relative growth of water plants in the Qu'Appelle lakes. *Environ. Pollut.*, 4: 283-290.
- Journel, A.G. et Ch. J. Huijbregts, 1978. Mining geostatistics. Academic Press, New York. 600 p.
- Kelly, L.M. et A.J. Ehlmann, 1980. Impact of encrusting carbonates on manganese, zinc and copper concentrations of 2 vascular hydrophytes from Texas, USA. *Hydrobiologia*, 71: 147-154.
- Kovacs, M., I. Nyary et L. Toth, 1984. The microelement content of some submerged and floating aquatic plants. *Acta Bot. Hung.*, 30: 173-185.
- Lamoureux, J.P. et A. Le Sauter, 1982. Etudes des herbiers submergés du lac Saint-Louis et du bassin de Laprairie (mandat LB-3). Projet Lachine, Rapport Technique. Dimension Environnement Ltée, Montréal. 106 p. et annexes.
- Landers, D.H., 1982. Effects of naturally senescing aquatic macrophytes on nutrient chemistry and chlorophyll a of surrounding waters. *Limnol. Oceanogr.*, 27: 428-439.
- Langlois, C. et H. Sloterdijk, 1989. Contamination du lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent) par certains polluants organiques et inorganiques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 2: 659-679.
- Lavoie, A., M. Grenier et J.-M. Dubois, 1989. Cartographie quantitative des algues intertidales, Saint-Fabien-sur-Mer, Québec: premiers essais. Dans: Bernier, Bonn et Gagnon, eds. *Télé-détection et gestion des ressources*, Vol. VI. L'Association Québécoise de Télé-détection. pp. 353-363.
- Lavoie, A., F. Boivin, B.G. Bénié et J.-M. Dubois, 1991. Cartographie quantitative des macrophytes du lac Saint-Pierre avec le capteur MEIS-II. Rapport 91-R-19, présenté au Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 41 p.

- Leclerc, M. et collaborateurs, 1991. Modélisation hydrodynamique des écoulements en eau libre du tronçon Tracy - lac Saint-Pierre. Rapport #1, Volume 1, soumis au Centre Saint-Laurent, Environnement Canada.
- Leland, H.V. et J.M. McNurney, 1974. Lead transport in a river ecosystem. Dans: Proc. Int. Conf. Transport of Persistent Chemicals in Aquatic Ecosystems, Ottawa. III: 17-23.
- Linn, J.G., E.J. Staba, R.D. Goodrich, J.C. Meiske et D.E. Otterby, 1975. Nutritive value of dried or ensiled aquatic plants. I. Chemical composition. J. An. Sci., 41: 601-609.
- Lum, K.R., K.L.E. Kaiser et C. Jaskot, 1991. Distribution and fluxes of metals in the St. Lawrence River from the outflow of Lake Ontario to Québec City. Aquatic Sciences, 53: 1-19.
- Lyngby, J.E. et H. Brix, 1982. Seasonal and environmental variation in cadmium, copper, lead and zinc concentrations in eelgrass (Zostera marina L.) in the Limfjord, Denmark. Aquat. Bot., 14: 59-74.
- Manny, B.A., S.J. Nichols et D.W. Schloesser, 1991. Heavy metals in aquatic macrophytes drifting in a large river. Hydrobiologia, 219: 333-344.
- Marie-Victorin, Fr., 1964. Flore Laurentienne. Deuxième édition, revue et mise à jour par Ernest Rouleau. Les Presses de l'Université de Montréal. 925 p.
- McIntosh, A.W., B.K. Shephard, R.A. Mayes, G.J. Atchison et D.W. Wilson, 1978. Some aspects of sediment distribution and macrophyte cycling of heavy metals in a contaminated lake. J. Environ. Qual., 7: 301-305.
- Mudroch, A., 1980. Biogeochemical investigation of Big Creek Marsh, Lake Erie, Ontario. J. Great Lakes Res., 6: 338-347.
- Muztar, A.J., S.J. Slinger et J.H. Burton, 1978. Chemical composition of aquatic macrophytes. III. Mineral composition of freshwater macrophytes and their potential for mineral nutrient removal from lake water. Can. J. Plant. Sci., 58: 851-862.
- Outridge, P.M. et B.N. Noller, 1991. Accumulation of toxic trace elements by freshwater vascular plants. Rev. Environ. Contam. and Toxicol., 121: 1-63.

- Pageau, G. et L. Lévesque, Fr., 1970. Influence respective des eaux du Saint-Laurent et de l'Outaouais sur les poissons et les plantes du lac Saint-Louis. Service de la faune du Québec, Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche. Rapport, 5: 1-21.
- Pageau, G. Y. Gravel et L. Lévesque, 1971. The ichthyofauna and flora of Lake St. Louis on the St. Lawrence River near Montréal, Québec: General features and recent changes. Proc. 14th Conf. Great Lakes Res., pp. 79-89.
- Peverly, J.H. 1985. Element accumulation and release by macrophytes in a wetland stream. J. Environ. Qual., 14: 137-143.
- Pilon, C., J. Champagne et P. Chevalier, 1981. Environnement biophysique des îles de Berthier-Sorel. Centre de Recherches Ecologiques de Montréal, Université de Montréal. 203 p.
- Pip, E., 1990. Cadmium, copper and lead in aquatic macrophytes in Shoal Lake (Manitoba-Ontario). Hydrobiologia, 208: 253-260.
- Raschke, R.L. et P.C. Rusanowski, 1984. Aquatic macrophyton field collection methods and laboratory analysis. Dans: W.M. Dennis et B.G. Isom, édés. Ecological assessment of macrophyton: collection, use and meaning of data. ASTM STP 843. American Society for Testing and Materials. pp. 16-27.
- Ray, S. et W. White, 1976. Selected aquatic plants as indicator species for heavy metal pollution. J. Environ. Sci. Health, A11: 717-725.
- Salki, H. et O. Maeda, 1982. Cleaning procedure for removal of external deposits from plant samples. Environ. Sci. Tech., 16: 536-539.
- Sawidis, T., J. Stratis et G. Zachariadis, 1991. Distribution of heavy metals in sediments and aquatic plants of the river Pinios (Central Greece). The Sci. Total Environ., 102: 261-266.
- Seddon, B. 1967. The lacustrine environment in relation to macrophytic vegetation. Dans: E.J. Cushing et H.E. Wright, édés. Quaternary Paleoecology. Yale Univ. Press, London. pp. 205-215.

- Sérodes, J.-B., 1978. Qualité des sédiments de fond du fleuve Saint-Laurent entre Cornwall et Montmagny. Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent. Rapport Technique No 15. La Direction Générale des Eaux Intérieures. 467 p.
- St-Cyr, L. et P.G.C. Campbell, 1991a. Résultats de biomasse des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre, obtenus lors de l'échantillonnage du mois d'août 1990. Rapport d'étape No 1, présenté au Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 78 p.
- St-Cyr, L. et P.G.C. Campbell, 1991b. Résultats de biomasse des plantes aquatiques submergées du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent, obtenus lors de l'échantillonnage du mois d'octobre 1990. Rapport d'étape No 2, présenté au Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 56 p.
- Sutton, D.L., 1991. The Hydrocharitaceae or Frog's bit family. *Aquatics*, 13: 4-12.
- Tessier, C, A. Aubin et D. Chenevier, 1984. Les facteurs élévation et distance dans la structure et la productivité d'une communauté riveraine de macrophytes. *Can. J. Bot.*, 62: 2260-2266.
- Tessier, C., A. Maire et A. Aubin, 1981. Etude de la végétation des zones riveraines de l'archipel des Cent-îles du fleuve Saint-Laurent, Québec. *Can. J. Bot.*, 59: 1526-1536.
- Varenko, N.I. et V.T. Chuiko, 1971. Role of higher aquatic plants in the migration of manganese, zinc, copper and cobalt in the Dneprodzerzhinsk Reservoir. *Hydrobiol. J.*, 7: 45-48.
- Vicars, T.M., 1976. Biomass and remote sensing of aquatic macrophytes in the Pamlico river estuary. Thèse de maîtrise, East Carolina University, Greenville, N.C. 108 p.
- Wassermann, J.C., J.C. Dumon et C. Latouche, 1991. Importance des zostères (Zostera noltii) dans le bilan des métaux lourds du bassin d'Arcachon. *Vie Milieu*, 41: 81-86.
- Wells, J.R., P.B. Kaufman et J.D. Jones, 1980. Heavy metal contents in some macrophytes from Saginaw Bay (Lake Huron, USA). *Aquat. Bot.*, 9: 185-193.

Welsh, P. et P. Denny, 1976. Waterplants and the recycling of heavy metals in an English lake. Dans: D.D. Hemphill, éd., Proc of the 10th Annual Conference on Traces Substances in Environmental Health. Univ. of Missouri. pp. 217-223.

Welsh, R.P.H. et P. Denny, 1980. The uptake of lead and copper by submersed aquatic macrophytes in 2 English lakes (UK). J. Ecol., 68: 443-455.

ANNEXES

ANNEXE 1

Code des balises ayant servi pour la calibration de l'appareil de localisation.

<u>Code des balises</u>	<u>Localisation des balises</u>
30 Ile aux Raisins	rive sud-ouest du lac
28 Amer Arnold (Rivière du Loup)	rive nord-ouest du lac
26 OP VI (Longue Pointe)	rive sud-est du lac
22 SP (Pointe du lac)	rive nord-est du lac

Un repère géodésique implanté sur le phare NWHL (No. Gester: 20320) a servi à la calibration du Mini-Ranger.

Un signal numérique indiquait la qualité de la réception (en dB): une signal faible accompagné d'un astérisque indiquait une réception pauvre.

ANNEXE 2

Coordonnées UTM des emplacements des stations
d'échantillonnage des campagnes de terrain d'août
et octobre 1990 (en mètres).

<u>Stations #</u>	<u>NORD</u>	<u>EST</u>
1	5126924	676892
2	5123972	679536
3	5125414	674610
4	5124721	676970
5	5123594	679099
6	5124596	668405
7	5123421	672332
9	5123024	678099
10	5124709	667869
11	5122159	669647
13	5119732	672211
14	5122166	665948
15	5121690	666842
16	5119331	669950
17	5117885	669119
18	5121188	663773
19	5118418	661502
21	5113886	666227
22	5119543	660380
23	5118578	661150
24	5116714	662515
26	5113647	665574
27	5119073	659616
28	5116654	660767
30	5113156	664690
31	5116489	658062
32	5113893	657616
33	5113797	658191
36	5113089	656176
37	5112764	657867
40	5110260	656801
41	5110505	656278
44	5107549	655560
 <u>OCTOBRE</u>		
27	5119041	659627
28	5116538	660869
31	5116509	657848
32	5113849	657676
35	5114675	661729

DANS LES ILES DE SOREL

<u>Stations #</u>	<u>LATITUDE (NORD)</u>	<u>LONGITUDE (OUEST)</u>
45	46°07'40"	73°06'55"
46	46°07'55"	73°06'30"
47	46°06'18"	73°00'10"
48	46°05'40"	73°08'30"
49	46°02'55"	73°05'58"
50	46°03'30"	73°09'30"

ANNEXE 3

Résultats bruts de la biomasse végétale submergée du lac Saint-Pierre, de la campagne d'échantillonnage d'août 1990.

Station #1:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Nitella</u>	4,186	4,680	46,8
	<u>Vallisneria americana</u>	0,494		
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	14,522	15,871	158,7
	<u>Nitella</u>	0,668		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,632		
	<u>Najas flexilis</u>	0,049		
3	<u>Elodea canadensis</u>	0,964	1,576	15,8
	<u>Vallisneria americana</u>	0,475		
	<u>Nitella + Najas flexilis</u>	0,137		
4	<u>Vallisneria americana</u>	1,557	2,765	27,7
	<u>Nitella + Najas flexilis</u>	1,208		

- Comptage des plantes dans 2 quadrats de 0,1 m²

5	18 <u>Vallisneria americana</u>	8,63	8,63	86,3
6	11 <u>Vallisneria americana</u>	4,59	4,59	45,9

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 3113 g masse sèche

Station #2:

- Comptage des plantes dans 4 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	52 <u>Vallisneria americana</u>	33,60	33,60	134,4
2	51 <u>Vallisneria americana</u>	32,70	32,70	131,1
3	50 <u>Vallisneria americana</u>	31,95	31,95	127,8
4	50 <u>Vallisneria americana</u>	31,95	31,95	127,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 6384 g masse sèche

Station #3:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	13 <u>Vallisneria americana</u>	5,68	5,68	56,8
2	26 <u>Vallisneria americana</u>	13,82	13,82	138,2
3	22 <u>Vallisneria americana</u>	11,16	11,16	111,6
4	17 <u>Vallisneria americana</u>	8,02	8,02	80,2
5	16 <u>Vallisneria americana</u>	7,42	7,42	74,2

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 4518 g masse sèche

Station #4:

RIEN. Il n'y a aucune plante submergée qui pousse à ce site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #5:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	9 <u>Vallisneria americana</u>	3,55	4,05	16,2
	2 <u>Heteranthera dubia</u>	0,5		
2	13 <u>Vallisneria americana</u>	5,68	5,93	23,7
	1 <u>Heteranthera dubia</u>	0,25		
3	10 <u>Vallisneria americana</u>	4,06	4,06	16,2
4	14 <u>Vallisneria americana</u>	6,25	6,25	25,0
5	3 <u>Vallisneria americana</u>	0,87	0,87	3,5

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 829 g masse sèche

Station #6:

RIEN. Il n'y a aucune plante submergée qui pousse à ce site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #7:

RIEN. Il n'y a aucune plante submergée qui pousse à ce site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #9:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ <u>Vallisneria americana</u>	9,761		
	algues filamenteuses	1,841		
	<u>Heteranthera dubia</u>	0,211	11,813	118,1
2	algues filamenteuses	8,240		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ <u>Heteranthera dubia</u>	1,310	9,55	95,5
3	algues filamenteuses	2,732		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ <u>Vallisneria americana</u>	1,517		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,549	4,798	48,0
4	<u>Potamogeton richardsonii</u>	12,098		
	algues filamenteuses	1,751		
	<u>Heteranthera dubia</u>	1,251	15,1	151,0
5	algues filamenteuses	4,240		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ <u>Vallisneria americana</u>	1,535		
	<u>Heteranthera dubia</u>	0,989	6,764	67,6

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 4706 g masse sèche

Station #10:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	5 <u>Vallisneria americana</u>	1,67		
	5 <u>Heteranthera dubia</u>	1,25		
	2 <u>Elodea canadensis</u>			>29,2
2	8 <u>Vallisneria americana</u>	3,05		
	8 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
	6 <u>Heteranthera dubia</u>	1,5		>45,5
3	10 <u>Vallisneria americana</u>	4,06		
	6 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
	5 <u>Elodea canadensis</u>			
	1 <u>Heteranthera dubia</u>	0,25		
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			>43,1
4	22 <u>Vallisneria americana</u>	11,16		
	2 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
	1 <u>Elodea canadensis</u>			>111,6
5	22 <u>Vallisneria americana</u>	11,16		
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
	1 <u>Elodea canadensis</u>			>111,6

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): > 3342 g masse sèche

Station #11:

Environ 3/4 (75%) du site: tapis de Nitella
et 1/4 (25%) du site: vallisnérie.

Collecte de Nitella dans 2 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Nitella</u>	7,240	7,240	72,4
2	<u>Nitella</u> touffes de vallisnéries	14,378 Voir station 15	14,378	143,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²):
Nitella (75%) = 37 m² = 4000 g
Vallisneria (25%) = 12 m² = 892 g
4892 g masse sèche

Station #13:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	algues filamenteuses	6,76	7,6	30,4
	<u>Heteranthera dubia</u>	0,84		
2-3	<u>Vallisneria americana</u>	5,404	7,464	14,9
	algues filamenteuses	2,06		
4	<u>Vallisneria americana</u>	6,492	6,492	26,0
5	algues filamenteuses	2,1	3,631	14,5
	<u>Heteranthera dubia</u>	1,091		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,440		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 987 g masse sèche

Station #14:

Environ 3/4 (75%) du site: vallisnérie
et 1/4 (25%) du site: potamot

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	12,601	12,601	126,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	6,997	6,997	70,0
3	<u>Vallisneria americana</u>	14,448	14,448	144,5
4	<u>Potamogeton richardsonii</u>	36,97	38,715	387,2
	<u>Vallisneria americana</u>	1,645		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	0,1		
5	<u>Potamogeton richardsonii</u>	53,874	55,348	553,4
	<u>Vallisneria americana</u>	1,474		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): Vallisneria (75%) = 37 m² = 4200 g
Potamogeton (25%) = 12 m² = 5644 g
9844 g masse sèche

Station #15:

Voir similarité avec la station 11.
 Environ 2/3 (67%) du site: vallisnerie
 et 1/3 (33%) du site: Nitella

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m² dans les touffes de vallisneries.

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	14 <u>Vallisneria americana</u>	6,25	6,25	62,5
2	15 <u>Vallisneria americana</u>	6,83	6,83	68,3
3	12 <u>Vallisneria americana</u>	5,13	5,13	51,3
4	26 <u>Vallisneria americana</u>	13,82	13,82	138,2
5	12 <u>Vallisneria americana</u>	5,13	5,13	51,3
	tapis de <u>Nitella</u>		Voir Station #11	

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
 (49 m²):

Vallisneria (67%) = 33 m² = 2453 g

Nitella (33%) = 16 m² = 1730 g

4183 g masse sèche

Station #16:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	14 <u>Vallisneria americana</u>	6,25	6,25	62,5
2	32 <u>Vallisneria americana</u>	18,03	18,03	180,3
3	23 <u>Vallisneria americana</u> présence de <u>Nitella</u>	11,81		>118,1
4	29 <u>Vallisneria americana</u>	15,90	15,90	159,0
5	16 <u>Vallisneria americana</u> présence de <u>Nitella</u>	7,42		> 74,2

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
 (49 m²):

> 5822 g masse sèche

Station #17:

- Comptage des plantes dans 3 quadrats.

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1 (0,25 m ²)	26 <u>Vallisneria americana</u> 9 <u>Potamogeton richardsonii</u>	13,82		>55,3
2 (0,1 m ²)	30 <u>Vallisneria americana</u>	16,60	16,60	166,0
3 (0,1 m ²)	36 <u>Potamogeton richardsonii</u>			

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²):

Station #18:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	13 <u>Vallisneria americana</u>	5,68	5,68	56,8
2	24 <u>Vallisneria americana</u>	12,47	12,47	124,7
3	14 <u>Vallisneria americana</u>	6,25	6,25	62,5
4	18 <u>Vallisneria americana</u>	8,63	8,63	86,3
5	13 <u>Vallisneria americana</u>	5,68	5,68	56,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²):

3794 g masse sèche

Station #19:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	11,373	11,373	45,5
2	<u>Vallisneria americana</u>	13,622	13,622	54,5
3	<u>Vallisneria americana</u>	5,055	5,055	20,2
4	<u>Vallisneria americana</u>	5,142	5,142	20,6

Station #19 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
5	<u>Vallisneria americana</u>	10,335	10,335	41,3

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 1785 g masse sèche

Station #21:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton pectinatus</u>	3,472	3,472	34,7
2	<u>Potamogeton pectinatus</u>	11,480	11,480	114,8
3	<u>Potamogeton pectinatus</u>	12,816		
	<u>Vallisneria americana</u>	3,188		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,660		
	<u>Potamogeton crispus</u>	0,057		
	<u>Heteranthera dubia</u>	0,048	16,769	167,7
4	<u>Potamogeton pectinatus</u>	11,226	11,226	112,3

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 5261 g masse sèche

Station #22:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	19,94		
	<u>Najas flexilis</u>	0,281		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	0,165		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	0,049		
	<u>Elodea canadensis</u>	0,027	20,462	81,8
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	23,113	23,113	92,4
3	<u>Potamogeton richardsonii</u>	32,763		
	algues filamenteuses	0,027	32,79	131,2

Station #22 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
4	<u>Potamogeton richardsonii</u>	21,931		
	algues filamenteuses	0,649		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,493		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	0,445		
	<u>Najas flexilis</u>	0,338	23,856	95,4
5	<u>Potamogeton richardsonii</u>	70,295		
	algues filamenteuses	0,925	71,22	284,9

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 6720 g masse sèche

Station #23:

RIEN. Il n'y a aucune plante submergée qui pousse à ce site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #24:

Description sommaire du site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

Station #26:

- Comptage des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	14 <u>Vallisneria americana</u>	6,25	6,25	62,5
2	16 <u>Vallisneria americana</u>	7,42	7,42	74,2
3	9 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
4	36 <u>Potamogeton pectinatus</u>			

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

Station #27:

- Comptage des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	14 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
2	17 <u>Potamogeton richardsonii</u> 9 <u>Vallisneria americana</u>	3,55		
3	27 <u>Vallisneria americana</u>	14,50	14,50	145,0
4	29 <u>Vallisneria americana</u>	15,90	15,90	159,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²):

Station #28:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	14,163	14,163	141,6
2	<u>Vallisneria americana</u>	13,266	13,266	132,7
3	<u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Vallisneria americana</u>	82,89 11,303	94,193	941,9
4	<u>Vallisneria americana</u>	19,092	19,092	190,9
5	<u>Vallisneria americana</u> <u>Potamogeton richardsonii</u>	11,383 0,402	11,785	117,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 14944 g masse sèche

Station #30:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	8 <u>Vallisneria americana</u>	3,05		
	6 <u>Elodea canadensis</u>			
	2 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
	<u>Nitella</u>			

Station #30 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
2	15 <u>Vallisneria americana</u>	6,83		
	4 <u>Elodea canadensis</u>			
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
	<u>Nitella</u>			
3	7 <u>Elodea canadensis</u>			
	4 <u>Heteranthera dubia</u>	1,0		
	3 <u>Vallisneria americana</u>	0,87		
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
	<u>Nitella</u>			
4	56 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
5	6 <u>Vallisneria americana</u>	2,11		
	1 <u>Elodea canadensis</u>			
	<u>Ceratophyllum demersum</u>			
	<u>Nitella</u>			

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): -----

Station #31:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ algues filamenteuses	11,248		
	algues filamenteuses	7,559		
	<u>Vallisneria americana</u>	1,867		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	0,921	21,595	216,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	17,967		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ algues filamenteuses	0,792	18,759	187,6
3	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ algues filamenteuses	37,975	37,975	379,7
4	<u>Potamogeton richardsonii</u>			
	+ algues filamenteuses	5,484		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,544	6,028	60,2
5	<u>Vallisneria americana</u>	9,045		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	1,539	10,584	105,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 9303 g masse sèche

Station #32:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	14 <u>Vallisneria americana</u>	6,25	6,25	25,0
2	30 <u>Vallisneria americana</u> <u>Nitella</u>	16,60	16,60	>66,4
3	15 <u>Vallisneria americana</u> 5 <u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Nitella</u>	6,83		>27,3
4	35 <u>Vallisneria americana</u> 6 <u>Elodea canadensis</u>	20,23		>80,9
5	14 <u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Nitella</u>			

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

Station #33:

- Relevé qualitatif seulement.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

Station #36:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	12 <u>Vallisneria americana</u> 8 <u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Nitella</u>	5,13		>51,3
2	8 <u>Vallisneria americana</u> 2 <u>Potamogeton richardsonii</u> beaucoup de <u>Nitella</u> 1 <u>Myriophyllum spicatum</u>	3,05		>30,5
3	24 <u>Vallisneria americana</u> 11 <u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Nitella</u>	12,47		>124,7

Station #36 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
4	10 <u>Vallisneria americana</u>	4,06		>40,6
	2 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
	<u>Nitella</u>			
5	15 <u>Vallisneria americana</u>	6,83		>68,3
	2 <u>Potamogeton richardsonii</u>			

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

Station #37:

- Relevé qualitatif seulement.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

Station #40:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	6,473	12,507	125,0
	algues filamenteuses	6,034		
2	<u>Vallisneria americana</u>	16,740	25,275	252,8
	algues filamenteuses	3,718		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	3,507		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	1,098		
	<u>Elodea canadensis</u>	0,212		
3	algues filamenteuses	7,420	9,05	90,5
	<u>Vallisneria americana</u>	1,630		
4	<u>Vallisneria americana</u>	26,808	27,766	277,7
	algues filamenteuses	0,958		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 9138 g masse sèche

Station #41:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	12,143	12,532	25,3
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,389		
2	<u>Vallisneria americana</u>	20,353	20,353	203,5
3	<u>Vallisneria americana</u>	17,484	17,484	174,8
4	<u>Potamogeton richardsonii</u>	17,713	30,983	309,8
	<u>Vallisneria americana</u>	13,27		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 9964 g masse sèche

Station #44:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	54,431	83,253	832,5
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	26,649		
	<u>Nitella</u>	1,403		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,770		
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	10,592	21,029	210,3
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	6,299		
	<u>Vallisneria americana</u>	4,138		
3	<u>Potamogeton richardsonii</u>	27,565	41,494	414,9
	<u>Vallisneria americana</u>	8,635		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	5,294		
4	<u>Potamogeton richardsonii</u>	36,286	38,33	383,3
	<u>Vallisneria americana</u>	2,044		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 22552 g masse sèche

Station #45:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	RIEN	0	0	0
2	4 <u>Vallisneria americana</u> 1 <u>Heteranthera dubia</u>	1,25 0,25	1,5	6,0
3	2 <u>Vallisneria americana</u>	0,52	0,52	2,1
4	RIEN	0	0	0
5	4 <u>Vallisneria americana</u>	1,25	1,25	5,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 128 g masse sèche

Station #46:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Elodea canadensis</u>	50,956	50,956	509,6
2	<u>Elodea canadensis</u>	69,234	69,234	692,3
3	<u>Elodea canadensis</u>	96,441	96,441	964,4
4	<u>Elodea canadensis</u>	76,949	76,949	769,5

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 35963 g masse sèche

Station #47:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Heteranthera dubia</u> <u>Vallisneria americana</u>	3,278 1,265	4,543	18,2
2	<u>Vallisneria americana</u> <u>Heteranthera dubia</u>	6,854 2,306	9,16	36,6

Station #47 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
3	<u>Vallisneria americana</u>	9,760	9,76	39,0
4	<u>Vallisneria americana</u> <u>Heteranthera dubia</u>	3,070 1,499	4,569	18,3

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 1373 g masse sèche

Station #48:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	4,249	4,249	42,5
2	<u>Vallisneria americana</u>	6,636	6,636	66,4
3	<u>Vallisneria americana</u>	9,551	9,551	95,5
4	<u>Vallisneria americana</u>	4,482	4,482	44,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 3053 g masse sèche

Station #49:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u> <u>Heteranthera dubia</u>	20,812 5,316	26,128	261,3
2	<u>Heteranthera dubia</u>	2,832	2,832	28,3
3	<u>Alisma gramineum</u>	2,151	2,151	21,5
4	Rien	0	0	0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 3811 g masse sèche

Station #50:

- Comptage des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	40 <u>Vallisneria americana</u>	24,0		>240,0
	7 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
2	27 <u>Vallisneria americana</u>	14,50	14,50	145,0
3	27 <u>Vallisneria americana</u>	14,50	14,50	145,0
4	30 <u>Vallisneria americana</u>	16,60		>166,0
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			
5	34 <u>Vallisneria americana</u>	19,49		>194,9
	4 <u>Potamogeton richardsonii</u>			
	1 <u>Myriophyllum spicatum</u>			

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): _____

ANNEXE 4

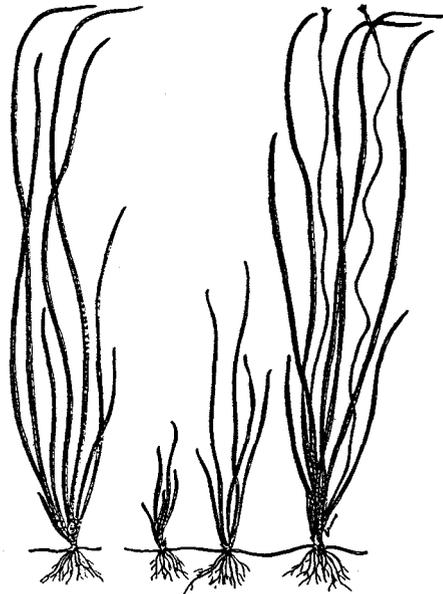
Données brutes des valeurs de biomasse associées au nombre de rosettes de vallisnérie récoltées à diverses stations du lac Saint-Pierre en août 1990, et qui ont servi à tracer la droite d'estimation présentée à la figure 4.2.

STATION (quadrat)	NOMBRE	MASSE SECHE (g)	PROFONDEUR (mètres)
9 (3)	2	0,549	1,65
13 (2-3)	12	4,967	2,45
13 (4)	11	3,733	2,45
14 (1)	16	9,574	2,70
14 (2)	8	4,411	2,70
14 (3)	13	10,776	2,70
19 (1)	5	1,895	2,70
19 (1)	17	5,540	2,70
19 (2)	9	2,237	2,70
19 (3)	3	0,542	2,70
19 (4)	6	0,975	2,70
19 (5)	20	5,908	2,70
21 (2)	31	13,362	2,77
21 (4)	9	2,909	2,77
28 (1)	8	5,013	2,50
28 (2)	9	5,905	2,50
28 (3)	3	0,811	2,50
28 (4)	15	8,178	2,50
28 (5)	7	4,617	2,50
31 (5)	10	4,827	1,20
40 (1)	9	3,252	1,80
41 (1)	14	5,736	1,75
41 (2)	27	15,258	1,75
41 (3)	15	7,131	1,75
41 (4)	8	3,151	1,75

ANNEXE 5

Esquisses de la morphologie générale des deux espèces de plantes dominantes au lac Saint-Pierre.

Vallisneria americana



Potamogeton richardsonii



ANNEXE 6

Résultats bruts de la biomasse végétale submergée du lac Saint-Pierre, de la campagne d'échantillonnage d'octobre 1990.

Station #1:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Nitella</u>	1,602	1,602	16,0
2	<u>Nitella</u>	0,812	0,812	8,1
3	<u>Vallisneria americana</u>	0,180	0,180	1,8
4	<u>Vallisneria americana</u>	0,092	0,092	0,9
5	<u>Nitella</u>	0,127	0,127	1,3

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 275 g masse sèche

Station #2:

La station n'a pas été retrouvée.

RIEN. Il n'y a aucune plante submergée qui pousse à ce site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #3:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m²..

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Heteranthera dubia</u>	0,060	0,060	0,6
2	<u>Heteranthera dubia</u>	0,020	0,020	0,2
3	<u>Vallisneria americana</u>	0,203	0,248	2,5
	<u>Nitella</u>	0,045		

140

Station #3 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
4	VIDE			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 40 g masse sèche

Station #4:

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #5:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	VIDE			0,0
2	VIDE			0,0
3	1 <u>Heteranthera dubia</u>	≈ 0,05	0,05	0,5
4	<u>Heteranthera dubia</u>	0,143	0,143	1,4

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 23 g masse sèche

Station #6:

RIEN. Il n'y a aucune plante submergée qui pousse à ce site.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #7:

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #9:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Heteranthera dubia</u>	0,033	0,033	0,3
2	<u>Heteranthera dubia</u>	0,108	0,108	1,1
3	RIEN			0,0
4	<u>Alisma gramineum</u>	1,151	1,151	11,5

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 158 g masse sèche

Station #10:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,386	0,386	3,9
2	<u>Myriophyllum spicatum</u> <u>Elodea canadensis</u>	0,190 0,140	0,33	3,3
3	<u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Heteranthera dubia</u>	0,711 0,496	1,207	12,1
4	<u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Myriophyllum spicatum</u>	0,317 0,092	0,409	4,1

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 287 g masse sèche

Station #14:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Heteranthera dubia</u>	3,463	3,863	38,6
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,400		
2	<u>Heteranthera dubia</u>	1,628	2,019	20,2
	<u>Nitella</u>	0,391		
3	<u>Heteranthera dubia</u>	0,830	1,387	13,9
	<u>Nitella</u>	0,475		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	0,082		
4	<u>Heteranthera dubia</u>	5,471	5,968	59,7
	<u>Vallisneria americana</u>	0,328		
	<u>Nitella</u>	0,169		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 1622 g masse sèche

Station #15:

La station n'a pas été retrouvée.

RIEN. Il n'y a pas de plantes submergées à cet endroit.

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle.

Station #16:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m²..

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Nitella</u>	2,584	2,584	25,8
2	<u>Nitella</u>	4,065	4,065	40,6
3	<u>Nitella</u>	2,732	3,39	33,9
	<u>Vallisneria americana</u>	0,658		

Station 16 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
4	<u>Nitella</u>	4,70	4,70	47,0
5	<u>Nitella</u>	4,94	4,94	49,4

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 1928 g masse sèche

Station #17:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	4,907	4,907	49,1
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	1,758	1,758	17,6
3	<u>Vallisneria americana</u>	0,433	0,433	4,3
4	<u>Potamogeton richardsonii</u> <u>Nitella</u>	11,934 0,037	11,971	119,7

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 2336 g masse sèche

Station #18:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	1,079	1,079	10,8
2	RIEN			0,0
3	<u>Vallisneria americana</u>	1,192	1,192	11,9
4	<u>Vallisneria americana</u>	0,547	0,547	5,5

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 345 g masse sèche

Station #19:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	0,201	0,201	2,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,056	0,056	0,6
3	RIEN			0,0
4	<u>Vallisneria americana</u>	0,240	0,240	2,4

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 61 g masse sèche

Station #21:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 7 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	0,952	0,952	9,5
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,925	0,925	9,2
3	RIEN			0,0
4	RIEN			0,0
5	RIEN			0,0
6	RIEN			0,0
7	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 131 g masse sèche

Station #22:

- Collecte des plantes dans 6 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,138	0,138	1,4
2	RIEN			0,0
3	RIEN			0,0
4	RIEN			0,0
5	RIEN			0,0
6	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 11 g masse sèche

Station #23:

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): nulle

Station #24:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	2,552	2,552	25,5
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,799	0,799	8,0
3	<u>Vallisneria americana</u>	1,236	1,236	12,4
4	<u>Vallisneria americana</u>	4,066	4,066	40,7

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 1061 g masse sèche

Station #26:

- Collecte des plantes dans 7 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	2,545	2,545	25,4
2	<u>Vallisneria americana</u>	1,289	1,289	12,9
3	RIEN			0,0
4	RIEN			0,0
5	RIEN			0,0
6	RIEN			0,0
7	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 268 g masse sèche

Station #27:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 3 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	3,492	3,492	34,9
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	2,355	2,355	23,5
3	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,439	0,439	4,4

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 1026 g masse sèche

Station #28:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	0,852	0,852	8,5
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,658	0,658	6,6
3	<u>Vallisneria americana</u>	1,288	1,288	12,9
4	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 343 g masse sèche

Station #30:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	9,272	9,272	92,7
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,182	0,182	1,8
3	RIEN			0,0
4	RIEN			0,0
5	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 926 g masse sèche

Station #31:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,095	0,131	1,3
	<u>Vallisneria americana</u>	0,036		
2	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,099	0,099	1,0
3	<u>Vallisneria americana</u>	0,050	0,050	0,5
4	<u>Vallisneria americana</u>	0,62	1,064	10,6
	<u>Nitella</u>	0,4		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,044		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 164 g masse sèche

Station #32:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	1,997	1,997	20,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,780	0,780	7,8
3	<u>Vallisneria americana</u>	1,30	1,670	16,7
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,370		
4	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 545 g masse sèche

Station #33:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	0,720	0,720	7,2
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,983	0,983	9,8
3	<u>Vallisneria americana</u>	0,303	0,303	3,0
4	<u>Vallisneria americana</u>	0,705	0,705	7,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 331 g masse sèche

Station #35:

Ce site ne fut pas visité lors de la campagne d'échantillonnage du mois d'août.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	1,386	1,386	13,9
2	<u>Vallisneria americana</u>	2,211	2,211	22,1
3	<u>Vallisneria americana</u>	1,550	1,550	15,5
4	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 631 g masse sèche

Station #36:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	1,852	3,589	35,9
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	1,737		

Station 36 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/m ²
2	<u>Nitella</u>	3,571	5,695	56,9
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	2,124		
3	<u>Nitella</u>	7,318	9,934	99,3
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	1,967		
	<u>Heteranthera dubia</u>	0,367		
	algues filamenteuses	0,282		
4	<u>Vallisneria americana</u>	1,068	1,163	11,6
	algues filamenteuses	0,095		

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 2495 g masse sèche

Station #37:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	2,440	2,440	24,4
2	<u>Vallisneria americana</u>	1,674	1,674	16,7
3	<u>Vallisneria americana</u>	2,013	2,013	20,1
4	<u>Vallisneria americana</u>	1,471	1,471	14,7
5	<u>Vallisneria americana</u>	0,953	0,953	9,5

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 837 g. masse sèche

Station #40:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Alisma gramineum</u>	5,533		
	<u>Vallisneria americana</u>	3,988		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	1,886		
	<u>Nitella</u>	0,129	11,536	115,4
2	<u>Myriophyllum spicatum</u>	1,161		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	0,719		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,660		
	<u>Nitella</u>	0,176	2,716	27,2
3	<u>Myriophyllum spicatum</u>	1,211		
	<u>Nitella</u>	1,081		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,981	3,273	32,7
4	<u>Myriophyllum spicatum</u>	4,008		
	<u>Nitella</u>	0,687	4,695	46,9
5	<u>Vallisneria americana</u>	2,087		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	1,090	3,177	31,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 2489 g masse sèche

Station #41:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	1,398	1,398	14,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	9,597		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	4,154	13,751	137,5
3	<u>Vallisneria americana</u>	2,208		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	1,266	3,474	34,7
4	<u>Vallisneria americana</u>	8,140		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	4,775	12,915	129,1

Station #41 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
5	<u>Vallisneria americana</u>	4,430		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	2,108	6,538	65,4

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 3731 g masse sèche

Station #44:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Elodea canadensis</u>	8,034		
	<u>Potamogeton richardsonii</u>	7,257		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	4,289		
	<u>Heteranthera dubia</u>	2,720		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	1,942		
	<u>Lemna</u>	0,050	24,292	242,9
2	<u>Elodea canadensis</u>	14,013		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	1,664		
	<u>Heteranthera dubia</u>	1,221		
	<u>Nitella</u>	0,574		
	<u>Lemna</u>	0,030	17,502	175,0
3	<u>Myriophyllum spicatum</u>	32,127		
	<u>Heteranthera dubia</u>	3,347		
	<u>Elodea canadensis</u>	3,312		
	<u>Nitella</u>	2,735		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	1,356		
	<u>Lemna</u>	0,097	42,974	429,7
4	<u>Myriophyllum spicatum</u>	17,606		
	<u>Nitella</u>	7,012		
	<u>Elodea canadensis</u>	4,730		
	<u>Heteranthera dubia</u>	3,948		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	2,690		
	algues filamenteuses	0,753		
	<u>Lemna</u>	0,140	36,879	368,8

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 14901 g masse sèche

Station #45:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	RIEN			0,0
2	RIEN			0,0
3	<u>Heteranthera dubia</u>	5,440	5,440	21,8
4	<u>Ceratophyllum demersum</u>	0,526	0,526	2,1
5	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 234 g masse sèche

Station #46:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Elodea canadensis</u>	34,73	34,73	347,3
2	<u>Elodea canadensis</u>	24,98	24,98	249,8
3	<u>Elodea canadensis</u>	37,27	37,27	372,7
4	<u>Elodea canadensis</u>	87,09	87,09	870,9

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 22549 g masse sèche

Station #47:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	5,389		
	<u>Ceratophyllum demersum</u>	2,038		
	<u>Elodea canadensis</u>	0,154	7,581	30,3

Station #47 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
2	<u>Vallisneria americana</u>	8,406	8,406	33,6
3	<u>Vallisneria americana</u>	13,085	13,085	52,3
4	<u>Heteranthera dubia</u> <u>Vallisneria americana</u>	14,133 8,582	22,715	90,9

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 2537 g masse sèche

Station #48:

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	RIEN			0,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	0,266	0,266	2,7
3	<u>Vallisneria americana</u>	0,292	0,292	2,9
4	<u>Vallisneria americana</u>	0,203	0,203	2,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 93 g masse sèche

Station #49:

- Collecte des plantes dans 5 quadrats de 0,1 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	RIEN			0,0
2	RIEN			0,0
3	<u>Vallisneria americana</u> <u>Heteranthera dubia</u> algues filamenteuses	0,360 0,139 0,071	0,57	5,7

Station #49 (suite)

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
4	<u>Heteranthera dubia</u>	2,047		
	algues filamenteuses	0,046		
	<u>Vallisneria americana</u>	0,033	2,126	21,3
5	RIEN			0,0

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 265 g masse sèche

Station #50:

La station n'a pas été retrouvée.

- Collecte des plantes dans 4 quadrats de 0,25 m².

Quadrat	espèce de plante	g masse sèche	Total	/1m ²
1	<u>Vallisneria americana</u>	1,778		
	<u>Myriophyllum spicatum</u>	1,482	3,260	13,0
2	<u>Vallisneria americana</u>	1,016	1,016	4,1
3	<u>Myriophyllum spicatum</u>	4,793		
	<u>Vallisneria americana</u>	3,817	8,610	34,4
4	<u>Zizania palustris</u>	2,035		
	<u>Vallisneria americana</u>	1,386	3,421	13,7

Estimé de la biomasse végétale submergée totale du site
(49 m²): 799 g masse sèche

ANNEXE 7

Tableau 7.1: Concentrations de métaux traces (Cd,Cr,Cu,Ni,Pb,Zn,Mn,Fe) et de Ca, en µg/g de tissu sec, dans les parties vertes et souterraines de diverses espèces de plantes aquatiques submergées recoltées au lac Saint-Pierre lors de la campagne d'échantillonnage d'août 1990.

St.	Espèce	Partie	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Fe	Ca	Pb
1	<u>V. americana</u>	verte	2,37	8,3	22,7	13,2	132,4	3243	4467	9871	4,8
		souter.	4,06	3,9	34,2	9,3	163,4	1539	10200	11280	<7,9
1	<u>Nitella</u>	verte	2,21	4,7	27,4	11,6	116,7	5350	3754	25349	9,1
1	<u>P. richardsonii</u>	verte	1,07	4,5	13,4	6,9	68,1	671	2487	15540	18,2
		souter.	<1,80	<5,7	17,1	<6,2	59,0	720	12990	12480	<13,8
2	<u>V. americana</u>	verte	0,91	3,9	17,4	17,5	98,3	4103	1903	11350	2,9
		souter.	2,18	<3,3	29,0	9,4	136,4	809	10600	10440	<8,0
10	<u>V. americana</u>	verte	0,67	1,6	9,1	2,6	76,2	1892	9462	21793	2,1
10	<u>P. richardsonii</u>	verte	0,21	1,6	7,3	1,2	32,1	330	4226	30663	0,7
11	<u>V. americana</u>	verte	2,57	2,4	16,6	10,4	104,5	1335	1773	23540	1,7
		souter.	4,61	<3,5	26,1	7,5	140,4	831	7400	14470	<8,3
11	<u>Nitella</u>	verte	0,72	4,9	17,1	11,4	71,4	1051	1891	76580	2,2
13	<u>V. americana</u>	verte	1,28	3,2	21,3	15,2	213,1	3366	805	10020	1,5
		souter.	1,95	8,5	36,8	10,5	152,6	665	13090	8061	<8,0
13	<u>H. dubia</u>	verte	0,56	5,1	18,7	6,6	158,6	1391	1368	10540	2,1
		souter.	2,65	10,0	32,9	14,7	170,8	1712	17922	10757	<13,8
13	algues filamen.	verte	0,31	22,0	40,5	13,3	79,3	551	10790	17570	17,2
14	<u>V. americana</u>	verte	2,82	5,0	23,2	12,7	144,5	7335	2696	10010	6,9
		souter.	3,74	10,9	36,1	8,5	170,5	1659	30500	12140	12,0
14	<u>P. richardsonii</u>	verte	1,50	3,3	14,9	6,9	96,3	2952	1857	12000	2,6
		souter.	<1,10	6,1	18,6	4,9	90,5	2442	17490	9165	<8,0
16.1	<u>V. americana</u>	verte	0,67	2,7	16,0	21,0	107,0	1122	2264	18120	0,9
		souter.	2,46	<4,2	30,4	19,9	170,7	919	17270	17230	<10,0
16.2	<u>V. americana</u>	verte	0,69	2,1	13,7	17,3	109,1	1295	1397	16370	0,9
		souter.	3,30	<5,5	22,8	17,4	174,2	886	13234	16266	<13,2
16.3	<u>V. americana</u>	verte	0,60	2,9	16,0	24,4	94,6	1365	1717	19830	0,6
		souter.	2,59	<4,3	20,7	21,6	139,7	1465	19245	18559	<10,4
16.4	<u>V. americana</u>	verte	1,13	6,5	24,0	32,3	116,3	1578	2696	14310	3,7
		souter.	4,12	8,3	35,9	24,3	197,4	879	13282	14389	<8,4
16.5	<u>V. americana</u>	verte	0,62	3,4	15,0	24,3	96,8	1496	1958	16210	1,4
		souter.	1,39	5,2	27,4	22,6	178,3	830	16030	15560	<10,0
16.3	<u>Nitella</u>	verte	0,02	3,7	10,0	7,6	59,6	1084	1068	76410	1,1
19	<u>V. americana</u>	verte	5,12	4,8	39,0	12,7	202,3	2840	2982	14720	3,4
		souter.	10,39	<3,3	59,2	11,3	183,9	1106	5992	15540	<8,0
26	<u>V. americana</u>	verte	1,14	9,7	29,5	45,8	306,4	6719	4294	10360	4,1
		souter.	<1,10	20,1	37,5	22,9	175,9	1551	31820	9918	10,6
26	<u>P. pectinatus</u>	verte	0,93	1,1	13,3	2,8	60,1	2749	1582	16350	0,9
		souter.	<1,80	10,5	23,2	14,9	97,3	2311	30670	12540	<13,2
28	<u>V. americana</u>	verte	3,37	4,4	39,6	17,5	150,6	1325	2491	12710	1,4
		souter.	13,93	5,8	88,5	23,7	150,0	1580	9273	15220	<7,9
28	<u>P. richardsonii</u>	verte	0,91	3,4	34,2	8,7	65,2	203	1220	15420	1,3
		souter.	<1,10	11,1	37,3	15,5	63,4	401	14790	13740	<8,0

Tableau 7.1 (suite)

St.	Espèce	Partie	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Fe	Ca	Pb
31	<u>V. americana</u>	verte	0,67	2,4	10,9	5,1	61,7	2176	1380	11692	1,7
		souter.	2,74	<3,3	21,8	6,1	200,6	1070	7442	10280	<8,0
31	<u>P. richardsonii</u>	verte	0,38	1,7	8,8	4,9	26,7	975	871	26620	0,8
		souter.	<1,10	<3,3	14,4	<3,6	35,6	620	4483	10940	<8,0
31	algues filamen.	verte	0,49	4,2	19,4	4,6	55,4	1559	3293	15920	3,8
40	<u>V. americana</u>	verte	1,46	2,1	20,8	7,7	98,3	2350	1582	13590	1,2
		souter.	2,70	5,2	33,7	8,8	180,0	917	12810	14970	<8,0
40	algues filamen.	verte	0,66	6,7	25,5	13,1	76,0	13080	6350	22140	3,9
44	<u>V. americana</u>	verte	0,93	2,6	13,6	8,7	97,5	2525	1425	15620	1,9
		souter.	3,22	4,4	21,6	7,3	259,1	1307	5976	14800	<22,0
44	<u>P. richardsonii</u>	verte	0,81	1,8	8,2	3,1	53,6	892	1654	50180	1,5
		souter.	<1,80	<5,6	13,4	<6,1	45,8	788	4215	13950	<13,5
44	<u>M. spicatum</u>	verte	0,22	3,2	8,2	3,7	53,6	892	1654	50180	1,8
		souter.	<1,10	7,4	11,3	<3,6	89,6	4987	19540	14320	<8,0
45	<u>V. americana</u>	verte	0,74	3,9	12,4	3,8	111,8	3182	12943	23850	6,0
46	<u>E. canadensis</u>	verte	0,57	3,6	13,3	7,9	65,3	3182	2507	17960	4,2
		souter.	<1,50	<4,7	16,9	<5,0	71,0	3793	34132	17167	<11,8
47	<u>V. americana</u>	verte	0,93	6,8	21,7	12,0	106,0	1694	6531	14890	8,0
		souter.	<1,10	14,7	28,0	12,2	129,1	1379	44010	14120	12,0
47	<u>H. dubia</u>	verte	0,96	14,2	23,2	12,4	127,7	1058	7869	17610	9,3
		souter.	<1,20	17,3	32,6	19,4	132,3	1891	61840	15430	19,1
48	<u>V. americana</u>	verte	1,60	2,2	21,5	9,5	134,9	2751	4635	12464	4,1
49	<u>V. americana</u>	verte	0,35	5,2	16,3	18,1	102,1	2616	6625	37470	6,8
		souter.	6,20	<4,8	41,1	37,0	247,4	2294	25487	21973	<11,5
50.1	<u>V. americana</u>	verte	1,02	1,8	12,6	4,2	126,2	6118	6486	20040	3,7
		souter.	2,40	<5,1	33,1	6,3	199,5	2876	27400	9811	<12,3
50.2	<u>V. americana</u>	verte	1,18	2,0	15,2	6,8	113,0	5604	3537	11919	2,5
		souter.	1,90	8,5	29,3	5,3	182,2	1329	25560	10030	<8,8
50.3	<u>V. americana</u>	verte	0,93	1,9	14,5	5,0	92,9	5129	1868	11290	2,6
		souter.	1,72	6,2	29,9	7,2	175,3	1416	37840	9989	10,7
50.4	<u>V. americana</u>	verte	1,64	1,4	10,0	4,1	86,9	5608	4851	19690	1,5
		souter.	2,71	<5,4	30,5	<5,8	196,2	3225	26300	9823	<12,9
50.5	<u>V. americana</u>	verte	1,13	1,4	11,4	4,3	83,3	4815	4599	18120	2,2
		souter.	3,10	<6,2	37,0	<6,7	230,8	2796	33767	9054	<14,1
50	<u>P. richardsonii</u>	verte	0,50	6,8	12,0	15,3	55,7	2539	1451	15420	4,1
		souter.	<1,10	<3,3	12,5	<3,6	34,1	815	9324	9074	<8,0

LIMITES DE DETECTION

Les limites de détection ont été déterminées pour les métaux dosés au spectrophotomètre à la flamme et au ICP, et dont les concentrations étaient près des limites supposées. La limite de détection est la concentration équivalente à trois (3) fois l'écart-type calculé à partir de 10 (dix) mesures d'un étalon ayant une concentration aussi près que possible de la limite de détection anticipée, ce qui donne un niveau de confiance de 90%. Ces limites de détection sont les suivantes:

Pb	0.06	µg/ml
Cd	0.008	µg/ml
Cr	0.025	µg/ml
Ni	0.027	µg/ml

Le facteur de dilution de l'échantillon est multiplié par cette limite de détection et apparaît comme une valeur "<" dans les tableaux 7.1 et 7.3 lorsque la concentration dosée est sous la limite de détection du ICP ou du spectrophotomètre à la flamme, et que l'échantillon n'a pas été redosé au four au graphite.

A noter qu'un dépôt de calcium a été observé sur les feuilles des plantes à quelques stations dans le lac (ex.: sur les feuilles du Myriophyllum et du Potamogeton de la station 44). De tels dépôts peuvent augmenter la valeur de biomasse des plantes (Kelly et Ehlmann, 1980). Les méthodes rapportées dans la littérature pour enlever ce dépôt de calcium, qui n'est pas à l'intérieur du tissu biologique mais à l'extérieur, consistent à mettre les parties vertes des plantes dans une solution d'acide chlorhydrique dilué pour un temps plus ou moins long (0,2 N: Salki et Maeda, 1982; 0,24 N: Béland et Demers, 1977; 0,5 N: Kelly et Ehlmann, 1980; et 1,2 N: Raschke et Rusanowski, 1984). Cependant, ces méthodes semblent affecter l'intégrité du tissu foliaire des plantes aquatiques, qui n'est pas cuticularisé comme les feuilles des plantes terrestres; une perte significative en potassium a été notée après un traitement des feuilles de Vallisneria americana pendant deux minutes avec HCl 0,24 N (St-Cyr et Campbell, données non publiées). Les plantes ont donc été soigneusement lavées à l'eau déionisée mais aucune procédure spéciale n'a été utilisée pour enlever ce dépôt de calcium qui peut être considéré comme étant intimement lié à la partie verte des plantes.

VARIABILITE INTRA-SITE

Aux stations d'échantillonnage #16 et 50, au mois d'août 1990, *V. americana* a été récoltée séparément dans 5 quadrats à l'intérieur du site de 7m X 7m, qui ont été analysés séparément afin d'évaluer la variabilité intra-site, soit la variabilité des concentrations de métaux chez les plantes à l'intérieur d'une station donnée (tableau 7.1). Les résultats obtenus sont les suivants:

Station 16 (N=5)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
moyenne	0.74	3.5	16.9	23.9	1.5	104.8
écart-type ±	0.22	1.7	4.1	5.5	1.3	9.0
minimum	0.60	2.1	13.7	17.3	0.6	94.6
maximum	1.13	6.5	24.0	32.3	3.7	116.3
coef. variation	29.6%	49.1%	24.0%	23.2%	84.2%	8.6%

Station 50 (N=5)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
moyenne	1.18	1.7	12.7	4.9	2.5	100.5
écart-type ±	0.28	0.3	2.1	1.1	0.8	18.4
minimum	0.93	1.4	10.0	4.1	1.5	83.3
maximum	1.64	2.0	15.2	6.8	3.7	126.2
coef. variation	23.3%	16.6%	16.9%	23.2%	31.9%	18.3%

La variabilité s'avère importante pour certains métaux à l'un ou l'autre des deux sites (ex.: Cr et Pb à la station 16), signifiant l'hétérogénéité dans la biodisponibilité des métaux à l'intérieur d'un site de 7m X 7m. Il est donc important, comme effectué à toutes les autres stations où des plantes ont été récoltées pour l'analyse des métaux traces, de récolter celles-ci sur toute la superficie à l'étude afin d'obtenir une valeur représentative de la station d'échantillonnage.

Tableau 7.2: Concentrations de métaux traces (en $\mu\text{g/g}$ de tissu sec) dosées dans des échantillons de référence ayant des valeurs certifiées.

Echantillons certifiés	N	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Fe	Ca	Pb
CITRUS	23	ND	ND	16,5 $\pm 0,7$	ND	30,0 $\pm 2,5$	21,7 $\pm 3,2$	84,0 $\pm 21,7$	33398 ± 1376	12,3 $\pm 1,3$
valeurs certifiées		0,03 $\pm 0,01$	0,8 $\pm 0,2$	16,5 $\pm 1,0$	0,6 $\pm 0,3$	29,0 $\pm 2,0$	23,0 $\pm 2,0$	90,0 $\pm 10,0$	31500 ± 1000	13,3 $\pm 2,4$
POMMIER	4	ND	ND	11,7 $\pm 1,1$	ND	24,7 $\pm 2,1$	91,8 $\pm 1,1$	188,4 $\pm 56,0$	20975 ± 448	39,8 $\pm 4,9$
valeurs certifiées		0,11 $\pm 0,01$	2,6 $\pm 0,3$	12,0 $\pm 1,0$	1,3 $\pm 0,2$	25,0 $\pm 3,0$	91,0 $\pm 4,0$	300,0 $\pm 20,0$	20900 ± 300	45,0 $\pm 3,0$
TORT-1	7	26,00 $\pm 0,70$	ND	408,9 $\pm 12,6$	ND	160,2 $\pm 4,4$	21,1 $\pm 2,3$	154,9 $\pm 17,6$	8405 ± 565	ND
valeurs certifiées		26,30 $\pm 2,10$	2,4 $\pm 0,6$	439,0 $\pm 22,0$	2,3 $\pm 0,3$	177,0 $\pm 10,0$	23,4 $\pm 1,0$	186,0 $\pm 11,0$	8950 ± 580	10,4 $\pm 2,0$
FOUR AU GRAPHITE										
TORT-1	4	27,50 $\pm 0,80$	2,8 $\pm 0,2$		2,0					11,0 $\pm 1,1$

ND = non détectable

Les valeurs certifiées sont généralement retrouvées, sauf pour le Fe pour lequel on note une récupération incomplète, variant de 93% dans le cas des feuilles de citronnier à seulement 63% pour les feuilles de pommier. De tels résultats suggèrent la présence dans l'étalon d'oxydes de Fe cristallins, qui résistent à une digestion acide de relativement courte durée dans le four à micro-ondes et/ou une précipitation du Fe qui est parfois observée après un certain temps dans les bouteilles où sont conservés les digestats de même que les standards, bien que ce soit en milieu acide (HNO_3 10% à 15%), et qui pourrait diminuer la concentration en fer dans les échantillons qui ne sont pas dosés peu de temps après la digestion.

Tableau 7.3: Concentrations de métaux traces (Cd,Cr,Cu,Ni,Pb,Zn,Mn,Fe) et de Ca, en µg/g de tissu sec, dans les parties vertes et souterraines de diverses espèces de plantes aquatiques submergées récoltées au lac Saint-Pierre lors de la campagne d'échantillonnage d'octobre 1990.

St.	Espèce	Partie	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Mn	Fe	Ca	Pb
11	<i>Nitella</i>	verte	<1,1	<3,3	86,1	<3,6	249,9	843	1042	30780	<7,9
13	<i>V. americana</i>	verte	2,6	19,2	70,4	106,0	793,3	7179	5924	13140	9,3
		souter.	4,4	<8,2	64,5	21,0	171,5	1384	3872	10565	<19,6
13	<i>H. dubia</i>	verte	<1,1	9,7	43,0	39,1	434,5	6653	3319	10070	<7,9
		sout.	<2,7	11,5	48,3	29,2	223,1	3051	33270	9717	<20,3
14	<i>V. americana</i>	verte	<1,7	<5,5	86,3	<5,9	224,3	2484	2950	20630	<13,1
		souter.	<2,3	<7,2	28,0	<7,8	153,0	925	8157	10621	<17,4
14	<i>H. dubia</i>	verte	<1,1	<3,3	59,3	<3,5	130,2	1732	1370	10000	<7,9
		souter.	<4,6	<14,4	51,4	<15,6	131,7	821	16849	7241	<34,7
14	<i>A. gramineum</i>	verte	<1,1	<3,3	25,7	<3,6	63,5	475	1105	6059	<8,0
		souter.	<1,1	<3,3	25,9	<3,6	68,8	491	7560	3459	<7,9
14	<i>P. richardsonii</i>	verte	<1,1	<3,3	50,2	<3,6	139,0	1598	2369	18330	<7,9
		souter.	<2,6	<8,0	9,3	<8,6	34,6	634	7263	10090	<19,2
26	<i>V. americana</i>	verte	2,2	19,9	63,0	116,5	728,2	22805	6842	15710	<7,9
31	<i>V. americana</i>	verte	2,0	9,2	84,7	15,0	226,6	1819	7473	9324	<10,4
31	<i>P. richardsonii</i>	verte	<1,0	7,4	54,3	<3,5	135,3	2609	5167	13580	
		souter.	<10,2	<31,9	30,6	<34,4	131,5	2470	15360	20590	<76,5
31	<i>H. dubia</i>	verte	<1,1	4,2	45,3	4,1	214,4	2092	2815	9930	<8,0
35	<i>V. americana</i>	verte	1,9	21,3	117,4	111,4	841,5	23650	8883	15180	15,9
44	<i>M. spicatum</i>	verte	<1,1	<3,3	12,0	4,1	67,3	1247	1470	21488	<8,0
		souter.	<1,1	8,7	22,2	6,4	71,5	2159	13890	12051	<8,0
44	<i>Nitella</i>	verte	<2,4	<7,5	42,1	18,6	112,9	5031	3132	19280	<17,9
45	<i>V. americana</i>	verte	1,4	7,0	25,4	6,9	109,8	2989	8971	18816	<8,0
		souter.	<1,1	5,9	18,5	4,6	86,2	1812	20252	9781	<8,0
45	<i>H. dubia</i>	verte	1,7	10,0	29,5	10,3	187,9	1898	7417	9930	<8,0
		souter.	<2,9	<9,2	38,4	19,2	121,9	2224	94960	7594	<22,0
46	<i>E. canadensis</i>	verte	1,6	5,7	31,2	13,3	127,6	3338	3458	15653	<7,9
		souter.	<4,1	<12,9	24,9	22,2	131,3	4156	49090	15610	<31,1
47	<i>V. americana</i>	verte	1,1	11,7	24,4	13,9	131,8	1499	8730	15896	7,8
		souter.	1,9	14,6	28,0	12,8	117,8	1082	41773	12672	<13,0
47	<i>H. dubia</i>	verte	1,5	14,2	24,6	11,3	167,2	632	6393	11871	<7,8
		souter.	<2,4	10,2	35,8	17,0	161,4	1460	142100	12590	<18,0
48	<i>V. americana</i>	verte	<2,4	<7,5	80,7	25,6	169,1	7008	5385	14277	<18,0
49	<i>V. americana</i>	verte	<2,3	9,5	52,9	25,2	160,6	1809	8383	16261	21,7
49	<i>H. dubia</i>	verte	<1,0	13,0	43,8	11,8	145,1	901	5140	8935	13,8
49	<i>M. spicatum</i>	verte	1,0	20,3	46,5	15,8	164,8	1723	10108	14674	23,3
50.1	<i>V. americana</i>	verte	<2,4	<7,4	57,3	12,6	207,3	4156	4332	15452	<17,7
		souter.	<2,1	<6,6	46,0	10,0	181,4	1172	15730	6291	<15,8
50.2	<i>V. americana</i>	verte	<2,4	<7,4	64,2	13,4	197,0	4517	6460	16225	<17,8
		souter.	3,2	<7,3	47,0	12,6	177,9	1304	12910	7814	<17,6
50.3	<i>V. americana</i>	verte	1,8	3,4	28,1	8,6	134,8	3081	3729	13959	<8,0
		souter.	<2,3	12,1	26,3	10,2	129,2	1104	5147	5384	<17,3
50.4	<i>V. americana</i>	verte	<2,4	<7,5	75,8	12,3	173,0	4279	1976	12115	<18,0
		souter.	<3,3	<10,2	90,9	12,7	239,1	1350	17900	12260	<24,5

ANNEXE 8

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES DONNEES DE BIOMASSE ET DES QUANTITES ET CONCENTRATIONS DE METAUX ASSOCIEES AUX MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE ET OBTENUES LORS DE L'ECHANTILLONNAGE DU MOIS D'AOUT 1990.

par KATERI GUERTIN

1. OBJECTIFS.

Cette étude a pour but principal d'évaluer la répartition spatiale de divers phénomènes définis à l'intérieur du lac Saint-Pierre au moyen de techniques géostatistiques d'estimation. Les phénomènes analysés sont les suivants:

- la biomasse de la partie verte des macrophytes submergés échantillonnés en août 1990;
- les quantités de métaux associées à la biomasse de ces plantes, les 9 métaux analysés étant le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn), le manganèse (Mn), le fer (Fe), le calcium (Ca) et le plomb (Pb);
- les concentrations en métaux correspondantes.

On désire également évaluer la quantité totale de biomasse présente dans la partie verte des macrophytes submergés ainsi que le contenu total de métaux accumulés, et quantifier les niveaux de précision associés.

2. APPROCHE GEOSTATISTIQUE APPLIQUEE AUX DONNEES ENVIRONNEMENTALES.

La géostatistique est une branche des statistiques appliquées qui traite particulièrement de l'évaluation spatio-temporelle de phénomènes répartis dans l'espace et le temps et qui est basée sur une approche probabiliste.

Développée pour l'évaluation de ressources minières, les diverses techniques géostatistiques ont été progressivement adaptées et appliquées à l'estimation de phénomènes régionalisés associés à des domaines divers tels que l'hydrologie, la mécanique des roches, l'environnement, etc.. Les principaux ouvrages de références théoriques et pratiques traitant des techniques géostatistiques de base sont les suivants: David (1977), Journel et Huijbregts (1978) et Clark (1979).

2.1 Concepts de base.

La géostatistique offre un ensemble de techniques pouvant mener à la caractérisation spatio-temporelle d'un phénomène d'intérêt. Elle utilise une approche systématique et objective qui permet de tirer profit au maximum de l'information disponible (souvent très limitée).

Les diverses techniques géostatistiques d'estimation sont basées sur la quantification et la modélisation de la structure de variabilité spatiale du phénomène étudié au moyen d'une fonction appelée semi-variogramme. Cette fonction, qui quantifie le taux moyen de variabilité entre les données en fonction de la distance séparant ces données, caractérise le phénomène à l'étude.

De plus, la fonction structurale du semi-variogramme permet d'optimiser au préalable l'addition ultérieure de stations d'échantillonnage en tenant compte de la nature du phénomène et de l'information disponible.

Les techniques d'estimation par krigeage sont optimales en ce sens que la variance de l'erreur d'estimation est minimisée au cours du processus; cette variance d'estimation, qui est une fonction du semi-variogramme établi pour le phénomène, quantifie le degré d'incertitude (ou le risque) associé à l'estimation.

A partir d'un réseau de données "quasi-ponctuelles" recouvrant la zone d'étude et localisées sur une grille d'échantillonnage régulière ou non, on peut estimer le phénomène sur un ensemble d'unités de surface (ou de volume) plus ou moins grandes selon le besoin. Un tel changement de support (le passage de données "quasi-ponctuelles" à des unités de surface plus importantes) permet de produire des cartes de valeurs estimées (krigées) comparables à partir d'ensembles de données différents; par exemple, à partir des réseaux (non identiques) d'analyses de la biomasse des plantes des campagnes d'août et octobre 1990, on peut produire et comparer les cartes de la biomasse estimée sur des unités de surface de $4 \times 4 \text{ km}^2$ recouvrant le lac Saint-Pierre.

Il est important de préciser que les diverses techniques géostatistiques d'estimation offrent un "compte-rendu" de la situation analysée et que les résultats obtenus sont entièrement dépendants de la nature du phénomène étudié et de l'information de base disponible:

- plus le phénomène est continu et homogène, plus les résultats seront précis; en présence d'un phénomène erratique, le niveau de précision demeurera faible (risque élevé) en dépit d'un échantillonnage adéquat; l'avantage de la géostatistique sera alors d'utiliser au maximum l'information disponible, de quantifier ce niveau de précision et d'améliorer ainsi la connaissance du phénomène;

- plus l'information disponible est fiable et abondante, plus les résultats seront adéquats et précis; par exemple, il est essentiel d'éviter un échantillonnage préférentiel de la contamination qui fausserait à la base la représentation du phénomène dans l'ensemble de la zone d'étude; en pratique, un minimum d'environ 30 données est requis pour une application rigoureuse des techniques statistiques et géostatistiques proposées; lorsque ce minimum n'est pas satisfait, le niveau de représentativité statistique du phénomène par les données peut être remis en question.

2.2 Protocole de traitement géostatistique.

A la base de tout traitement géostatistique d'estimation, on retrouve une analyse structurale de la variabilité spatiale du phénomène traité suivie de l'application proprement dite d'une technique de krigeage qui produit les valeurs estimées ainsi qu'une évaluation du risque associé à ces valeurs.

2.2.1 Analyse structurale de variabilité.

L'analyse structurale de variabilité d'un phénomène est réalisée à partir des données disponibles et quantifie le niveau de variabilité spatiale du phénomène (i.e., en fonction de la distance entre chaque paire de données). En général, la fonction de semi-variogramme résultante croît avec la distance jusqu'à ce qu'elle atteigne un palier (C_0+C) à une distance appelée portée (a) (fig. 1). Cela signifie que deux données sont linéairement corrélées tant qu'elles sont séparées par une distance inférieure à la portée; lorsque la distance entre ces données est égale ou supérieure à la portée, elles ne sont plus spatialement corrélées. Le plus souvent, on observe également une discontinuité à l'origine, ou effet de pépite (C_0), qui représente le palier d'une micro-structure de variabilité dont la portée très courte ne peut être évaluée étant donné l'échelle trop grande de l'information disponible. Un modèle mathématique satisfaisant des critères et conditions pré-définies (modèles positifs définis, Journel et Huijbregts, 1978, pp.35 et 161) est ajusté aux valeurs expérimentales du semi-variogramme puis introduit dans le système de krigeage de

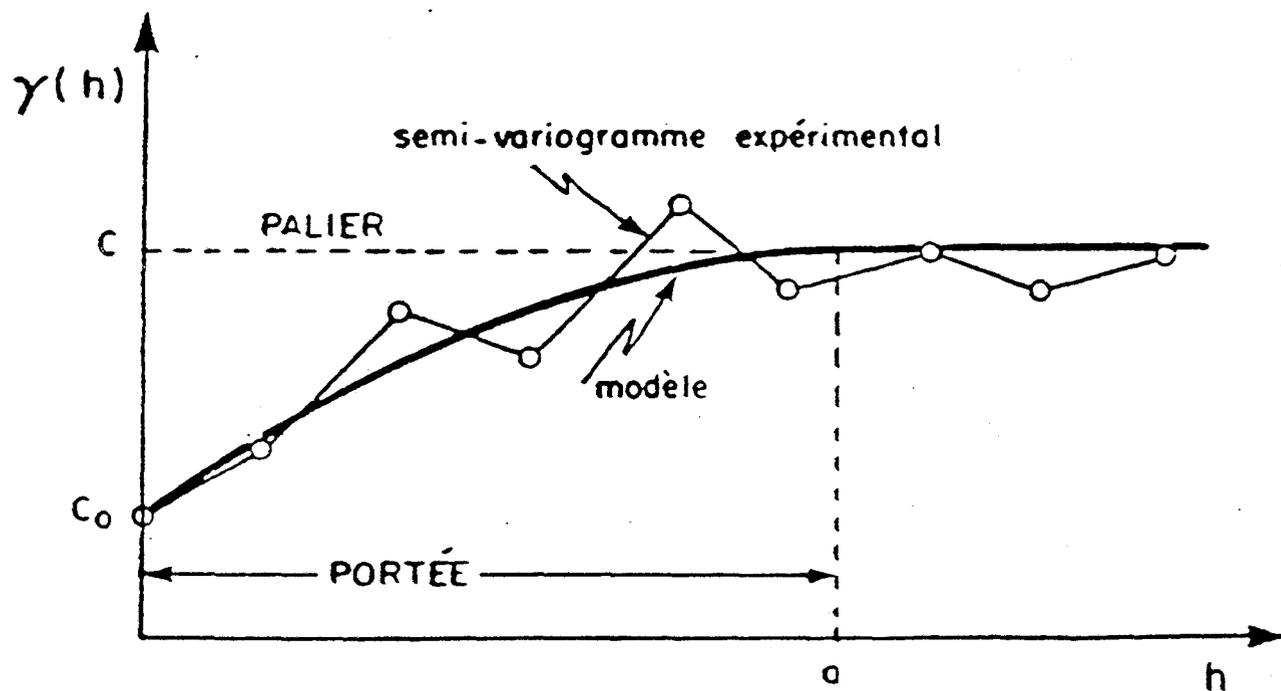


Figure 1: Paramètres d'un modèle mathématique à palier ajusté aux valeurs expérimentales d'une fonction structurale de semi-variogramme.

façon à minimiser la variance de l'erreur d'estimation associée à chaque valeur krigée. Il faut noter qu'en présence d'un ensemble de données très restreint, l'ajustement du modèle mathématique est fait de manière conservatrice afin de ne pas sousestimer le taux de variabilité et conséquemment surestimer le niveau de précision associée.

Lorsque l'information est suffisante, il est possible d'identifier, s'il y a lieu, la structure de variabilité directionnelle préférentielle (anisotropie) qui caractérise le phénomène à l'étude. Très souvent, toutefois, le nombre de données de base ne permet pas de déceler une telle anisotropie et le semi-variogramme calculé est alors omnidirectionnel (isotropie), ce qui signifie que le taux de variabilité spatiale est considéré identique dans toutes les directions.

Dans certains cas, aucune structure de variabilité ne peut être identifiée de sorte que des modèles structuraux à "effet de pépite pur" sont utilisés: cela signifie qu'aucune corrélation spatiale n'existe en fonction de la distance et que chaque donnée est linéairement indépendante des autres peu importe la distance qui la sépare de ces données (Journel et Huijbregts, 1978).

2.2.2 Technique de krigeage ordinaire.

En pratique, on a le plus souvent recours à la technique du krigeage ordinaire, identifié comme étant le "meilleur estimateur linéaire sans biais" (Journel et Huijbregts, 1978). Plus précisément, cet estimateur est optimal par rapport à un critère de minimisation de la variance de l'erreur d'estimation. La valeur krigée attribuée à chaque unité de surface est une combinaison linéaire des données avoisinantes, chaque donnée étant pondérée en fonction de sa position par rapport à l'unité et du modèle ajusté à la fonction structurale calculée pour le phénomène étudié. La variance de l'erreur d'estimation (ou plus simplement variance d'estimation) associée à la valeur krigée quantifie son niveau d'incertitude et est fonction de la nature du phénomène, de sa structure de variabilité spatiale et de la configuration des données par rapport à l'unité estimée. Par exemple, pour une même configuration d'information, les variances d'estimation pour un phénomène erratique seront plus élevées que pour un phénomène continu; également, pour un phénomène donné, un krigeage basé sur un ensemble de données dense résultera en des variances d'estimation plus faibles (précisions plus élevées) qu'un krigeage basé sur un ensemble de données éparses. Enfin, le changement de support associé au krigeage d'unités de surface de taille non négligeable à partir de données "quasi-punctuelles" entraîne un lissage des valeurs krigées extrêmes

(et conséquemment une diminution de la variabilité des valeurs estimées) qui s'accroît avec la taille des unités de surface considérées. Ce lissage, dû au changement de support, s'ajoute au lissage de base qui est caractéristique des techniques d'estimation par krigeage (Journel et Huijbregts, 1978, p.450).

3. DONNEES DISPONIBLES.

Afin de visualiser la zone d'étude et d'en simplifier le contour, le lac Saint-Pierre est discrétisé (manuellement) en une matrice d'unités de surface de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

Deux types de données sont disponibles:

- les données de fond échantillonnées à partir d'un réseau de 39 stations de 49 m^2 réparties dans les îles de Sorel et le lac Saint-Pierre;
- les données de télédétection représentant la biomasse moyenne des plantes à l'intérieur des unités de surface de $1 \times 1 \text{ km}^2$ recouvrant le lac et les îles de Sorel et formant un ensemble de 403 données régulièrement espacées.

Ces dernières données sont éditées à partir d'une image du lac Saint-Pierre prise lors d'un vol et calibrées selon les données de fond de biomasse (Lavoie et al., 1991).

Idéalement, un ensemble de données de télédétection définies sur un support d'un pixel (49 m^2) aurait permis de joindre ces données de biomasse aux données de fond également définies sur une surface de 49 m^2 . Toutefois, la courbe de régression du calibrage de l'image n'étant valide qu'à 65%, la fiabilité des valeurs de biomasse par pixel est remise en question. On considère donc que les moyennes spatiales des valeurs de biomasse définies sur des unités de $1 \times 1 \text{ m}^2$ à l'intérieur de surfaces de $1 \times 1 \text{ km}^2$ sont plus représentatives de la répartition spatiale du phénomène étudié.

Enfin, il faut souligner que les données provenant de ces deux ensembles sont considérées comme étant sans erreur lorsqu'elles sont introduites dans le processus d'analyse géostatistique.

4. PREPARATION DES DONNEES.

Les données de fond recueillies lors de la campagne du mois d'août 1990 sont décrites en détail dans St-Cyr et Campbell (1991a). Ces données, qui sont initialement établies par type de plante et par quadrat à l'intérieur de chaque station de 49 m^2 , doivent être réévaluées en termes de biomasse totale par station (BIO, en kg de tissu sec / 49 m^2) et de concentration en

métal associée ([Mét], en mg/kg de tissu sec). La quantité de métal correspondante par station est alors définie comme le produit de la biomasse totale par la concentration de métal ($QTE-Mét = BIO * [Mét]$) et est exprimée en mg/49 m².

Toutefois, en pratique, c'est la concentration qui est estimée comme étant le quotient de la quantité de métal krigée par la biomasse totale krigée et non pas la quantité de métal qui est estimée comme le produit de la biomasse krigée par la concentration krigée. En effet, on ne peut estimer directement une concentration en métal à partir de données de concentrations qui sont associées à des quantités de biomasse variables dans la zone d'étude; une telle variable de travail est dite non-additive (Journel et Huijbregts, 1978, p. 199; Guertin *et al.*, 1988). Chaque donnée de concentration doit être pondérée par la biomasse associée afin de ne pas induire un biais dans l'estimation; cette pondération se fait par l'intermédiaire des quantités de métaux.

La sélection des données par station est donc faite en fonction des trois critères suivants:

- la biomasse totale (i.e., de toutes les plantes) doit être disponible;
- les concentrations de métaux analysées doivent correspondre à la biomasse totale de la station, de façon à pouvoir calculer les quantités de métaux de la station;
- les concentrations en métaux disponibles doivent être utilisées autant que possible, ces analyses étant peu nombreuses et coûteuses.

L'**annexe 8.1** décrit les données retenues ainsi que les hypothèses invoquées lors de leur sélection et les conséquences qui s'ensuivent. Il en résulte deux ensembles de données:

- 30 données de biomasse totale, et;
- 21 données de quantités de métaux.

L'**annexe 8.2** liste les coordonnées des 39 stations du réseau ainsi que les valeurs de biomasse totale et les quantités et concentrations de métaux retenues (manquantes (-9,99) et non manquantes) telles qu'utilisées dans l'analyse statistique et géostatistique; on y précise également les unités des diverses variables dont certaines ont été modifiées (par un facteur de 1000) pour en faciliter le traitement.

D'autre part, tel que mentionné plus-haut, on dispose d'un ensemble de 403 données de télédétection réparties selon une grille régulière de 1x1 km² recouvrant le lac. Ces données de biomasse moyenne, exprimées en kg/m², sont transformées en kg/49 m² en multipliant chaque valeur par 49; on suppose alors que la biomasse est répartie uniformément à l'intérieur de

chaque $1 \times 1 \text{ km}^2$. L'annexe 8.3 présente la liste de ces 403 données de biomasse disponibles pour l'analyse.

5. DEFINITION DE LA ZONE D'ESTIMATION.

La zone d'estimation est limitée par l'ensemble de données le plus restreint, celui des quantités de métaux. Tout d'abord, le secteur des îles de Sorel, qui compte 4 données de QTE-Mét isolées des autres, est abandonné. Deuxièmement, le secteur du lac qui contient les 17 données restantes est divisé en 16 unités de surface de $4 \times 4 \text{ km}^2$ tel qu'illustré à la fig. 2. Etant donné le nombre très restreint de données, des unités de surface plus petites ne pourraient être estimées avec un niveau de précision acceptable. Le point le plus au sud-ouest de la grille d'unités a pour coordonnées 654000 (mètres) UTM-EST et 510700 (mètres) UTM-NORD.

Il reste donc 17 quantités de métaux et 25 données de biomasse de fond à l'intérieur de la zone d'estimation ainsi définie. De l'ensemble de données de télédétection, on retient les 244 valeurs de biomasse totale situées à l'intérieur de cette zone, soit environ 16 données par unité de $4 \times 4 \text{ km}^2$ réparties de façon régulière (fig. 3); ces 244 données sont identifiées par un indicateur égal à 1 dans l'annexe 8.3.

6. STATISTIQUES PONDEREES DES DONNEES.

Le calcul des paramètres statistiques caractérisant les données disponibles est pondéré en fonction de leur position à l'intérieur de la zone d'étude afin de ne pas surestimer l'importance des données regroupées localement par rapport à des données plus isolées. Cette pondération est surtout essentielle au calcul des statistiques des données de fond (biomasse, quantité de métaux et concentrations de métaux) qui sont erratiques et irrégulièrement réparties dans la zone; les données de télédétection (biomasse), qui sont localisées sur une grille régulière, procurent automatiquement à un calcul de statistiques uniformément pondérées. On décrit donc les données à l'aide des paramètres statistiques suivants: le nombre de données (N), la moyenne (m), l'écart-type (ét), le coefficient de variation ($cv = \text{ét}/m$) ainsi que les valeurs minimale (min), médiane (méd) et maximale (max).

Les statistiques pondérées des 25 données de biomasse de fond et des 244 données de biomasse de télédétection sont présentées au tableau 1. On observe tout d'abord que les moyennes globales des deux ensembles de données sont similaires ($4,94$ et $4,50 \text{ kg}/49 \text{ m}^2$, respectivement), traduisant ainsi le non-biais global.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

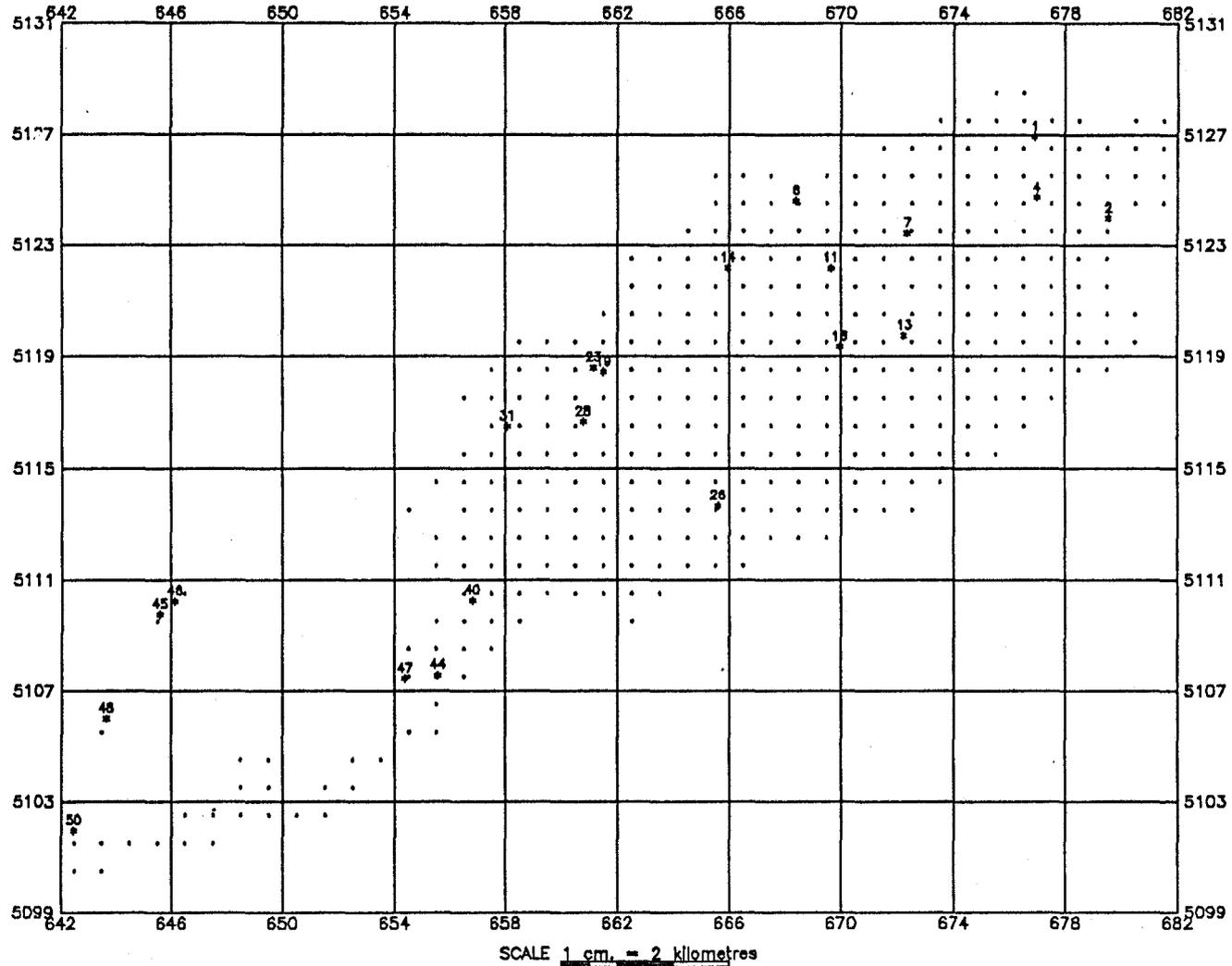


Figure 2: Zone d'estimation formée de 16 unités de 4 X 4 km² et emplacement des 21 quantités de métaux dont 17 seulement se trouvent à l'intérieur de la zone - campagne du mois d'août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

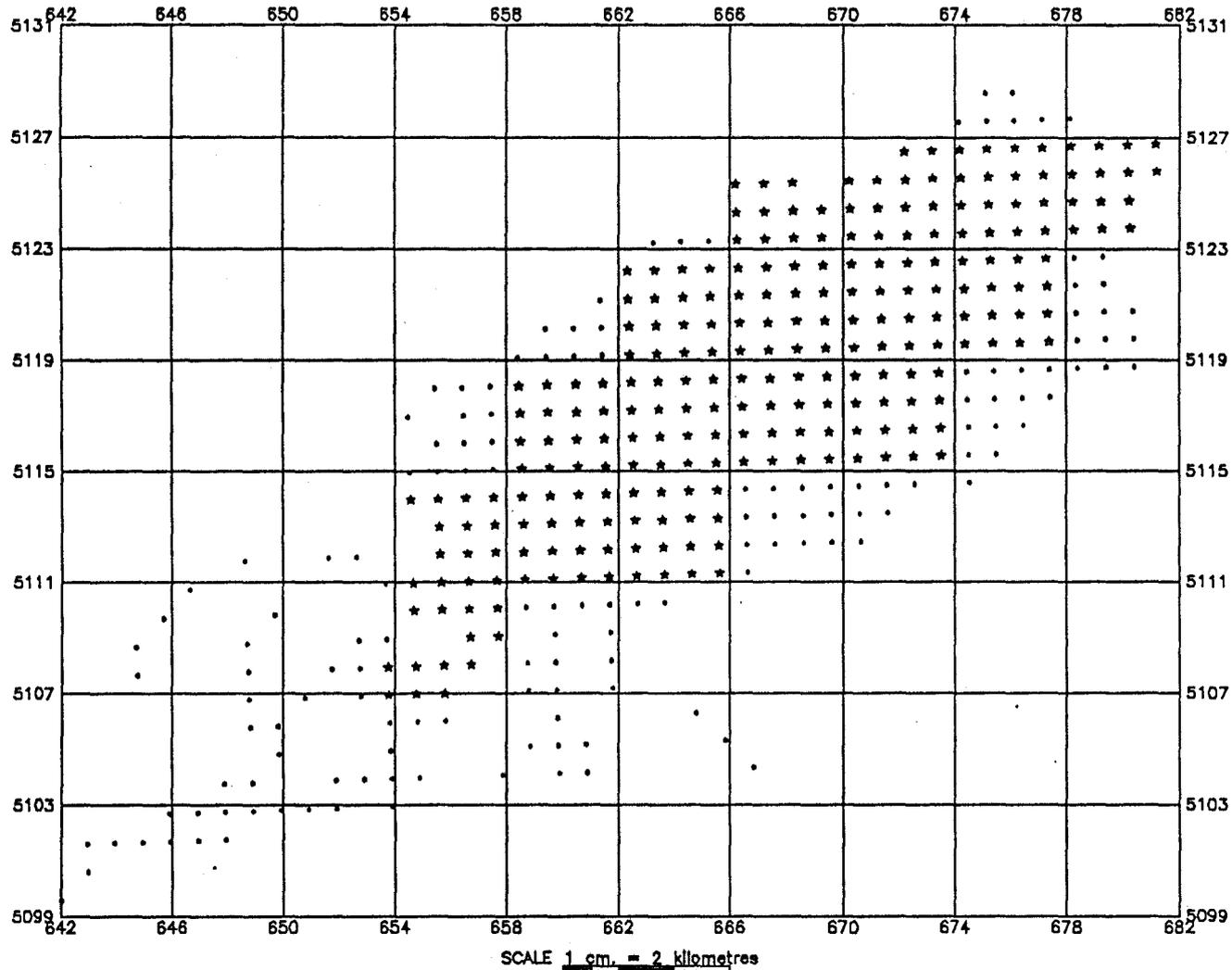


Figure 3: Zone d'estimation formée de 16 unités de 4 X 4 km² et emplacement des 403 données de biomasse de télédétection dont 244 (représentées par une étoile) se trouvent à l'intérieur de la zone - image du 26 juillet 1990.

Tableau 1: Statistiques pondérées des données de biomasse et des quantités et concentrations de métaux associées à la partie verte des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, août 1990.

VARIABLE	UNITE	N	m	ét	cv	min	méd	max
BIO/FOND	kg/49 m ²	25	4,94	4,55	0,92	0,00	4,52	22,38
BIO/TEL	kg/49 m ²	244	4,50	3,23	0,72	0,18	3,14	11,05

VARIABLE	UNITE	N	m	ét	cv	min	méd	max
QTE-Cd	mg/49 m ²	17	5,89	7,34	1,25	0,00	4,42	30,28
QTE-Cr	mg/49 m ²	17	17,52	15,01	0,86	0,00	18,82	57,59
QTE-Cu	mg/49 m ²	17	84,34	97,88	1,16	0,00	83,21	547,73
QTE-Ni	mg/49 m ²	17	54,66	50,45	0,92	0,00	45,51	189,70
QTE-Pb	mg/49 m ²	17	13,78	13,84	1,00	0,00	10,32	44,44
QTE-Zn	mg/49 m ²	17	460,91	433,47	0,94	0,00	368,22	1553,59
QTE-Mn	g/49 m ²	17	13,57	15,80	1,16	0,00	7,84	48,27
QTE-Fe	g/49 m ²	17	10,05	9,10	0,91	0,00	10,83	36,58
QTE-Ca	g/49 m ²	17	100,16	194,95	1,95	0,00	53,30	1057,11

VARIABLE	UNITE	N	m	ét	cv	min	méd	max
[Cd]	mg/kg	18	0,99	0,92	0,94	0,00	0,91	5,10
[Cr]	mg/kg	18	3,90	3,30	0,84	0,00	3,86	11,50
[Cu]	mg/kg	18	15,70	10,50	0,67	0,00	17,40	39,00
[Ni]	mg/kg	18	10,40	7,90	0,76	0,00	10,50	23,60
[Pb]	mg/kg	18	3,20	3,10	0,96	0,00	2,10	10,70
[Zn]	mg/kg	18	90,10	59,50	0,66	0,00	98,30	202,30
[Mn]	g/kg	18	2,30	1,82	0,79	0,00	1,53	5,14
[Fe]	g/kg	18	2,59	2,33	0,90	0,00	1,94	9,46
[Ca]	g/kg	18	14,91	15,08	1,01	0,00	14,68	66,91

où:

- N = le nombre de données
- m = la moyenne
- ét = l'écart-type
- cv = le coefficient de variation (ét/m)
- min = valeur minimale
- méd = valeur médiane
- max = valeur maximale

des 25 données de fond dans l'ensemble du secteur du lac. De plus, on observe que le taux de variabilité (cv) des données de fond est supérieur à celui des données de télédétection. Cela s'explique par les différents "supports" de définition des deux ensembles de données: les données de fond, définies sur des unités de 49 m², sont quasi-ponctuelles et donc plus variables, alors que les données de télédétection représentent des moyennes à l'intérieur d'unités de surface de 1x1 km² et sont spatialement moins variables. Etant donné cette différence au niveau de la définition des deux ensembles de données, on ne peut les combiner en un seul ensemble de données de biomasse, ce qui aurait permis d'envisager un cokrigage des quantités de métaux à l'aide des données de biomasse de télédétection. Dans le cas présent, la similarité des moyennes globales permet, d'une part, de baser l'estimation de la biomasse sur l'ensemble de données de télédétection qui est beaucoup plus complet et, d'autre part, d'entreprendre l'estimation des quantités de métaux à partir des données de fond.

Les paramètres statistiques des quantités de métaux et des concentrations correspondantes pour chacun des 9 métaux traités sont également présentés au tableau 1. Autant pour les quantités que pour les concentrations, les taux de variabilité fluctuent autour de 1,0 pour les 9 métaux. Tel que mentionné à la section 4, l'estimation des concentrations se fait par l'intermédiaire des quantités de métaux étant donné que la biomasse de fond, dont le coefficient de variation est de 0,92, est aussi et parfois même plus variable que les concentrations en métaux associées.

7. TRAITEMENT GEOSTATISTIQUE D'ESTIMATION LOCALE.

On procède successivement à l'estimation par krigeage ordinaire de la biomasse et des quantités de métaux associées. Puis, les concentrations en métaux correspondantes sont estimées en faisant le quotient des quantités de métaux krigées par la biomasse krigée. Pour toutes les variables traitées, les résultants d'estimation sont décrits à l'aide des paramètres statistiques suivants: le nombre d'unités estimées (N_e), la moyenne (m_e), l'écart-type ($ét_e$) et le coefficient de variation (cv_e) des valeurs estimées, les valeurs estimées minimale (min_e) et maximale (max_e) ainsi que l'écart-type d'estimation moyen ($étem_e$) d'une unité de surface de 4x4 km². Plus précisément, ce dernier paramètre est défini comme étant la moyenne des écarts-types d'estimation (qui sont les racines carrées des variances de l'erreur d'estimation locale obtenues pour chaque unité estimée) des 16 unités de la zone. Lorsque divisé par la moyenne des valeurs estimées (m_e), cet écart-type d'estimation moyen offre une mesure de précision locale en

établissant le risque moyen relatif associé à des résultats d'estimation d'unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$.

7.1 Estimation de la biomasse.

Afin de maximiser la précision associée à l'estimation, il est nécessaire d'utiliser le maximum d'information disponible. Comme on ne peut combiner les données de biomasse de fond et de télédétection qui représentent respectivement des valeurs quasi-ponctuelles et des moyennes sur $1 \times 1 \text{ km}^2$, on utilise l'ensemble le plus grand de 244 données de télédétection comme base pour l'analyse structurale et le krigeage de la biomasse.

L'analyse structurale permet d'identifier une structure de variabilité spatiale directionnelle. En effet, le taux de variabilité du phénomène est moins prononcé dans la direction de 35 degrés E-NE, qui correspond plus ou moins à l'axe longitudinal du lac, que dans la direction perpendiculaire, soit 35 degrés N-NO. Les paramètres de cette structure d'anisotropie zonale sont quantifiés à l'aide d'un modèle mathématique ajusté aux courbes expérimentales des variogrammes directionnels sur une distance de 6 km. Ces paramètres sont présentés à l'annexe 8.4.

La technique de krigeage ordinaire est ensuite utilisée comme suit: chaque unité de surface de $4 \times 4 \text{ km}^2$ est estimée par une combinaison linéaire des données situées à l'intérieur d'un rayon de recherche de 3 km autour du centre de l'unité; certaines données situées autour de la zone d'estimation sont alors incluses dans le processus de krigeage afin d'améliorer l'estimation des unités en bordure de la zone; dans ce cas, le minimum requis de 2 données à l'intérieur du rayon de recherche de chaque unité est aisément satisfait pour les 16 unités à kriger.

Les paramètres statistiques des résultats de krigeage sont décrits au tableau 2. On observe tout d'abord que la moyenne globale des valeurs krigées ($m_e = 4,37 \text{ kg}/49 \text{ m}^2$) est voisine de celle des données de télédétection ($m = 4,50 \text{ kg}/49 \text{ m}^2$, tableau 1); en pratique, la moyenne des valeurs krigées est préférée car elle est pondérée en fonction de la structure de variabilité du phénomène. D'autre part, le taux de variabilité des valeurs krigées est réduit par rapport à celui des données originales ($cv = 0,72$ et $cv_e = 0,44$); cela s'explique par le changement de support (de $1 \times 1 \text{ km}^2$ à $4 \times 4 \text{ km}^2$) et l'effet de lissage du krigeage (Journel et Huijbregts, p.450). Le niveau d'incertitude associé à ces résultats d'estimation locale et quantifié par un écart-type d'estimation moyen relatif ($\text{étemr}_e/m_e$) de % est très faible. Cela s'explique, entre

Tableau 2: Résultats d'estimation locale de la biomasse et des quantités et concentrations de métaux associées à la partie verte des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, août 1990.

VARIABLE	UNITE	N_e	m_e	$ét_e$	cv_e	$étem_e$	$étem_e/m_e$	min_e	max_e
BIO/FOND	kg/49 m ²	16	5,11	2,57	0,50	1,91	0,37	1,93	10,79
BIO/TEL	kg/49 m ²	16	4,37	1,93	0,44	0,44	0,07	1,70	8,06

VARIABLE	UNITE	N_e	m_e	$ét_e$	cv_e	$étem_e$	$étem_e/m_e$	min_e	max_e
QTE-Cd	mg/49 m ²	16	6,89	3,82	0,56	4,23	0,61	1,73	12,05
QTE-Cr	mg/49 m ²	16	18,84	6,92	0,37	7,40	0,39	7,68	29,74
QTE-Cu	mg/49 m ²	16	106,56	60,88	0,57	61,20	0,57	23,02	202,82
QTE-Ni	mg/49 m ²	16	60,03	23,45	0,39	26,25	0,44	14,24	105,71
QTE-Pb	mg/49 m ²	16	13,27	3,99	0,30	7,34	0,55	6,00	21,37
QTE-Zn	mg/49 m ²	16	493,84	219,30	0,44	225,18	0,46	127,09	866,79
QTE-Mn	g/49 m ²	16	14,04	8,50	0,61	9,56	0,68	1,31	27,92
QTE-Fe	g/49 m ²	16	11,01	5,35	0,49	4,23	0,38	3,52	23,82
QTE-Ca	g/49 m ²	16	125,04	101,61	0,81	39,95	0,32	26,01	404,55

VARIABLE	UNITE	N_e	m_e	$ét_e$	cv_e	$étem_e$	$étem_e/m_e$	min_e	max_e
[Cd]	mg/kg	16	1,98	1,39	0,70	1,22	0,62	0,26	4,69
[Cr]	mg/kg	16	5,40	3,20	0,59	2,20	0,41	1,20	11,20
[Cu]	mg/kg	16	31,30	23,60	0,75	17,70	0,56	3,70	86,80
[Ni]	mg/kg	16	18,00	11,90	0,66	7,80	0,43	2,30	37,30
[Pb]	mg/kg	16	3,80	2,30	0,61	2,20	0,57	1,20	10,10
[Zn]	mg/kg	16	144,00	92,60	0,64	66,30	0,46	20,30	309,70
[Mn]	g/kg	16	4,10	3,13	0,76	2,75	0,67	0,21	10,38
[Fe]	g/kg	16	3,16	1,99	0,63	1,26	0,40	0,56	7,28
[Ca]	g/kg	16	32,43	23,84	0,73	12,05	0,37	3,23	101,24

où:

- N_e = le nombre d'unités estimées
- m_e = la moyenne des valeurs krigées
- $ét_e$ = l'écart-type
- cv_e = le coefficient de variation des valeurs krigées
- $étem_e$ = l'écart-type d'estimation moyen d'une unité de surface de 4 X 4 km²
- $étem_e/m_e$ = l'écart-type d'estimation moyen relatif
- min_e = valeur estimée minimale
- max_e = valeur estimée maximale

autres, par un échantillonnage serré et régulier sur l'ensemble de la zone d'intérêt et par un effet de pépité nul (annexe 7.4); en effet, les courbes expérimentales des semi-variogrammes directionnels sont extrapolées vers une ordonnée à l'origine (ou effet de pépité) égale à zéro. Enfin, on présente à la fig. 4 la carte des valeurs krigées de biomasse pour les 16 unités de 4x4 km² formant la zone d'estimation.

Afin de souligner l'importance de l'ensemble des données de télédétection dans l'estimation de la biomasse, on compare les résultats obtenus ci-dessus avec ceux du krigeage de la biomasse basé sur les 25 données de fond. Premièrement, l'analyse structurale basée sur un nombre aussi limité de données résulte en un modèle de variabilité spatiale omnidirectionnel ajusté sur une distance de 12 km (annexe 8.4). Ensuite, le krigeage est effectué en considérant un rayon de recherche de 6 km autour du centre de chaque unité de 4x4 km² à estimer et un minimum de 2 données par unité. On remarque que la moyenne globale des unités krigées est de 5,11 kg/49 m² (tableau 2), ce qui est semblable à la moyenne pondérée des 25 données (4,94 kg/49 m²) mais considérablement supérieur à la moyenne obtenue par krigeage des données de télédétection (4,37 kg/49 m²). De plus, le niveau moyen relatif d'incertitude locale, quantifié à 37%, est considérablement plus élevé que le niveau associé au krigeage des données de télédétection. Enfin, la carte des valeurs krigées résultante (fig. 5) ne correspond pas du tout à celle de la fig. 4; un coefficient de corrélation de -0.18 entre les valeurs krigées des deux ensembles quantifie cette absence de corrélation locale. Les 25 données de biomasse de fond ne produisent donc pas une estimation locale fiable (d'où leur niveau d'incertitude de 37%) et l'ensemble de données de télédétection leur est préféré pour l'estimation de la biomasse.

7.2 Estimation des quantités de métaux.

Dans le cas des quantités de métaux, on ne dispose que de 17 données par métal à l'intérieur de la zone d'estimation. Cette information est extrêmement limitée. Dans un tel cas, le krigeage ordinaire étant la technique géostatistique d'estimation la plus simple et la plus robuste, cette approche demeure la plus valable en autant que l'on garde en mémoire le degré d'incertitude associé aux valeurs estimées. Il faut souligner, de plus, que l'on suppose au départ que le semi-variogramme basé sur un nombre aussi limité de données est représentatif de la vraie structure de variabilité spatiale du phénomène à l'intérieur de la zone d'étude. En pratique, la seule approche valable consiste à ajuster des modèles structuraux simples, omnidirectionnels et conservateurs de façon à ne pas sous-estimer les niveaux de variabilité spatiale et conséquemment les niveaux d'incertitude qui en découlent.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

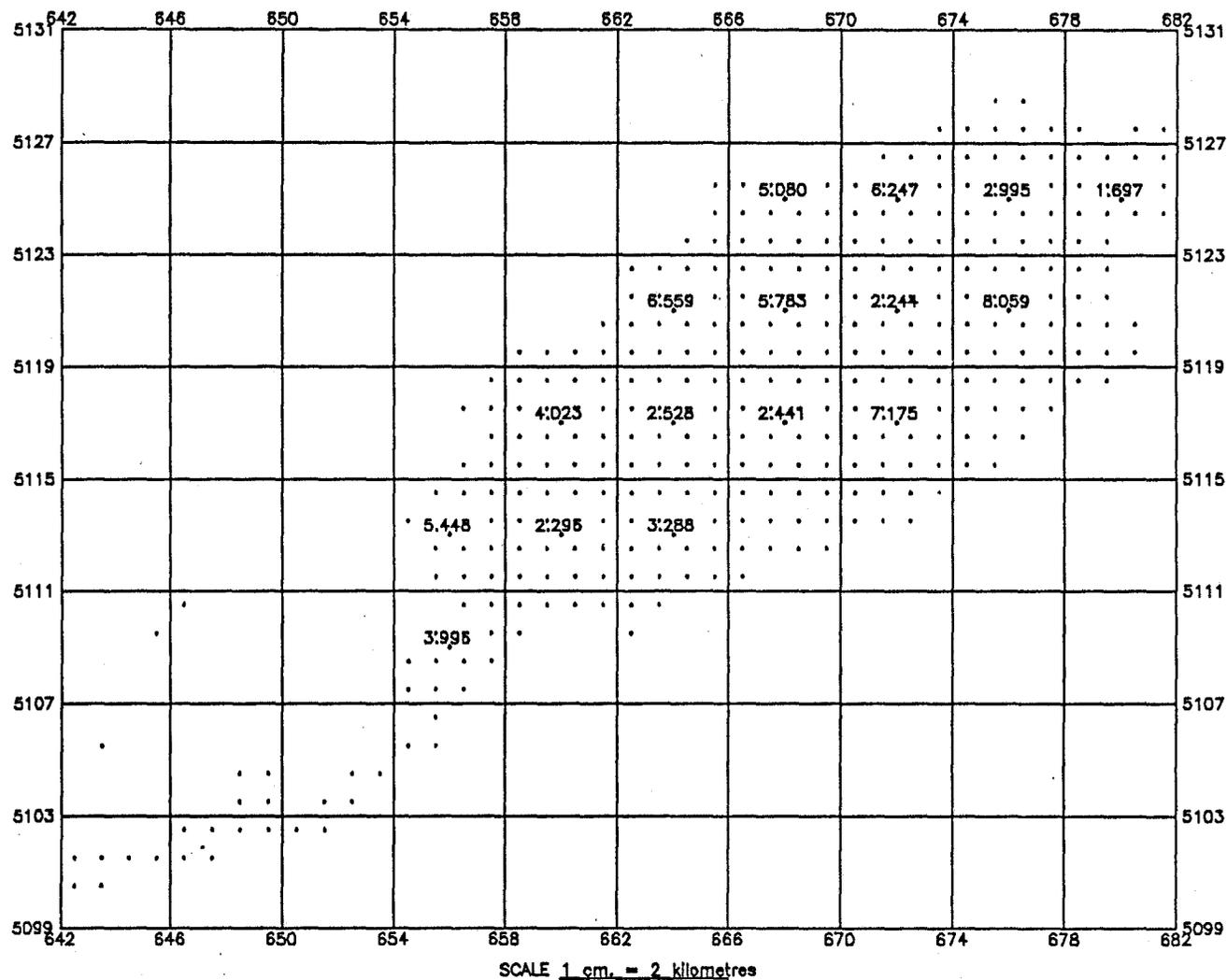


Figure 4: Carte des valeurs krigées de biomasse totale (en kg/49 m²) basées sur les données de télédétection pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - 26 juillet 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

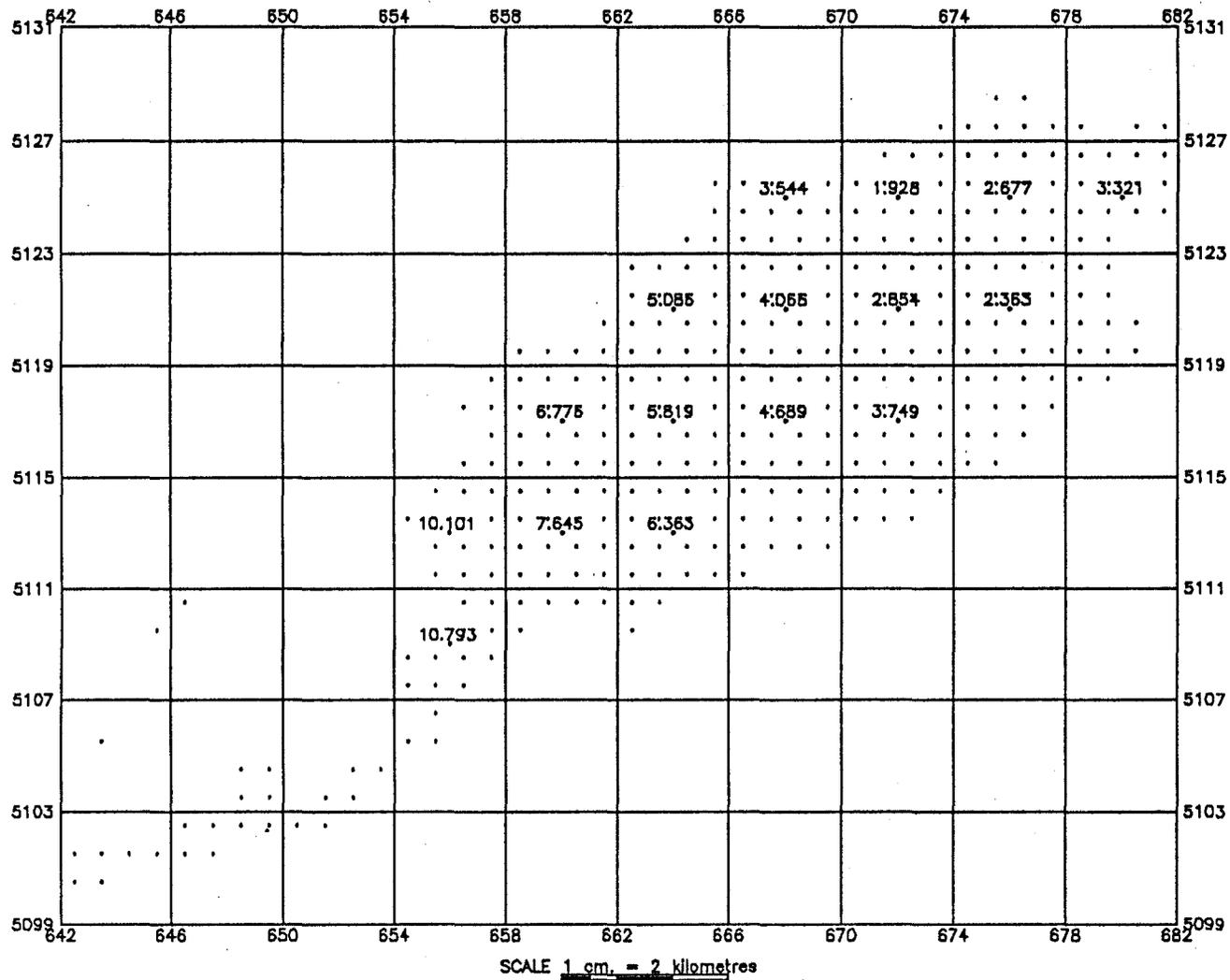


Figure 5: Carte des valeurs krigées de biomasse totale (en kg/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

On calcule donc pour chaque métal traité un semi-variogramme expérimental omnidirectionnel auquel on ajuste un modèle mathématique isotrope à structure unique (annexe 8.4).

Chaque unité de surface de 4x4 km² est ensuite estimée par une combinaison linéaire des données situées à l'intérieur d'un rayon de recherche de 6 km autour du centre de l'unité, avec un minimum de 2 données par unité.

Les résultats de krigeage pour les 9 métaux apparaissent au tableau 2. Les moyennes des valeurs krigées (m_e) sont le plus souvent supérieures à celles des données pour tous les métaux sauf le plomb (tableau 1); encore une fois, les moyennes krigées sont plus fiables car elles sont pondérées en fonction des structures de variabilité spatiale des quantités de métaux. D'autre part, les taux de variabilité (cv_e) sont réduits par rapport à ceux des données (cv). Les niveaux moyens d'incertitude locale quantifiés par les écarts-types d'estimation moyens relatifs correspondants ($\text{éte}_e/m_e$), sont élevés et varient entre 32% et 68% selon le métal. On doit noter qu'en plus de refléter la variabilité spatiale des concentrations, ces quantités de métaux krigées reflètent la variabilité de la biomasse de fond et son niveau d'incertitude élevé. Bien que ces résultats soient peu précis, ils sont satisfaisants en ce sens que les faibles niveaux de précision sont quantifiés et qu'ils peuvent être pris en compte dans l'interprétation des résultats et la planification de travaux ultérieurs.

7.3 Estimation des concentrations en métaux.

Les concentrations de métaux sont évaluées en faisant le quotient des quantités de métaux krigées par la biomasse krigée correspondante. Selon Journel et Huijbregts (1978, p.426), la variance d'estimation associée à un tel quotient peut être approximée comme suit pour chaque unité de 4x4 km²:

$$\frac{ve[\text{Mét}]}{[\text{Mét}]^2} \approx \frac{ve\text{QTE-Mét}}{\text{QTE-Mét}^2} + \frac{ve\text{BIO}}{\text{BIO}^2} - 2*\rho * \frac{\text{éteQTE-Mét}}{\text{QTE-Mét}*} * \frac{\text{éteBIO}}{\text{BIO}*}$$

où

- $ve[\text{Mét}]$ est la variance d'estimation de la concentration en métal;
- $ve\text{QTE-Mét}$ est la variance d'estimation de la quantité de métal;
- $ve\text{BIO}$ est la variance d'estimation de la biomasse;
- $[\text{Mét}]^*$ est la valeur estimée de la concentration en métal;
- QTE-Mét^* est la valeur krigée de la quantité de métal;

- BIO* est la valeur krigée de la biomasse;
- $\sigma_{\text{QTE-Mét}}$ est l'écart-type d'estimation de la quantité de métal;
- σ_{BIO} est l'écart-type d'estimation de la biomasse; et,
- rho est le coefficient de corrélation entre l'erreur d'estimation de la quantité de métal et celle de la biomasse.

Dans le cas présent, on utilise les valeurs de biomasse krigées à partir des données de télédétection. En effet, l'information additionnelle contenue dans ces données ainsi que l'indépendance des processus d'estimation des quantités de métaux et de la biomasse (qui ne partagent pas de données communes) rendent le processus d'estimation des concentrations plus fiable et plus conservateur en ce sens qu'il implique plus d'information et moins d'hypothèses. La formule approximée présentée ci-dessus devient alors une égalité qui ne fait plus intervenir le coefficient de corrélation "rho":

$$\frac{\text{ve}[\text{Mét}]}{[\text{Mét}]^2} = \frac{\text{veQTE-Mét}}{\text{QTE-Mét}^2} + \frac{\text{veBIO}}{\text{BIO}^2}$$

La variance d'estimation relative de la concentration est donc égale à la somme de la variance d'estimation relative de la quantité de métal et de la variance d'estimation relative de la biomasse (télédétection).

D'autre part, si on utilisait la biomasse estimée à partir des 25 données de fond, la variance d'estimation relative de la concentration serait approximée de plusieurs façons. En effet, pour les neuf métaux, on devrait recourir à la formule approximée où les valeurs krigées de biomasse seraient basées sur 25 données (au lieu de 244) et où les coefficients de corrélation entre les erreurs d'estimation seraient eux-mêmes approximés par les coefficients de corrélation entre les 17 données communes de quantité de métal et de biomasse de fond. Etant donné que ces coefficients de corrélation varient entre 0,68 et 0,95 pour les 9 métaux, les variances d'estimation relatives résultantes seraient inférieures à celles obtenues en utilisant la biomasse de télédétection. Toutefois, ces résultats "optimistes" ne seraient que des artifices des fortes corrélations établies à partir de seulement 17 données communes.

Les résultats d'estimation par quotient des concentrations en métaux sont présentées au tableau 2. Les moyennes des concentrations estimées (m_e) sont systématiquement plus élevées que les moyennes (m) des 18 données de concentrations disponibles (tableau 1) pour chaque métal. Cela s'explique par l'information additionnelle provenant de la biomasse de

téledétection (dont la moyenne est légèrement inférieure à celle des données de biomasse de fond) et incluse dans les quotients estimés. De plus, on observe que, pour chaque métal, le quotient de la moyenne krigée (m_e) de la quantité de métal par celle de la biomasse krigée ($m_e = 4,37 \text{ kg}/49 \text{ m}^2$) ne correspond pas à la moyenne de la concentration estimée; cela est simplement dû au fait que "le quotient de deux moyennes de n éléments n'est pas égal à la moyenne des n quotients".

Tel que mentionné plus-haut, les niveaux d'incertitude élevés s'expliquent par l'absence de corrélation entre les erreurs d'estimation de la biomasse (téledétection) et des quantités de métaux, ces deux krigeages étant basés sur des ensembles de données très différents (17 données et plus de 244 données dont aucunes ne sont communes) et indépendants. Les écarts-types d'estimation moyens relatifs ($\frac{\text{éte}_e}{m_e}$) des concentrations, qui varient de 37 à 67% pour les neuf métaux traités, reflètent principalement les niveaux d'incertitude associés aux estimations des quantités de métaux.

8. TRAITEMENT GEOSTATISTIQUE D'ESTIMATION GLOBALE.

On peut, en théorie, estimer globalement une variable et évaluer le niveau de précision associé en krigeant sur la surface totale de la zone d'intérêt à l'aide d'un système de krigeage global impliquant la totalité des données disponibles. Il est toutefois plus simple, en pratique, d'obtenir ces estimés globaux à partir des résultats d'estimation locale définis sur des unités de surface de taille réduite.

On calcule donc la quantité globale de biomasse du lac ainsi que les quantités globales de métaux associées à partir des résultats de krigeage obtenus pour des unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$ et présentés à la section 7. Les niveaux de précision correspondants sont ensuite évalués à l'aide des semi-variogrammes respectifs et de certaines hypothèses de simplification (Journel et Huijbregts, 1978, pp.410-416).

8.1 Estimation globale de la biomasse.

Dans un premier temps, on considère l'estimation de la moyenne globale de biomasse, exprimée en $\text{kg}/49 \text{ m}^2$, sur l'ensemble des 16 unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$ qui forment la zone d'estimation. Cette moyenne globale (m_g) est obtenue simplement en faisant la moyenne arithmétique des valeurs krigées pour chaque unité et correspond au paramètre m_e du tableau 2; elle est égale à $4,37 \text{ kg}/49 \text{ m}^2$.

Le calcul de la précision associée à cette moyenne est ensuite réalisé comme suit: étant donné les 244 données de

téledétection disponibles, on suppose qu'en moyenne, chacune des 16 unités formant la zone est estimée par 16 données régulièrement réparties à l'intérieur de l'unité, de sorte qu'aucune donnée commune n'est impliquée dans l'estimation de deux unités voisines; la variance d'estimation locale associée à un tel plan de krigeage est ensuite évaluée à partir du modèle ajusté au semi-variogramme de la biomasse; elle est de $0,18 \text{ (kg/49 m}^2\text{)}^2$; la variance d'estimation globale de la zone est ensuite obtenue en divisant cette variance d'estimation locale par 16, c'est-à-dire par le nombre d'unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$ dans la zone; on obtient alors une valeur de $0,01 \text{ (kg/49 m}^2\text{)}^2$, ce qui correspond à un écart-type d'estimation relatif ($\text{éte}_g/m_g$) de 2,4 %. Ces résultats d'estimation globale sont reportés au **tableau 3**.

Dans un second temps, on calcule la quantité totale de biomasse présente dans le lac en août 1990 à partir des résultats obtenus ci-dessus, en supposant que la surface de la zone d'estimation de 256 km^2 est connue sans erreur. On obtient un bilan massique de 22,810,122 kg en faisant le produit de la moyenne globale de biomasse ($4,37 \text{ kg/49 m}^2$) par la surface de la zone (256 km^2) par le facteur de conversion de kilomètres carrés en mètres carrés ($1000000 \text{ m}^2/\text{km}^2$). Puisque seule la biomasse est associée à un niveau d'incertitude, la précision relative associée au bilan massique du lac est la même que celle de la biomasse moyenne globale, soit 2,4 %. Ces résultats d'estimation sont reportés au **tableau 4**.

8.2 Estimation globale des quantités de métaux.

Tout comme pour la biomasse, on calcule les quantités globales de métaux et leur niveaux de précision associés à partir des résultats de krigeage local.

Tout d'abord, on établit les moyennes globales (m_g) des quantités de métaux, exprimées en mg/49 m^2 (ou g/49 m^2 , selon le métal), sur l'ensemble des 16 unités de la zone d'estimation. Ces valeurs sont obtenues pour les neuf métaux en faisant les moyennes des valeurs krigées des 16 unités et correspondent aux paramètres m_g présentés au **tableau 2**.

Le calcul des niveaux de précision associés à ces moyennes globales est ensuite réalisé comme suit pour chaque métal: étant donné les 17 quantités de métaux disponibles et irrégulièrement réparties dans la zone d'estimation, on suppose qu'en moyenne, chacune des 16 unités de la zone est estimée par 1 donnée située à un endroit quelconque à l'intérieur de l'unité; la variance d'estimation locale associée à un tel plan de krigeage est calculée à partir de la fonction du semi-variogramme modélisé et telle qu'aucune donnée commune n'est

Tableau 3: Résultats d'estimation globale de la biomasse et des quantités et concentrations de métaux associées à la partie verte des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, août 1990.

VARIABLE	UNITE	m_g	$\acute{e}t_{e_g}$	$\acute{e}t_{e_g}/m_g$
BIO/TEL	kg/49m ²	4,37	0,11	0,02

VARIABLE	UNITE	m_g	$\acute{e}t_{e_g}$	$\acute{e}t_{e_g}/m_g$
QTE-Cd	mg/49m ²	6,89	1,78	0,26
QTE-Cr	mg/49m ²	18,84	3,29	0,17
QTE-Cu	mg/49m ²	106,56	24,64	0,23
QTE-Ni	mg/49m ²	60,03	10,95	0,18
QTE-Pb	mg/49m ²	13,27	4,24	0,32
QTE-Zn	mg/49m ²	493,84	100,27	0,20
QTE-Mn	g/49m ²	14,04	5,98	0,43
QTE-Fe	g/49m ²	11,01	1,78	0,16
QTE-Ca	g/49m ²	125,04	20,92	0,17

VARIABLE	UNITE	m_g	$\acute{e}t_{e_g}$	$\acute{e}t_{e_g}/m_g$
[Cd]	mg/kg	1,58	0,41	0,26
[Cr]	mg/kg	4,32	0,73	0,17
[Cu]	mg/kg	24,41	5,61	0,23
[Ni]	mg/kg	13,75	2,48	0,18
[Pb]	mg/kg	3,04	0,97	0,32
[Zn]	mg/kg	113,11	22,62	0,20
[Mn]	g/kg	3,22	1,38	0,43
[Fe]	g/kg	2,52	0,40	0,16
[Ca]	g/kg	28,64	4,87	0,17

où:

m_g = la moyenne globale

$\acute{e}t_{e_g}$ = la variance d'estimation globale

$\acute{e}t_{e_g}/m_g$ = l'écart-type d'estimation globale relatif

Tableau 4: Résultats d'estimation de la quantité totale de biomasse et du contenu total de métaux associés à la partie verte des macrophytes submergés du lac Saint-Pierre, août 1990.

VARIABLE	UNITE	m_g	éte_g	$\text{éte}_g/m_g$
BIOMASSE	kg	22810122	547443	0,02
VARIABLE	UNITE	m_g	éte_g	$\text{éte}_g/m_g$
QTE-Cd	kg	36	9	0,26
QTE-Cr	kg	98	17	0,17
QTE-Cu	kg	557	128	0,23
QTE-Ni	kg	314	56	0,18
QTE-Pb	kg	69	22	0,32
QTE-Zn	kg	2580	516	0,20
QTE-Mn	kg	73362	31546	0,43
QTE-Fe	kg	57543	8056	0,16
QTE-Ca	kg	653255	111053	0,17

où:

m_g = la moyenne globale

éte_g = la variance d'estimation globale

$\text{éte}_g/m_g$ = l'écart-type d'estimation globale relatif

impliquée dans l'estimation de deux unités voisines; la variance d'estimation globale de la zone est ensuite évaluée en divisant cette variance d'estimation locale par 16, c'est-à-dire par le nombre d'unités de $4 \times 4 \text{ km}^2$ dans la zone; les résultats ainsi obtenus de même que les écarts-types d'estimation globale relatifs ($\text{éte}_g/m_g$) correspondants sont présentés au tableau 3.

On calcule ensuite les quantités globales de métaux présentes dans les macrophytes submergés en août 1990 à partir des résultats obtenus ci-dessus pour les neuf métaux traités, en supposant que la surface de la zone d'estimation de 256 km^2 est connue sans erreur. On obtient ces quantités globales (en kg) en faisant le produit des moyennes globales (en $\text{mg}/49 \text{ m}^2$ ou $\text{g}/49 \text{ m}^2$) par la surface de la zone (256 km^2) par le facteur de conversion de kilomètres carrés en mètres carrés ($1000000 \text{ m}^2/\text{km}^2$) et en divisant par le facteur de conversion de mg à kg ($1000000 \text{ mg}/\text{kg}$) ou de g à kg ($1000 \text{ g}/\text{kg}$), selon le métal considéré. Puisque seules les quantités de métaux sont associées à des niveaux d'incertitude, les précisions relatives associées aux quantités globales de métaux sont les mêmes que celles des moyennes globales du tableau 3. On présente ces résultats au tableau 4. Les cartes des valeurs krigées, pour le Cd, Cr, Ni, Zn, Mn, Fe et Ca, avec les quantités de ces métaux dans chaque sous-unité du lac de $4 \times 4 \text{ km}^2$ sont présentées aux figures 6 à 12.

8.3 Estimation globale des concentrations en métaux.

Tout comme pour l'estimation locale des concentrations, les moyennes globales (m_g) des concentrations (en mg/kg ou g/kg) sont obtenues en faisant le quotient des moyennes globales des quantités de métaux (en $\text{mg}/49 \text{ m}^2$ ou $\text{g}/49 \text{ m}^2$) par celle de la biomasse (en $\text{kg}/49 \text{ m}^2$). Tel que mentionné à la section 7.3, ces résultats, présentés au tableau 3, ne coïncident pas avec les valeurs des paramètres m_e du tableau 2; dans le cas présent, les résultats du tableau 3 sont retenus parce qu'ils sont consistants avec la procédure d'estimation globale. Egalement comme pour l'estimation locale, les variances d'estimation relatives associées à ces moyennes globales sont égales à la somme des variances d'estimation globale relatives de la biomasse et des quantités de métaux, ce qui produit les écarts-types d'estimation globale relatifs ($\text{éte}_g/m_g$) présentés au tableau 3. On remarque que dans ce cas, le niveau d'incertitude associé à la biomasse globale est négligeable par rapport à ceux des quantités de métaux de sorte que les écarts-types d'estimation globale relatifs des concentrations sont égaux à ceux des quantités de métaux correspondants.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

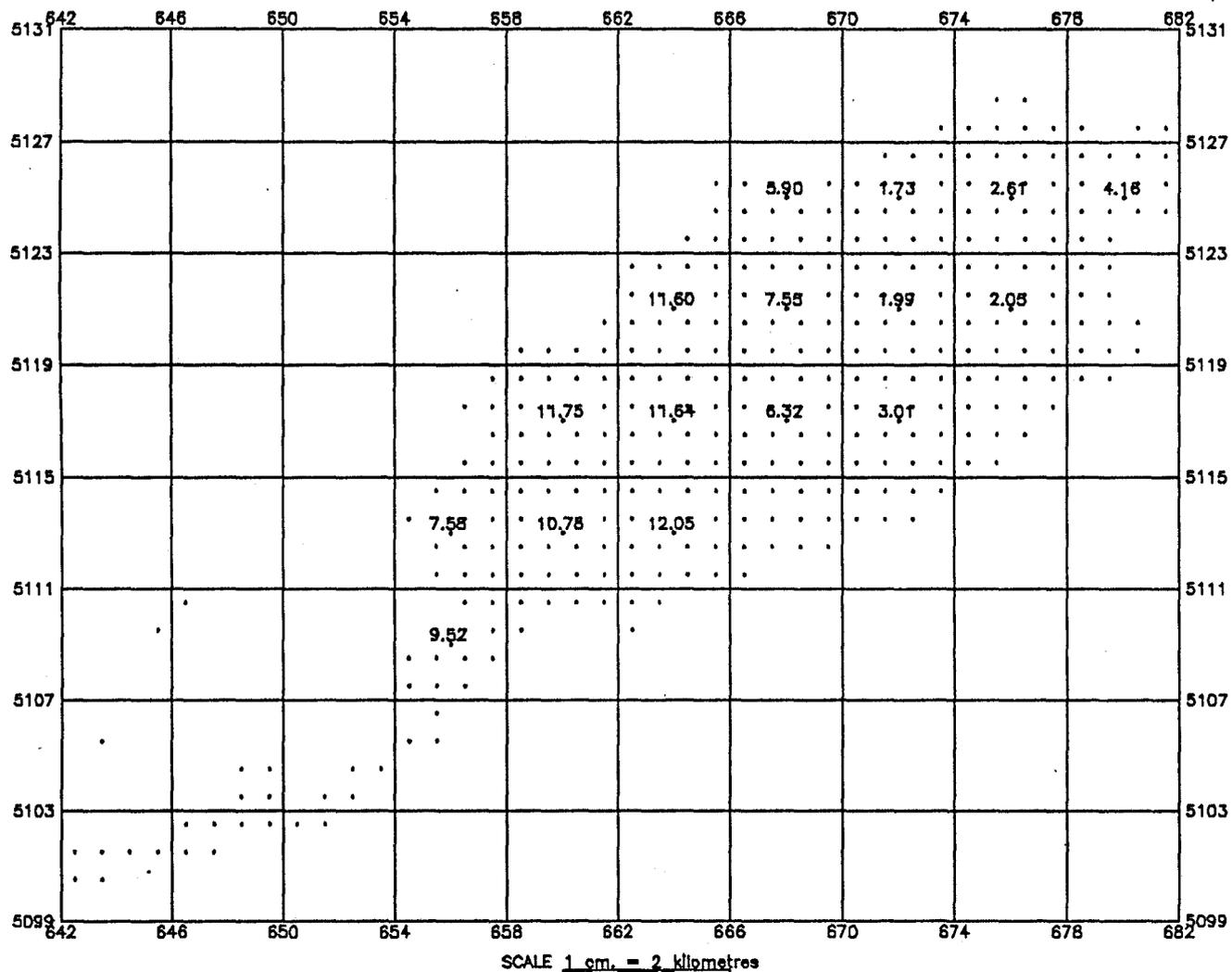


Figure 6: Carte des valeurs krigées des quantités de Cd (en mg/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

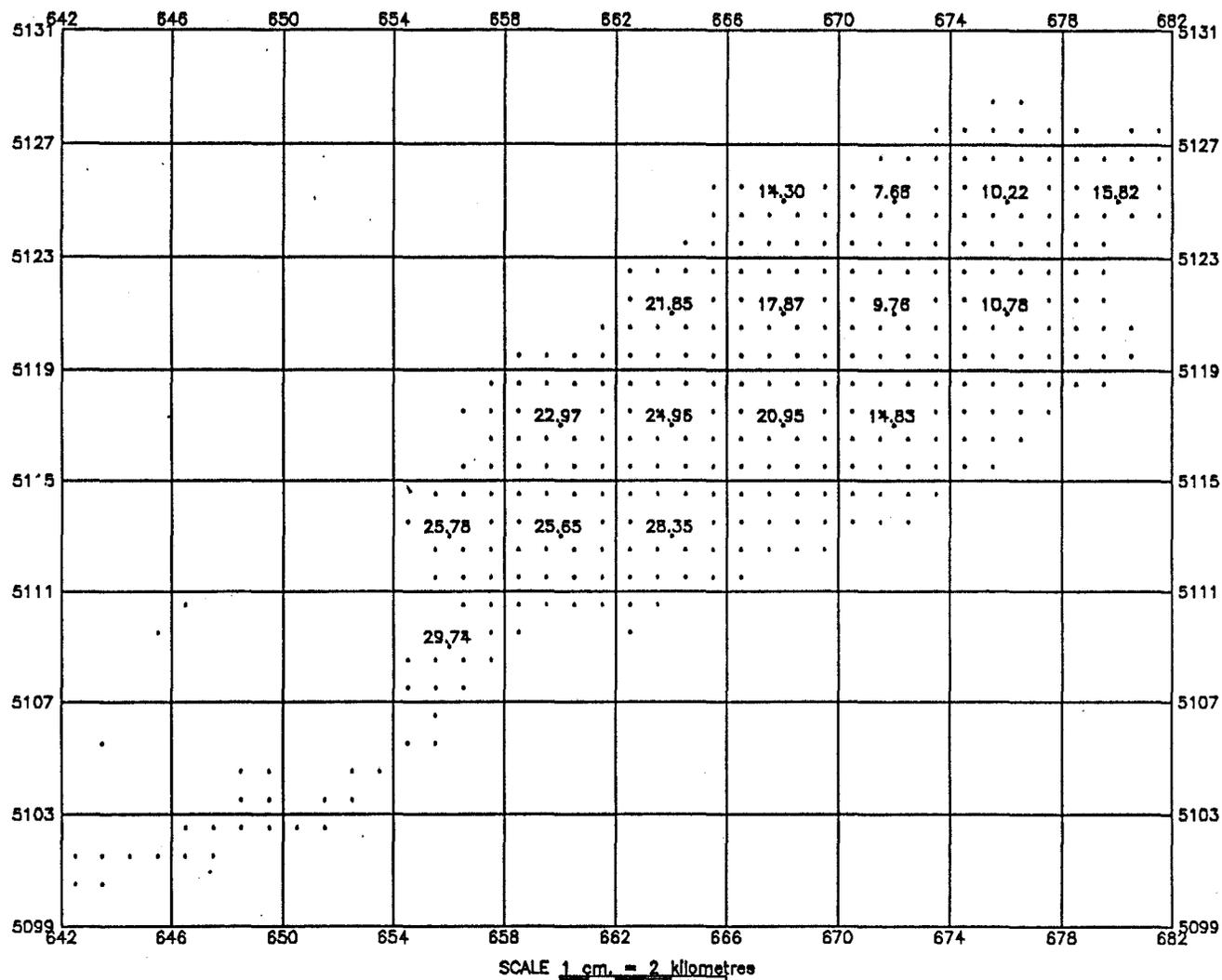


Figure 7: Carte des valeurs krigées des quantités de Cr (en mg/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GÉOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

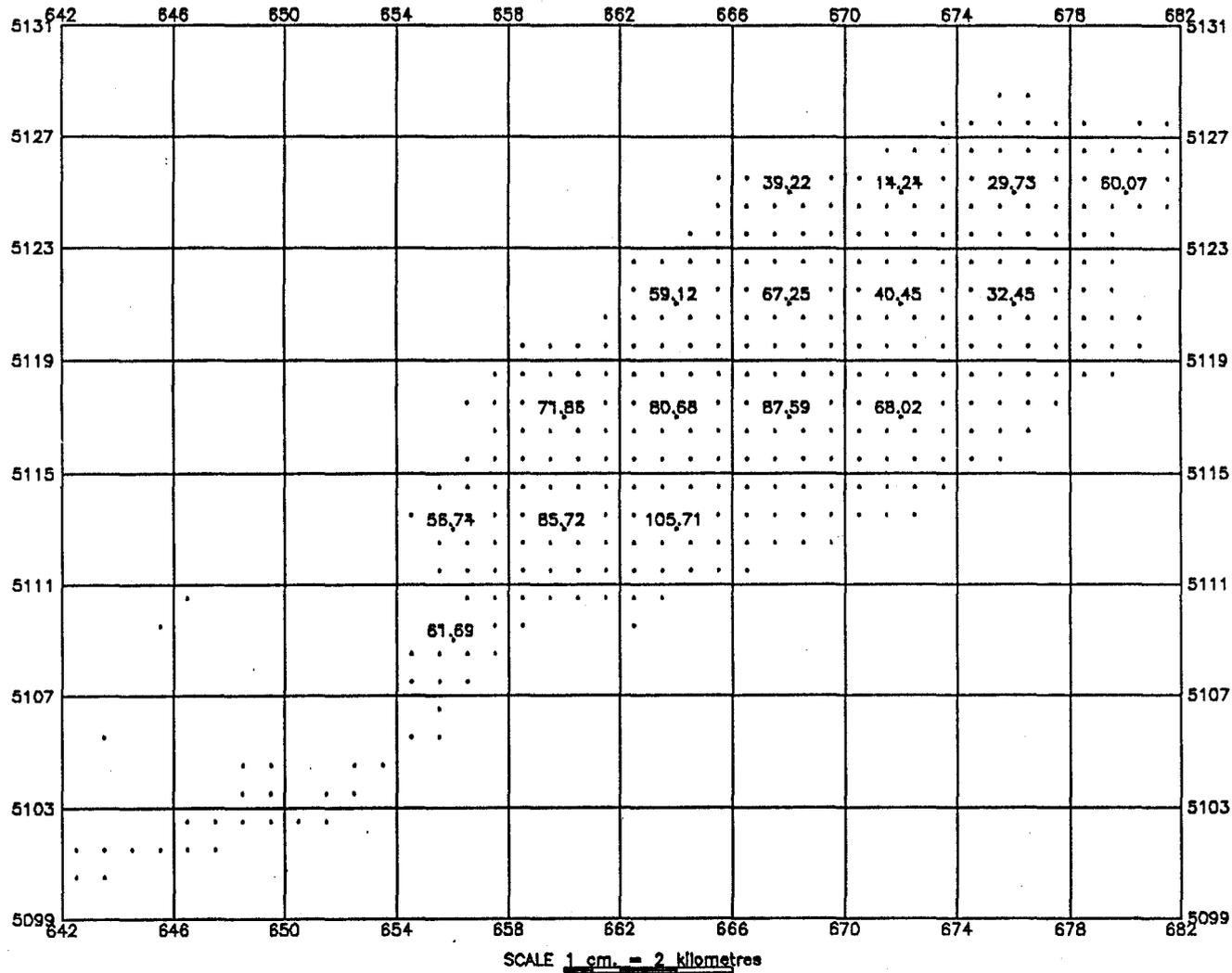


Figure 8: Carte des valeurs krigées des quantités de Ni (en mg/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

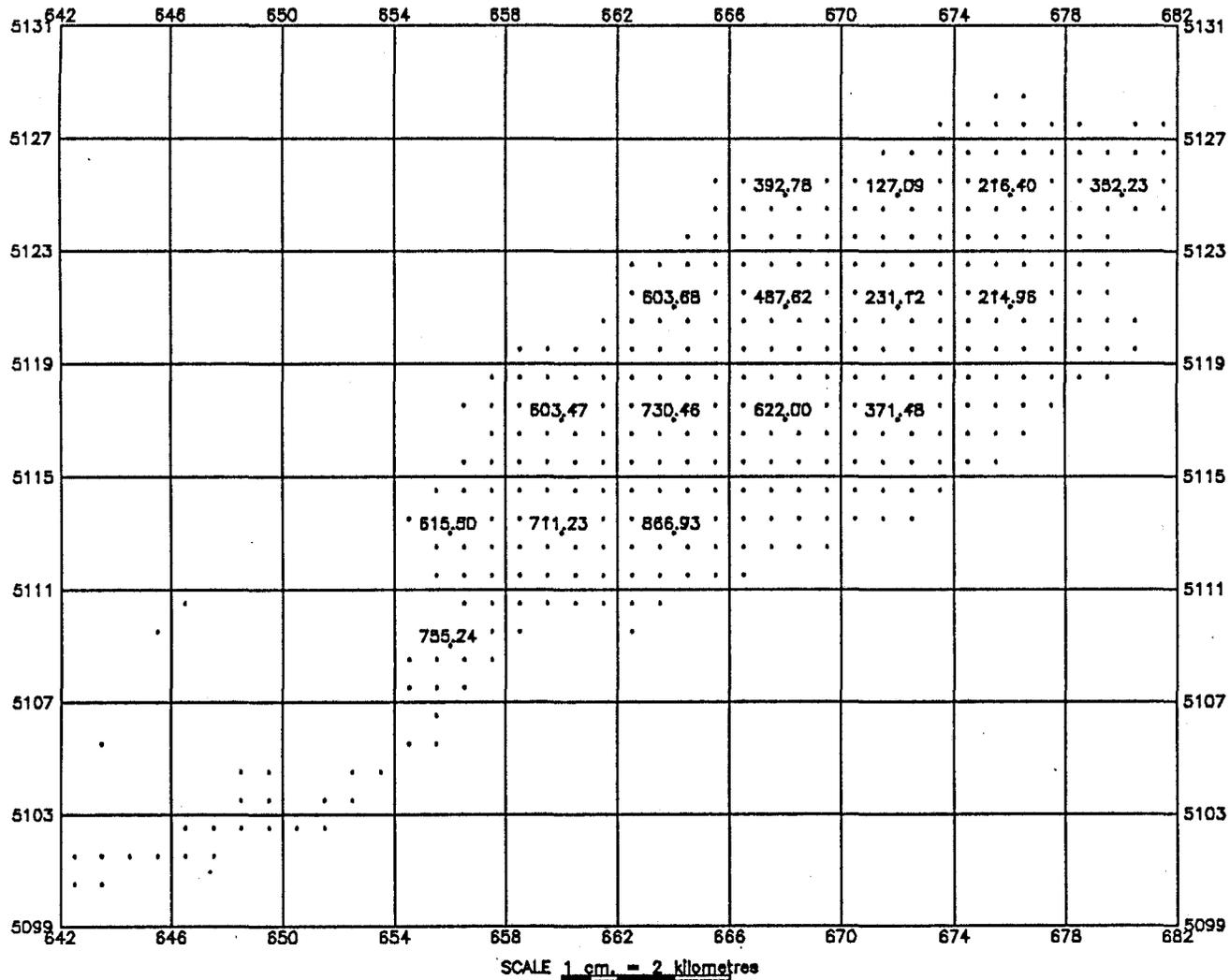


Figure 9: Carte des valeurs krigées des quantités de Zn (en mg/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

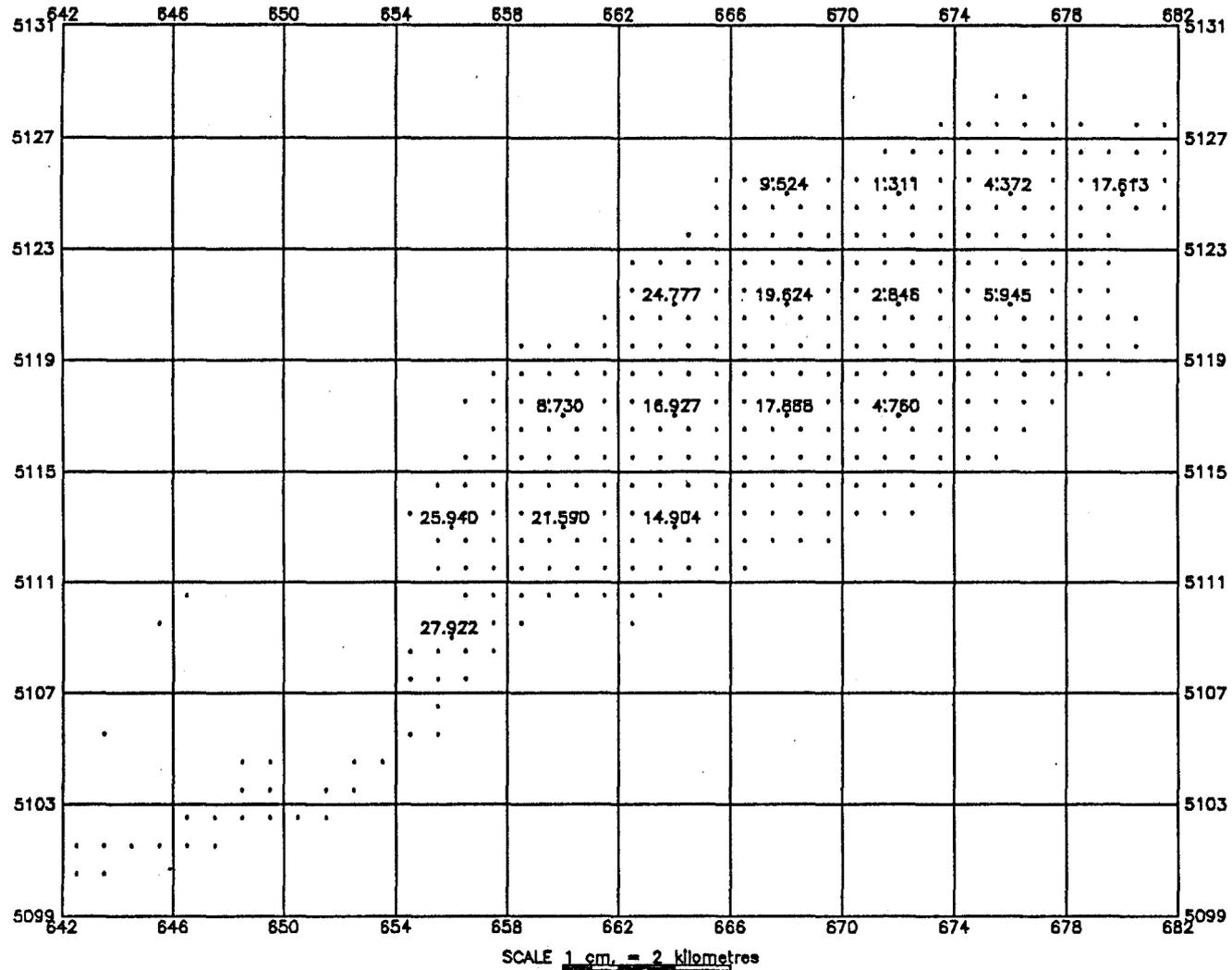


Figure 10: Carte des valeurs krigées des quantités de Mn (en g/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

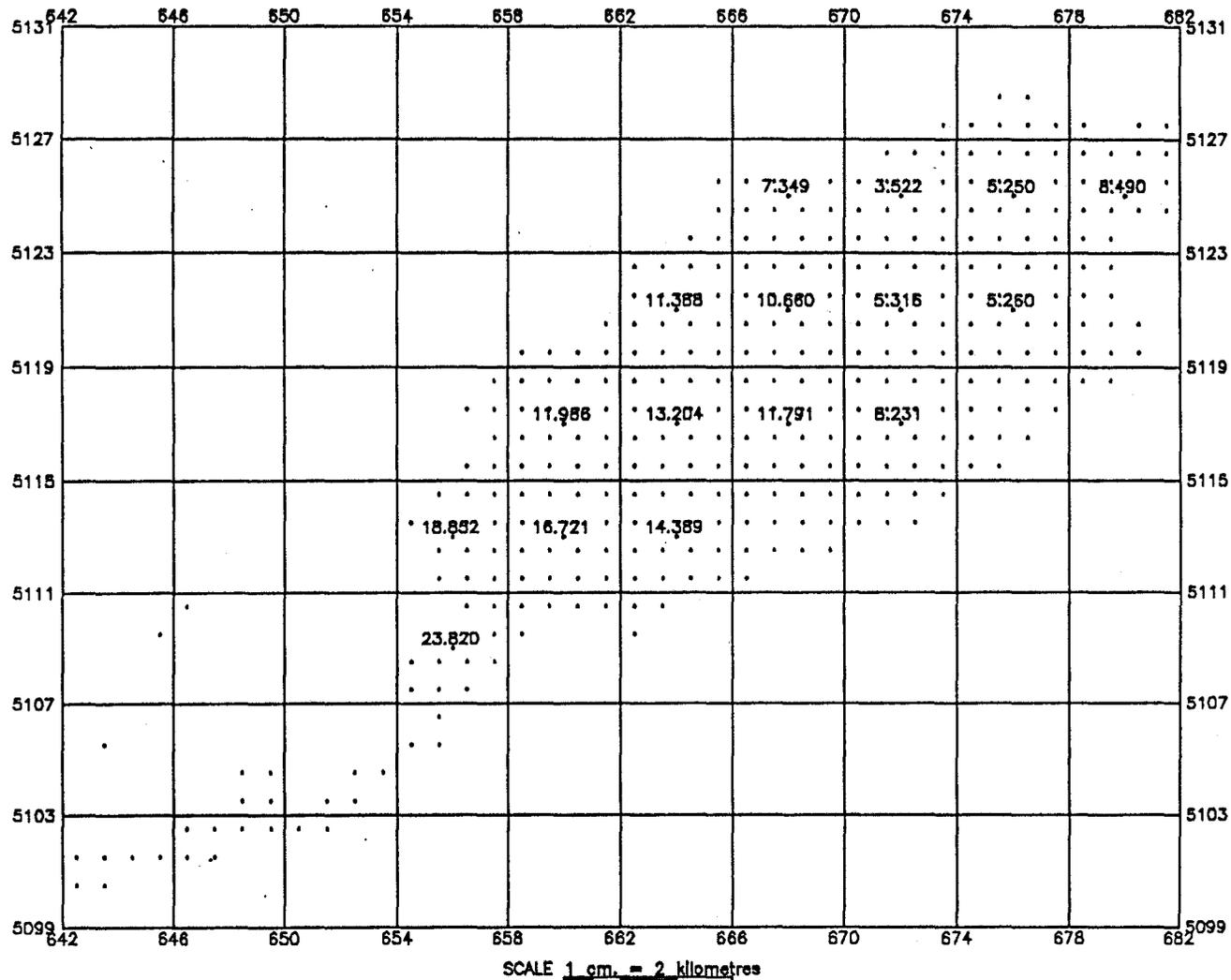


Figure 11: Carte des valeurs krigées des quantités de Fe (en g/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE

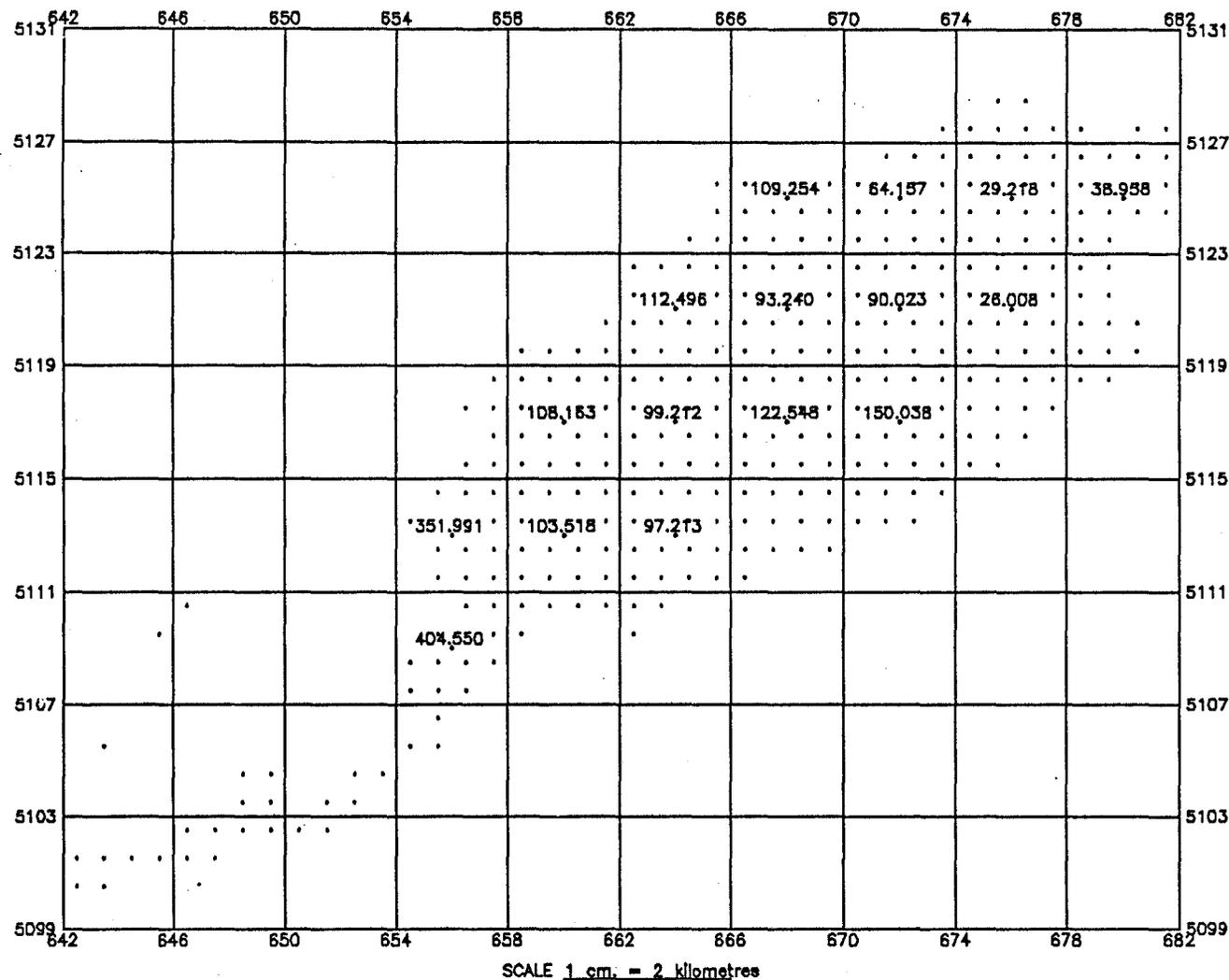


Figure 12: Carte des valeurs krigées des quantités de Ca (en g/49 m²) basées sur les données de fond pour les 16 unités de 4 X 4 km² formant la zone d'estimation - août 1990.

9.1 REALISATION DES OBJECTIFS.

Les objectifs de cette étude sont réalisés en ce sens que les résultats de l'analyse géostatistique reflètent la qualité et la quantité des données disponibles. Les valeurs estimées ne doivent donc pas être dissociées des niveaux d'incertitude associés.

D'une part, l'estimation locale de la biomasse à partir des nombreuses données de télédétection est précise avec un écart-type moyen relatif de 7%. D'autre part, les 25 données de biomasse de fond ne procurent pas une estimation locale fiable. L'utilisation de 17 d'entre elles dans le calcul et l'estimation des quantités de métaux entraînent des résultats moins précis avec des écarts-types moyens relatifs variant entre 32 et 68%. A cet égard, l'analyse structurale des quantités de métaux est faite de façon conservatrice afin de ne pas sous-estimer le niveau de variabilité spatiale de ces phénomènes et conséquemment de ne pas sous-estimer le niveau d'incertitude associé aux valeurs estimées. Enfin, les résultats d'estimation locale des concentrations obtenus par quotient sont également associés à des niveaux d'incertitude élevés (entre 32 et 68%) qui doivent être pris en compte lors de l'interprétation des résultats.

Les niveaux de précision d'estimation globale de toutes les variables traitées sont considérablement réduits. Tandis que l'écart-type global relatif de la biomasse est presque nul (2%), ceux des quantités de métaux et des concentrations correspondantes ne sont pas négligeables (entre 16 et 32%).

En principe, les semi-variogrammes calculés pour la présente étude pourraient également servir à améliorer le réseau d'échantillonnage d'une campagne ultérieure. Il est en effet probable que la répartition spatiale des plantes et des métaux accumulés suive un même patron d'une année à l'autre.

**ANNEXE 8.1: DESCRIPTION ET SELECTION DES ANALYSES DE BIOMASSE
ET DES QUANTITES DE METAUX DE LA PARTIE VERTE DES
MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE
ECHANTILLONNES EN AOUT 1990**

<u>Station 1:</u>	6 quadrats de ,1 m ²		
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:		
		g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Pot R:	1186	2,42
	- Val:	1338	2,73
	- Nit + Naj:	506	1,033
	Biomasse totale retenue:	3030	6,183
	Hypothèse: La biomasse de Naj et de Elo est négligeable.		
<u>Station 2:</u>	4 quadrats de ,5 m ²		
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:		
		g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val:	6380	13,02
	Biomasse totale retenue:	6380	13,02
<u>Station 3:</u>	5 quadrats de ,1 m ²		
	Biomasse des plantes cueillies:		
		g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val:	4518	9,22
	Biomasse totale retenue:	4518	9,22
	PAS D'ANALYSES DE METAUX		
	Quantités de métaux: -9,99		
<u>Station 4:</u>	PAS DE PLANTES OBSERVEES		
	Biomasse totale retenue: 0,0		
	Quantités de métaux: 0,0		
<u>Station 5:</u>	5 quadrats de ,25 m ²		
	Biomasse des plantes cueillies:		
		g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val:	800	1,632
	- Het:	29	0,06
	Biomasse totale retenue:	829	1,692
	PAS D'ANALYSES DE METAUX		
	Quantités de métaux: -9,99		

Station 6: PAS DE PLANTES OBSERVEES
 Biomasse totale retenue: 0,0
 Quantités de métaux: 0,0

Station 7: PAS DE PLANTES OBSERVEES
 Biomasse totale retenue: 0,0
 Quantités de métaux: 0,0

Station 9: 5 quadrats de ,1 m²
 Biomasse des plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Pot+Val+Het:	2570	5,2442
- Alg fil:	1843	3,7608
- Het:	240	,4902
- Val:	54	,1098
Biomasse totale retenue:	4706	9,605

PAS D'ANALYSES DE METAUX
 Quantités de métaux: -9,99

Station 10: 5 quadrats de ,1 m²
 Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Pot R:	-9,99	-9,99
- Val:	3048	6,22

Biomasse des autres plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Elo:	-9,99	-9,99
- Myr:	-9,99	-9,99
- Het:	294	,6
Biomasse totale retenue:	-9,99	-9,99

N.B.: On ne peut négliger la biomasse de toutes les plantes sauf celle de la Val. Conséquemment, les analyses de métaux de Val et de Pot R ne sont pas utilisées.

Station 11: 2 quadrats de ,1m²
 Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val: 7,43*120=892		1,8204
- Nit:10,81*370=4000		8,1632
Biomasse totale retenue:	4892	9,9837

Hypothèses: La biomasse moyenne de la Val provient de la station 15; les proportions observées sont prises en compte.

Station 13:5 quadrats de ,25 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	484	,9872
- Alg:	428	,8736
- Het:	76	,1545

Biomasse totale retenue: 988

2,0153

Station 14:5 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:4200+187=	4387	8,953
- Pot R:	5451	11,124

Biomasse totale retenue: 9838

20,08

Hypothèses:

- la biomasse de Cer est négligeable
- la Val concentrée dans les quadrats 1, 2 et 3 est répartie sur 75% du site: $11,35 \cdot 10 \cdot 37$ (75%)
- la Val localisée dans les quadrats 4 et 5 est répartie sur 25% du site: $1,56 \cdot 10 \cdot 12$ (25%)
- le Pot R concentré dans les quadrats 4 et 5 est réparti sur 25% du site: $45,422 \cdot 10 \cdot 12$ (25%)

Station 15:5 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:7,43*330=	2452	5,00
- Nit:10,81*160=	1730	3,53

Biomasse totale retenue: 4185

8,54

PAS D'ANALYSES DE METAUX

Quantités de métaux: -9,99

Hypothèses:

- la biomasse moyenne de Nit provient de station 11;
- les proportions observées sont prises en compte.

Station 16:5 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:11,88*470=	5586	11,4
- Nit: 10,81*20=	216	,441

Biomasse totale retenue: 5802

11,84

(station 16 - suite)

Hypothèses:

- la biomasse du Nit provient de la station 11
- les proportions observées sont prises en compte

N.B.: les concentrations en métaux de cette station sont des moyennes pondérées des concentrations des quadrats

Station 17:

1 quadrat de ,25 m² et 2 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	3614	7,376
- Pot R:	-9,99	-9,99

Biomasse totale retenue: -9,99 -9,99

PAS D'ANALYSES DE METAUX

Quantités de métaux: -9,99

Station 18:

5 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	3794	7,742

Biomasse totale retenue: 3794 7,742

PAS D'ANALYSES DE METAUX

Quantités de métaux: -9,99

Station 19:

5 quadrats de ,25 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	1785	3,642

Biomasse totale retenue: 1785 (3,642

Station 21:

4 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	391	,797
- Pot P:	4777	9,749
- Pot R:	81	,165
- Pot C:	7	,01425
- Het:	6	,012

Biomasse totale retenue: 5262 10,74

PAS D'ANALYSES DE METAUX

Quantités de métaux: -9,99

<u>Station 22:</u>	5 quadrats de ,25 m ²	
	Biomasse des plantes cueillies:	
		g/,1 m ²
	- Val:	19 ,03944
	- Pot R:	6587 13,4433
	- Naj:	24 ,04952
	- Cer:	24 ,0488
	- Myr:	2 ,00392
	- Elo:	1 ,00216
	- Alg fil:	63 ,12808
	Biomasse totale retenue: 6720	13,715
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 23:</u>	PAS DE PLANTES OBSERVEES	
	Biomasse totale retenue: 0,0	
	Quantités de métaux: 0,0	
<u>Station 24:</u>	aucun quadrat	
	Biomasse des plantes observées:	
		g/,1 m ²
	- Val:	-9,99 -9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 26:</u>	4 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
		g/,1 m ²
	- Val:6,835*280=1914	3,906
	- Pot P:9,75*210=2047	4,178
	Biomasse totale retenue: 3961	8,084
	Hypothèses:	
	- la biomasse du Pot P provient de la station 21	
	- la biomasse du Pot R est négligée (les métaux associés ne sont pas analysés)	
	- les proportions corrigées sont prises en compte:	
	- (moy de Val sur 2 quadrats)*10*28m (57%)	
	- (moy de Pot P de station 21)*10*21m (43%)	

<u>Station 27:</u>	4 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes cueillies:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 4208	8,5875
	- Pot R: -9,99	-9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 28:</u>	5 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Pot R: 8163	16,6584
	- Val: 6782	13,8414
	Biomasse totale retenue: 14945	30,4998
<u>Station 30:</u>	5 quadrats de ,25 m ²	
	Biomasse des plantes cueillies:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 504	1,029
	- Elo: -9,99	-9,99
	- Myr: -9,99	-9,99
	- Nit: -9,99	-9,99
	- Het: 39	0,08
	- Cer: -9,99	-9,99
	- Pot R: -9,99	-9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 31</u>	5 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Pot R+alg fil: 5590	11,4076
	- Val: 2883	5,8848
	- Alg fil: 741	1,5118
	Biomasse totale retenue: 9214	18,804
	Hypothèse: la biomasse (90 g = ,1%) du Cer est négligée	

<u>Station 32:</u>	5 quadrats de ,25 m ²	
	Biomasse des plantes cueillies:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 1956	3,9928
	- Pot R: -9,99	-9,99
	- Nit: -9,99	-9,99
	- Elo: -9,99	-9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 33:</u>	aucun quadrat	
	Biomasse des plantes observées:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: -9,99	-9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 36:</u>	5 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes cueillies:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 3091	6,308
	- Pot R: -9,99	-9,99
	- Nit: -9,99	-9,99
	- Myr: -9,99	-9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	
<u>Station 37:</u>	aucun quadrat	
	Biomasse des plantes observées:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: -9,99	-9,99
	Biomasse totale retenue: -9,99	-9,99
	PAS D'ANALYSES DE METAUX	
	Quantités de métaux: -9,99	

Station 40:4 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	6327	12,913
- Alg fil:	2221	4,5325

Biomasse totale retenue: 8548 17,4455

Hypothèse: la biomasse du Myr (430 gr), de l'Elo (25 gr) et du Pot R (135 gr) est négligée, ce qui représente 7% de biomasse totale retenue

Station 41:4 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes cueillies:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	8292	16,9233
- Pot R:	2217	(4,5255)

Biomasse totale retenue: 10509 21,449

PAS D'ANALYSES DE METAUX

Quantités de métaux: -9,99

Station 44:4 quadrats de ,1 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	1909	3,8968
- Pot R:	15787	32,2185
- Myr:	4685	9,5605

Biomasse totale retenue: 22381 45,676

Hypothèse: la biomasse du Nit est négligée, ce qui représente ,8% de la biomasse totale retenue

Station 45:5 quadrats de ,25 m²

Biomasse des plantes analysées pour métaux:

	g/49 m ²	g/,1 m ²
- Val:	118	,2416

Biomasse totale retenue: 118 ,2416

Hypothèse: la biomasse de l'Het (10 gr) est négligée, ce qui représente 8% de biomasse totale retenue

<u>Station 46:</u>	4 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Elo: 35964	73,395
	Biomasse totale retenue: 35964	73,395
<u>Station 47:</u>	4 quadrats de ,25 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 1026	2,0935
	- Het: 347	,7083
	Biomasse totale retenue: 1373	2,8018
<u>Station 48:</u>	4 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 3052	6,2295
	Biomasse totale retenue: 3052	6,2295
<u>Station 49:</u>	4 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 2549	5,203
	Biomasse des plantes non analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Het: 998	2,037
	- Alis: 263	,53775
	Biomasse totale retenue: 3810	7,778
	ANALYSES DE METAUX CORRESPONDANTES: -9,99	
	N.B.: la biomasse de l'Het et de l'Alis n'est pas négligeable car elle représente 33% de la biomasse totale retenue; puisque les analyses de métaux correspondant à la biomasse totale retenue ne sont pas disponibles, les analyses de métaux de la Val ne peuvent être utilisées.	
<u>Station 50:</u>	5 quadrats de ,1 m ²	
	Biomasse des plantes analysées pour métaux:	
	g/49 m ²	g/,1 m ²
	- Val: 8731	17,818
	Biomasse totale retenue: 8731	17,818

(station 50 - suite)

Hypothèse: la biomasse du Pot R et du Myr est négligée, de sorte que les analyses de métaux du Pot R ne peuvent être utilisées

N.B.: les concentrations des métaux associées à la Val de la station sont des moyennes pondérées des concentrations des quadrats.

**ANNEXE 8.2: LISTE DES DONNEES DE BIOMASSE ET DES QUANTITES ET
CONCENTRATIONS DE METAUX ASSOCIEES A LA PARTIE
VERTE DES MACROPHYTES SUBMERGES DU LAC SAINT-PIERRE
ECHANTILLONNES EN AOUT 1990**

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Cd mg/49 m ²	[Cd] mg/kg
1	676,892	5126,924	3,030	5,5578	1,83
2	679,536	5123,972	6,380	5,8056	0,91
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,99
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0,00
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,99
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0,00
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0,00
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,99
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	0,67
11	669,647	5122,159	4,892	5,1724	1,06
13	672,211	5119,732	,987	0,7943	0,80
14	665,948	5122,166	9,838	20,5474	2,09
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,99
16	669,950	5119,331	5,802	4,3614	0,75
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,99
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,99
19	661,502	5118,418	1,785	9,1014	5,10
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,99
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,99
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0,00
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,99
26	665,574	5113,647	3,961	4,0858	1,03
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,99
28	660,767	5116,654	14,945	30,2836	2,03
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,99
31	658,062	5116,489	9,214	4,4192	0,48
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,99
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,99
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,99
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,99
40	656,801	5110,260	8,548	10,7036	1,25
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,99
44	655,560	5107,549	22,381	15,5942	0,70
45	645,605	5109,753	,118	0,0876	0,74
46	646,131	5110,229	35,964	20,4992	0,57
47	654,360	5107,435	1,373	1,2872	0,94
48	643,653	5106,002	3,053	4,8843	1,6
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,99
50	642,458	5101,959	8,731	10,2151	1,17

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Cr mg/49 m ²	[Cr] mg/kg
1	676,892	5126,924	3,030	18,8180	6,21
2	679,536	5123,972	6,380	24,8812	3,90
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,99
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0,00
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,99
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0,00
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0,00
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,99
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	1,60
11	669,647	5122,159	4,892	21,7406	4,44
13	672,211	5119,732	,987	11,3514	11,50
14	665,948	5122,166	9,838	39,9224	4,06
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,99
16	669,950	5119,331	5,802	13,9825	2,41
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,99
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,99
19	661,502	5118,418	1,785	8,5660	4,80
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,99
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,99
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0,00
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,99
26	665,574	5113,647	3,961	20,8172	5,26
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,99
28	660,767	5116,654	14,945	57,5941	3,85
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,99
31	658,062	5116,489	9,214	19,5353	2,12
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,99
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,99
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,99
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,99
40	656,801	5110,260	8,548	28,1660	3,30
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,99
44	655,560	5107,549	22,381	48,3728	2,16
45	645,605	5109,753	,118	0,4617	3,90
46	646,131	5110,229	35,964	129,4688	3,60
47	654,360	5107,435	1,373	11,9039	8,67
48	643,653	5106,002	3,053	6,7159	2,20
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,99
50	642,458	5101,959	8,731	14,7551	1,69

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Cu mg/49 m ²	[Cu] mg/kg
1	676,892	5126,924	3,030	60,12453	19,8
2	679,536	5123,972	6,380	111,0082	17,4
3	674,419	5125,920	4,518	-9,92	-10,0
4	676,970	5124,721	0	0	0,0
5	679,099	5123,594	,829	-9,92	-10,0
6	668,405	5124,596	0	0	0,0
7	672,332	5123,421	0	0	0,0
9	678,099	5123,024	4,706	-9,95	-10,0
10	667,869	5124,709	-10	-9,99	9,1
11	669,647	5122,159	4,892	83,20656	17,0
13	672,211	5119,732	,987	29,05563	29,4
14	665,948	5122,166	9,838	182,9947	18,6
15	666,842	5121,690	4,185	-9,94	-10,0
16	669,950	5119,331	5,802	98,89921	17,0
17	669,119	5117,885	-10	-9,99	-10,0
18	663,773	5121,188	3,794	-9,92	-10,0
19	661,502	5118,418	1,785	69,59862	39,0
21	666,227	5113,886	5,263	-9,94	-10,0
22	660,380	5119,543	6,720	-9,95	-10,0
23	661,150	5118,578	0	0	0,0
24	662,515	5116,714	-10	-9,99	-10,0
26	665,574	5113,647	3,961	83,68924	21,1
27	659,616	5119,073	-10	-9,99	-10,0
28	660,767	5116,654	14,945	547,7324	36,7
30	664,690	5113,156	-10	-9,99	-10,0
31	658,062	5116,489	9,214	94,99615	10,3
32	657,616	5113,893	-10	-9,99	-10,0
33	658,191	5113,797	-10	-9,99	-10,0
36	656,176	5113,089	-10	-9,99	-10,0
37	657,876	5112,764	-10	-9,99	-10,0
40	656,801	5110,260	8,548	188,2365	22,0
41	656,278	5110,505	10,510	-9,99	-10,0
44	655,560	5107,549	22,381	193,8395	8,7
45	645,605	5109,753	,118	1,467966	12,4
46	646,131	5110,229	35,964	478,3155	13,3
47	654,360	5107,435	1,373	30,31218	22,1
48	643,653	5106,002	3,053	65,63303	21,5
49	647,039	5100,986	3,811	-9,98	-10,0
50	642,458	5101,959	8,731	109,8778	12,6

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Ni mg/49 m ²	[Ni] mg/kg
1	676,892	5126,924	3,030	31,7113	10,4668
2	679,536	5123,972	6,380	111,6462	17,
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9902	-9,9
4	676,970	5124,721	0	0,0000	
5	679,099	5123,594	,829	-9,9902	-9,9
6	668,405	5124,596	0	0,0000	
7	672,332	5123,421	0	0,0000	
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9905	-9,9
10	667,869	5124,709	-10	-9,9909	2,
11	669,647	5122,159	4,892	54,8766	11,2176
13	672,211	5119,732	,987	13,5453	13,7170
14	665,948	5122,166	9,838	93,3247	9,48641
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9904	-9,9
16	669,950	5119,331	5,802	135,6441	23,3786
17	669,119	5117,885	-10	-9,9909	-9,9
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9902	-9,9
19	661,502	5118,418	1,785	22,6642	12,
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9904	-9,9
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9905	-9,9
23	661,150	5118,578	0	0,0000	
24	662,515	5116,714	-10	-9,9909	-9,9
26	665,574	5113,647	3,961	93,3904	23,5765
27	659,616	5119,073	-10	-9,9909	-9,9
28	660,767	5116,654	14,945	189,7014	12,6935
30	664,690	5113,156	-10	-9,9909	-9,9
31	658,062	5116,489	9,214	45,5055	4,93846
32	657,616	5113,893	-10	-9,9909	-9,9
33	658,191	5113,797	-10	-9,9909	-9,9
36	656,176	5113,089	-10	-9,9909	-9,9
37	657,876	5112,764	-10	-9,9909	-9,9
40	656,801	5110,260	8,548	77,8115	9,10285
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9909	-9,9
44	655,560	5107,549	22,381	82,8865	3,70336
45	645,605	5109,753	,118	0,4496	3,
46	646,131	5110,229	35,964	284,1125	7,
47	654,360	5107,435	1,373	16,6138	12,1011
48	643,653	5106,002	3,053	29,0003	9,
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9908	-9,9
50	642,458	5101,959	8,731	41,5588	4,7

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Pb mg/49 m ²	[Pb] mg/kg
1	676,892	5126,924	3,030	32,6087	10,76
2	679,536	5123,972	6,380	18,5014	2,90
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,99
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0,00
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,99
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0,00
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0,00
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,99
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	2,10
11	669,647	5122,159	4,892	10,3163	2,11
13	672,211	5119,732	,987	8,2473	8,35
14	665,948	5122,166	9,838	44,4421	4,52
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,99
16	669,950	5119,331	5,802	9,4546	1,63
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,99
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,99
19	661,502	5118,418	1,785	6,0676	3,40
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,99
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,99
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0,00
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,99
26	665,574	5113,647	3,961	9,6897	2,45
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,99
28	660,767	5116,654	14,945	20,1063	1,35
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,99
31	658,062	5116,489	9,214	12,1895	1,32
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,99
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,99
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,99
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,99
40	656,801	5110,260	8,548	16,2535	1,90
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,99
44	655,560	5107,549	22,381	35,7414	1,60
45	645,605	5109,753	,118	0,7103	6,00
46	646,131	5110,229	35,964	151,0469	4,20
47	654,360	5107,435	1,373	11,4342	8,33
48	643,653	5106,002	3,053	12,5161	4,10
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,99
50	642,458	5101,959	8,731	22,6128	2,59

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Zn mg/49 m ²	[Zn] mg/kg
1	676,892	5126,924	3,030	316,9345	104,6102
2	679,536	5123,972	6,380	627,1343	98,3
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,99
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,99
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,99
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	76,2
11	669,647	5122,159	4,892	378,8113	77,43542
13	672,211	5119,732	,987	149,0347	150,9216
14	665,948	5122,166	9,838	1158,8254	117,7939
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,99
16	669,950	5119,331	5,802	607,1567	104,6444
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,99
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,99
19	661,502	5118,418	1,785	361,0205	202,3
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,99
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,99
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,99
26	665,574	5113,647	3,961	709,4691	179,1064
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,99
28	660,767	5116,654	14,945	1553,5853	103,9555
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,99
31	658,062	5116,489	9,214	368,2168	39,96080
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,99
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,99
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,99
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,99
40	656,801	5110,260	8,548	790,7522	92,50672
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,99
44	655,560	5107,549	22,381	1283,4760	57,34543
45	645,605	5109,753	,118	13,2353	111,8
46	646,131	5110,229	35,964	2348,4198	65,3
47	654,360	5107,435	1,373	153,0568	111,4857
48	643,653	5106,002	3,053	411,8092	134,9
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,99
50	642,458	5101,959	8,731	889,8801	101,924

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Mn g/49 m ²	[Mn] g/kg
1	676,892	5126,924	3,030	7,8418	2,588
2	679,536	5123,972	6,380	26,1763	4,103
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,990
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0,000
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,990
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0,000
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0,000
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,990
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	1,892
11	669,647	5122,159	4,892	5,3948	1,103
13	672,211	5119,732	,987	1,9694	1,994
14	665,948	5122,166	9,838	48,2691	4,907
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,990
16	669,950	5119,331	5,802	8,0075	1,380
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,990
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,990
19	661,502	5118,418	1,785	5,0682	2,840
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,990
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,990
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0,000
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,990
26	665,574	5113,647	3,961	18,4876	4,667
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,990
28	660,767	5116,654	14,945	10,6433	0,712
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,990
31	658,062	5116,489	9,214	12,8800	1,398
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,990
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,990
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,990
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,990
40	656,801	5110,260	8,548	43,9158	5,138
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,990
44	655,560	5107,549	22,381	23,0825	1,031
45	645,605	5109,753	,118	0,3767	3,182
46	646,131	5110,229	35,964	114,4360	3,182
47	654,360	5107,435	1,373	2,1049	1,533
48	643,653	5106,002	3,053	8,3980	2,751
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,990
50	642,458	5101,959	8,731	47,9584	5,493

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Fe g/49 m ²	[Fe] g/kg
1	676,892	5126,924	3,030	10,8248	3,573
2	679,536	5123,972	6,380	12,1408	1,903
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,990
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0,000
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,990
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0,000
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0,000
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,990
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	9,462
11	669,647	5122,159	4,892	9,1454	1,869
13	672,211	5119,732	,987	5,1118	5,176
14	665,948	5122,166	9,838	21,9493	2,231
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,990
16	669,950	5119,331	5,802	11,2326	1,936
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,990
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,990
19	661,502	5118,418	1,785	5,3216	2,982
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,990
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,990
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0,000
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,990
26	665,574	5113,647	3,961	11,4572	2,892
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,990
28	660,767	5116,654	14,945	26,8526	1,797
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,990
31	658,062	5116,489	9,214	11,2880	1,225
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,990
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,990
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,990
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,990
40	656,801	5110,260	8,548	24,1112	2,821
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,990
44	655,560	5107,549	22,381	36,5817	1,634
45	645,605	5109,753	,118	1,5322	12,943
46	646,131	5110,229	35,964	90,1606	2,507
47	654,360	5107,435	1,373	9,4307	6,869
48	643,653	5106,002	3,053	14,1493	4,635
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,990
50	642,458	5101,959	8,731	39,6117	4,537

STA	X km	Y km	BIOMASSE kg/49 m ²	QTE-Ca g/49 m ²	[Ca] g/kg
1	676,892	5126,924	3,030	44,4627	14,67
2	679,536	5123,972	6,380	72,4107	11,35
3	674,419	5125,920	4,518	-9,9900	-9,99
4	676,970	5124,721	0	0,0000	0,00
5	679,099	5123,594	,829	-9,9900	-9,99
6	668,405	5124,596	0	0,0000	0,00
7	672,332	5123,421	0	0,0000	0,00
9	678,099	5123,024	4,706	-9,9900	-9,99
10	667,869	5124,709	-10	-9,9900	21,79
11	669,647	5122,159	4,892	327,3151	66,90
13	672,211	5119,732	,987	13,1660	13,33
14	665,948	5122,166	9,838	109,3227	11,11
15	666,842	5121,690	4,185	-9,9900	-9,99
16	669,950	5119,331	5,802	109,6334	18,89
17	669,119	5117,885	-10	-9,9900	-9,99
18	663,773	5121,188	3,794	-9,9900	-9,99
19	661,502	5118,418	1,785	26,2690	14,72
21	666,227	5113,886	5,263	-9,9900	-9,99
22	660,380	5119,543	6,720	-9,9900	-9,99
23	661,150	5118,578	0	0,0000	0,00
24	662,515	5116,714	-10	-9,9900	-9,99
26	665,574	5113,647	3,961	53,3005	13,45
27	659,616	5119,073	-10	-9,9900	-9,99
28	660,767	5116,654	14,945	212,0679	14,19
30	664,690	5113,156	-10	-9,9900	-9,99
31	658,062	5116,489	9,214	194,3141	21,08
32	657,616	5113,893	-10	-9,9900	-9,99
33	658,191	5113,797	-10	-9,9900	-9,99
36	656,176	5113,089	-10	-9,9900	-9,99
37	657,876	5112,764	-10	-9,9900	-9,99
40	656,801	5110,260	8,548	135,1548	15,81
41	656,278	5110,505	10,510	-9,9900	-9,99
44	655,560	5107,549	22,381	1057,1096	47,23
45	645,605	5109,753	,118	2,8235	23,85
46	646,131	5110,229	35,964	645,9054	17,96
47	654,360	5107,435	1,373	21,3862	15,57
48	643,653	5106,002	3,053	38,0489	12,46
49	647,039	5100,986	3,811	-9,9900	-9,99
50	642,458	5101,959	8,731	146,7564	16,80

**ANNEXE 8.3: LISTE DES 403 DONNEES DE BIOMASSE ISSUES DE L'IMAGE
DE TELEDETECTION DU LAC SAINT-PIERRE PRISE LE 26
JUILLET 1990**

NO	X km	Y km	BIOMASSE kg/m ²	BIOMASSE kg/49 m ²	INDICATEUR DE LA ZONE
1	641,092	5097,522	0,000	0,0000	0
2	642,090	5097,556	0,000	0,0000	0
3	641,061	5098,522	0,000	0,0000	0
4	642,059	5098,556	0,000	0,0000	0
5	642,028	5099,556	0,000	0,0000	0
6	640,992	5100,521	0,000	0,0000	0
7	642,988	5100,579	0,000	0,0000	0
8	641,990	5100,556	0,000	0,0000	0
9	640,900	5103,510	0,000	0,0000	0
10	642,957	5101,578	0,000	0,0000	0
11	643,955	5101,613	0,000	0,0000	0
12	645,926	5102,671	0,000	0,0000	0
13	644,765	5107,635	0,000	0,0000	0
14	644,734	5108,635	0,000	0,0000	0
15	644,960	5101,647	0,000	0,0000	0
16	645,958	5101,671	0,000	0,0000	0
17	646,956	5101,706	0,000	0,0000	0
18	646,924	5102,706	0,000	0,0000	0
19	647,953	5101,741	0,000	0,0000	0
20	647,921	5102,741	0,000	0,0000	0
21	648,919	5102,765	0,000	0,0000	0
22	649,917	5102,800	0,000	0,0000	0
23	650,914	5102,836	0,000	0,0000	0
24	651,912	5102,860	0,000	0,0000	0
25	653,915	5102,921	0,265	0,0054	0
26	659,866	5104,118	0,000	0,0000	0
27	660,871	5104,144	0,000	0,0000	0
28	647,890	5103,740	0,000	0,0000	0
29	648,887	5103,765	0,000	0,0000	0
30	649,852	5104,800	0,000	0,0000	0
31	648,823	5105,764	0,000	0,0000	0
32	648,791	5106,764	0,000	0,0000	0
33	648,759	5107,764	0,000	0,0000	0
34	649,820	5105,799	0,000	0,0000	0
35	651,879	5103,860	0,000	0,0000	0
36	652,884	5103,896	0,000	0,0000	0
37	653,882	5103,921	0,000	0,0000	0
38	654,879	5103,957	0,617	0,0126	0
39	653,849	5104,921	0,000	0,0000	0
40	650,793	5106,824	0,000	0,0000	0
41	652,787	5106,884	0,000	0,0000	0
42	651,757	5107,859	0,000	0,0000	0

43	653,816	5105,920	0,000	0,0000	0
44	654,813	5105,957	0,255	0,0052	0
45	653,784	5106,920	1,872	0,0382	1
46	654,780	5106,956	3,322	0,0678	1
47	652,754	5107,884	4,787	0,0977	0
48	653,751	5107,920	6,880	0,1404	1
49	654,756	5107,945	5,660	0,1155	1
50	645,707	5109,658	0,000	0,0000	0
51	648,727	5108,763	0,000	0,0000	0
52	649,700	5109,788	0,696	0,0142	0
53	646,671	5110,693	0,000	0,0000	0
54	648,632	5111,752	0,000	0,0000	0
55	652,722	5108,884	9,913	0,2023	0
56	653,718	5108,920	11,432	0,2333	0
57	654,690	5109,945	5,625	0,1148	1
58	651,628	5111,847	1,098	0,0224	0
59	652,632	5111,883	1,578	0,0322	0
60	653,660	5110,919	8,595	0,1754	0
61	654,657	5110,944	5,468	0,1116	1
62	654,566	5113,944	1,181	0,0241	1
63	657,871	5104,055	0,475	0,0097	0
64	655,811	5105,982	0,799	0,0163	0
65	658,843	5105,081	0,000	0,0000	0
66	659,840	5105,118	0,000	0,0000	0
67	655,785	5106,982	1,700	0,0347	1
68	655,752	5107,981	3,312	0,0676	1
69	656,749	5108,018	0,573	0,0117	1
70	658,776	5107,080	0,029	0,0006	0
71	659,807	5106,107	0,000	0,0000	1
72	659,773	5107,106	0,000	0,0000	0
73	658,742	5108,080	0,255	0,0052	0
74	659,747	5108,106	0,000	0,0000	0
75	660,838	5105,144	0,000	0,0000	1
76	664,800	5106,272	0,000	0,0000	1
77	661,775	5107,170	0,000	0,0000	0
78	661,740	5108,170	0,000	0,0000	0
79	656,716	5109,007	3,464	0,0707	1
80	655,686	5109,981	3,989	0,0814	1
81	656,683	5110,006	6,194	0,1264	1
82	657,712	5109,043	0,578	0,0118	1
83	659,713	5109,106	1,083	0,0221	0
84	658,683	5110,069	0,813	0,0166	0
85	657,687	5110,043	1,691	0,0345	1
86	659,679	5110,106	1,994	0,0407	0
87	655,653	5110,981	5,816	0,1187	1
88	655,628	5111,981	7,992	0,1631	1
89	656,657	5111,006	6,096	0,1244	1
90	656,624	5112,006	5,008	0,1022	1
91	655,595	5112,969	6,909	0,1410	1
92	656,591	5113,006	7,811	0,1594	1

93	657,653	5111,043	3,161	0,0645	1
94	658,650	5111,069	1,279	0,0261	1
95	657,620	5112,043	2,636	0,0538	1
96	658,616	5112,068	1,646	0,0336	1
97	659,646	5111,106	1,078	0,0220	1
98	659,620	5112,105	1,656	0,0338	1
99	657,587	5113,031	2,965	0,0605	1
100	658,590	5113,068	1,671	0,0341	1
101	659,586	5113,105	2,881	0,0588	1
102	661,706	5109,169	7,492	0,1529	0
103	660,676	5110,132	3,043	0,0621	0
104	661,680	5110,169	7,845	0,1601	0
105	662,677	5110,196	9,516	0,1942	0
106	663,673	5110,233	6,292	0,1284	0
107	664,643	5111,260	8,903	0,1817	1
108	660,650	5111,132	3,454	0,0705	1
109	660,616	5112,131	2,685	0,0548	1
110	661,646	5111,169	6,135	0,1252	1
111	661,612	5112,169	2,029	0,0414	1
112	660,582	5113,131	2,171	0,0443	1
113	661,586	5113,158	3,474	0,0709	1
114	662,642	5111,195	6,693	0,1366	1
115	663,646	5111,233	7,571	0,1545	1
116	662,616	5112,195	1,989	0,0406	1
117	663,612	5112,233	2,073	0,0423	1
118	664,608	5112,260	5,032	0,1027	1
119	662,582	5113,195	1,308	0,0267	1
120	663,578	5113,222	0,809	0,0165	1
121	664,581	5113,260	1,205	0,0246	1
122	666,856	5104,337	0,000	0,0000	0
123	665,832	5105,299	0,000	0,0000	0
124	665,639	5111,298	9,423	0,1923	1
125	665,612	5112,287	8,408	0,1716	1
126	666,635	5111,325	7,428	0,1516	0
127	666,608	5112,325	10,515	0,2146	0
128	667,604	5112,352	9,114	0,1860	0
129	665,577	5113,286	1,931	0,0394	1
130	666,573	5113,324	4,312	0,0880	0
131	667,577	5113,352	9,148	0,1867	0
132	668,600	5112,390	7,816	0,1595	0
133	669,604	5112,418	6,409	0,1308	0
134	668,573	5113,379	11,050	0,2255	0
135	669,569	5113,418	10,996	0,2244	0
136	670,600	5112,446	4,136	0,0844	0
137	670,565	5113,445	8,933	0,1823	0
138	671,569	5113,473	4,072	0,0831	0
139	654,533	5114,944	0,000	0,0000	0
140	654,467	5116,932	0,000	0,0000	0
141	655,562	5113,969	3,553	0,0725	1
142	656,557	5114,006	10,555	0,2154	1

143	655,529	5114,969	1,485	0,0303	0
144	655,495	5115,969	0,240	0,0049	0
145	656,524	5115,005	3,435	0,0701	0
146	656,498	5116,005	1,627	0,0332	0
147	657,561	5114,031	7,889	0,1610	1
148	658,557	5114,068	1,465	0,0299	1
149	659,553	5114,094	2,377	0,0485	1
150	657,528	5115,031	2,969	0,0606	0
151	658,523	5115,068	2,573	0,0525	1
152	657,494	5116,031	2,381	0,0486	0
153	658,489	5116,068	2,607	0,0532	1
154	659,527	5115,094	1,676	0,0342	1
155	659,493	5116,094	2,450	0,0500	1
156	656,466	5116,994	0,078	0,0016	0
157	655,437	5117,968	0,000	0,0000	0
158	656,432	5117,994	0,000	0,0000	0
159	657,461	5117,031	4,670	0,0953	0
160	658,464	5117,068	8,908	0,1818	1
161	659,459	5117,093	3,675	0,0750	1
162	657,435	5118,031	2,185	0,0446	0
163	658,430	5118,056	10,746	0,2193	1
164	659,425	5118,093	9,937	0,2028	1
165	660,556	5114,131	2,396	0,0489	1
166	661,552	5114,157	1,720	0,0351	1
167	660,522	5115,131	1,480	0,0302	1
168	660,488	5116,131	1,602	0,0327	1
169	661,518	5115,157	1,588	0,0324	1
170	661,491	5116,157	1,181	0,0241	1
171	662,547	5114,195	1,499	0,0306	1
172	663,551	5114,222	1,406	0,0287	1
173	664,547	5114,259	1,774	0,0362	1
174	662,521	5115,195	0,877	0,0179	1
175	663,517	5115,221	1,303	0,0266	1
176	662,487	5116,195	3,141	0,0641	1
177	663,482	5116,221	2,548	0,0520	1
178	664,512	5115,259	1,250	0,0255	1
179	664,486	5116,248	2,509	0,0512	1
180	660,462	5117,120	2,862	0,0584	1
181	661,457	5117,157	2,499	0,0510	1
182	660,428	5118,119	2,666	0,0544	1
183	661,423	5118,157	3,357	0,0685	1
184	662,453	5117,183	1,161	0,0237	1
185	663,456	5117,221	4,871	0,0994	1
186	664,451	5117,248	4,155	0,0848	1
187	662,426	5118,183	3,822	0,0780	1
188	663,421	5118,221	2,421	0,0494	1
189	664,424	5118,248	1,847	0,0377	1
190	658,397	5119,056	3,229	0,0659	0
191	659,399	5119,093	8,791	0,1794	0
192	659,365	5120,093	3,185	0,0650	0

193	660,394	5119,119	7,041	0,1437	0
194	661,397	5119,157	2,720	0,0555	0
195	660,360	5120,119	2,715	0,0554	0
196	661,363	5120,156	8,502	0,1735	0
197	661,329	5121,145	3,268	0,0667	0
198	662,392	5119,183	2,945	0,0601	1
199	663,387	5119,220	4,836	0,0987	1
200	664,390	5119,247	5,748	0,1173	1
201	662,358	5120,183	5,620	0,1147	1
202	663,360	5120,220	2,749	0,0561	1
203	662,331	5121,183	10,070	0,2055	1
204	663,326	5121,209	6,806	0,1389	1
205	664,355	5120,247	4,841	0,0988	1
206	664,328	5121,247	4,724	0,0964	1
207	662,297	5122,182	3,709	0,0757	1
208	663,299	5122,209	10,604	0,2164	1
209	664,294	5122,247	11,015	0,2248	1
210	663,265	5123,209	2,401	0,0490	0
211	664,259	5123,247	6,561	0,1339	0
212	666,194	5125,300	2,891	0,0590	1
213	665,543	5114,286	1,720	0,0351	1
214	666,546	5114,324	1,392	0,0284	0
215	667,542	5114,352	3,469	0,0708	0
216	665,516	5115,286	1,622	0,0331	1
217	665,481	5116,286	1,931	0,0394	1
218	666,511	5115,313	2,053	0,0419	1
219	667,507	5115,351	1,563	0,0319	1
220	666,484	5116,313	1,284	0,0262	1
221	667,480	5116,351	1,960	0,0400	1
222	668,538	5114,379	7,600	0,1551	0
223	669,541	5114,418	11,001	0,2245	0
224	668,510	5115,379	2,925	0,0597	1
225	668,475	5116,379	2,445	0,0499	1
226	669,506	5115,417	7,277	0,1485	1
227	669,478	5116,406	1,887	0,0385	1
228	665,454	5117,286	2,323	0,0474	1
229	666,449	5117,313	2,837	0,0579	1
230	667,444	5117,351	2,313	0,0472	1
231	665,419	5118,286	0,799	0,0163	1
232	666,414	5118,312	0,666	0,0136	1
233	667,417	5118,340	2,161	0,0441	1
234	668,448	5117,378	1,700	0,0347	1
235	669,443	5117,406	2,230	0,0455	1
236	668,412	5118,378	3,758	0,0767	1
237	669,415	5118,406	2,617	0,0534	1
238	670,537	5114,445	11,020	0,2249	0
239	671,533	5114,473	6,982	0,1425	0
240	672,536	5114,512	2,945	0,0601	0
241	670,509	5115,445	10,956	0,2236	1
242	670,474	5116,445	4,616	0,0942	1

243	671,505	5115,473	10,854	0,2215	1
244	672,500	5115,512	6,586	0,1344	1
245	671,469	5116,473	10,070	0,2055	1
246	672,473	5116,501	11,025	0,2250	1
247	674,528	5114,569	0,524	0,0107	0
248	673,504	5115,540	2,842	0,0580	1
249	673,468	5116,540	8,095	0,1652	1
250	674,500	5115,569	2,097	0,0428	0
251	674,471	5116,569	7,610	0,1553	0
252	670,446	5117,445	1,857	0,0379	1
253	671,441	5117,473	4,778	0,0975	1
254	672,437	5117,501	10,545	0,2152	1
255	670,411	5118,434	2,416	0,0493	1
256	671,406	5118,472	2,764	0,0564	1
257	672,409	5118,501	5,532	0,1129	1
258	673,440	5117,540	11,050	0,2255	1
259	674,435	5117,568	10,736	0,2191	0
260	673,404	5118,529	10,408	0,2124	1
261	674,407	5118,568	10,981	0,2241	0
262	665,385	5119,274	8,080	0,1649	1
263	666,387	5119,312	3,063	0,0625	1
264	667,382	5119,340	1,083	0,0221	1
265	665,358	5120,274	9,202	0,1878	1
266	665,323	5121,274	3,543	0,0723	1
267	666,352	5120,312	10,780	0,2200	1
268	667,355	5120,340	8,159	0,1665	1
269	666,325	5121,312	6,566	0,1340	1
270	667,320	5121,339	10,530	0,2149	1
271	668,385	5119,378	2,401	0,0490	1
272	669,380	5119,406	2,538	0,0518	1
273	668,350	5120,378	2,818	0,0575	1
274	668,322	5121,367	10,119	0,2065	1
275	669,352	5120,406	0,862	0,0176	1
276	669,317	5121,405	3,783	0,0772	1
277	665,296	5122,274	8,996	0,1836	1
278	666,291	5122,301	5,660	0,1155	1
279	667,293	5122,339	4,322	0,0882	1
280	665,261	5123,274	8,771	0,1790	0
281	666,263	5123,301	11,050	0,2255	1
282	667,258	5123,339	9,041	0,1845	1
283	668,287	5122,367	8,002	0,1633	1
284	669,289	5122,405	10,760	0,2196	1
285	668,260	5123,367	6,022	0,1229	1
286	669,254	5123,394	5,091	0,1039	1
287	670,383	5119,433	2,298	0,0469	1
288	671,378	5119,472	2,519	0,0514	1
289	672,373	5119,500	3,014	0,0615	1
290	670,347	5120,433	0,627	0,0128	1
291	670,319	5121,433	0,603	0,0123	1
292	671,350	5120,472	1,828	0,0373	1

293	672,345	5120,500	1,813	0,0370	1
294	671,314	5121,461	0,181	0,0037	1
295	672,316	5121,500	1,446	0,0295	1
296	673,376	5119,529	5,562	0,1135	1
297	674,370	5119,568	10,741	0,2192	1
298	673,339	5120,528	2,930	0,0598	1
299	673,311	5121,528	1,308	0,0267	1
300	674,342	5120,557	8,933	0,1823	1
301	674,314	5121,557	5,748	0,1173	1
302	670,284	5122,433	6,287	0,1283	1
303	671,286	5122,461	1,328	0,0271	1
304	672,280	5122,500	0,221	0,0045	1
305	670,256	5123,433	8,374	0,1709	1
306	671,250	5123,461	7,918	0,1616	1
307	672,253	5123,489	2,622	0,0535	1
308	673,283	5122,528	1,387	0,0283	1
309	674,277	5122,557	1,891	0,0386	1
310	673,247	5123,528	0,578	0,0118	1
311	674,249	5123,557	0,750	0,0153	1
312	675,495	5115,597	0,025	0,0005	0
313	675,467	5116,597	2,935	0,0599	0
314	676,462	5116,626	0,123	0,0025	0
315	675,438	5117,597	5,630	0,1149	0
316	676,434	5117,626	3,219	0,0657	0
317	677,429	5117,665	0,201	0,0041	0
318	675,402	5118,597	6,566	0,1340	0
319	676,405	5118,626	4,057	0,0828	0
320	677,400	5118,654	3,151	0,0643	0
321	678,395	5118,694	0,206	0,0042	0
322	679,398	5118,724	0,000	0,0000	0
323	680,393	5118,753	0,000	0,0000	0
324	675,373	5119,597	9,109	0,1859	1
325	676,368	5119,625	5,037	0,1028	1
326	677,371	5119,654	6,184	0,1262	1
327	675,337	5120,596	11,015	0,2248	1
328	675,308	5121,596	10,819	0,2208	1
329	676,339	5120,625	9,766	0,1993	1
330	677,334	5120,654	10,707	0,2185	1
331	676,311	5121,625	10,981	0,2241	1
332	677,305	5121,654	11,025	0,2250	1
333	678,366	5119,694	3,327	0,0679	0
334	679,369	5119,724	0,049	0,0010	0
335	678,337	5120,683	6,635	0,1354	0
336	678,300	5121,683	7,301	0,1490	0
337	679,332	5120,723	0,907	0,0185	0
338	679,302	5121,723	1,127	0,0230	0
339	675,280	5122,585	2,994	0,0611	1
340	676,274	5122,625	4,180	0,0853	1
341	677,276	5122,654	8,859	0,1808	1
342	675,243	5123,585	1,401	0,0286	1

343	676,245	5123,625	1,985	0,0405	1
344	677,240	5123,654	1,245	0,0254	1
345	678,271	5122,683	6,532	0,1333	0
346	679,273	5122,712	1,392	0,0284	0
347	678,242	5123,683	3,454	0,0705	1
348	679,236	5123,712	4,611	0,0941	1
349	680,364	5119,753	0,000	0,0000	0
350	680,334	5120,753	0,000	0,0000	0
351	680,238	5123,741	0,578	0,0118	1
352	666,228	5124,301	6,885	0,1405	1
353	667,230	5124,339	10,785	0,2201	1
354	667,195	5125,328	1,676	0,0342	1
355	668,224	5124,366	9,535	0,1946	1
356	669,226	5124,394	8,800	0,1796	1
357	668,197	5125,366	1,019	0,0208	1
358	670,193	5125,433	4,792	0,0978	1
359	670,220	5124,433	7,992	0,1631	1
360	671,222	5124,461	6,610	0,1349	1
361	672,217	5124,489	7,487	0,1528	1
362	671,187	5125,460	8,791	0,1794	1
363	672,189	5125,489	9,535	0,1946	1
364	672,153	5126,488	6,174	0,1260	1
365	673,218	5124,528	5,895	0,1203	1
366	674,213	5124,556	2,156	0,0440	1
367	673,182	5125,528	6,012	0,1227	1
368	673,154	5126,517	9,398	0,1918	1
369	674,184	5125,556	6,159	0,1257	1
370	674,156	5126,556	8,864	0,1809	0
371	674,119	5127,556	7,620	0,1555	1
372	675,215	5124,585	1,637	0,0334	1
373	676,209	5124,614	0,965	0,0197	1
374	677,211	5124,654	0,216	0,0044	1
375	675,186	5125,585	5,699	0,1163	1
376	675,150	5126,585	6,066	0,1238	1
377	676,180	5125,614	3,802	0,0776	1
378	677,182	5125,654	2,773	0,0566	1
379	676,151	5126,614	3,606	0,0736	1
380	677,145	5126,642	4,150	0,0847	1
381	678,213	5124,683	0,206	0,0042	1
382	679,207	5124,712	0,916	0,0187	1
383	678,176	5125,683	1,446	0,0295	1
384	678,147	5126,683	4,121	0,0841	1
385	679,178	5125,712	0,799	0,0163	1
386	679,141	5126,712	3,479	0,0710	1
387	675,121	5127,585	10,937	0,2232	0
388	676,115	5127,613	8,678	0,1771	0
389	677,116	5127,642	5,640	0,1151	0
390	675,085	5128,584	4,150	0,0847	0
391	676,086	5128,613	6,003	0,1225	0
392	678,117	5127,682	3,533	0,0721	0

393	680,209	5124,741	2,509	0,0512	1
394	681,174	5125,771	1,847	0,0377	1
395	682,167	5125,811	1,965	0,0401	1
396	680,172	5125,741	0,818	0,0167	1
397	680,142	5126,741	2,724	0,0556	1
398	681,144	5126,771	1,519	0,0310	1
399	682,138	5126,800	0,951	0,0194	1
400	683,139	5126,841	0,662	0,0135	0
401	682,108	5127,800	1,446	0,0295	0
402	683,110	5127,830	1,201	0,0245	0
403	683,072	5128,830	0,583	0,0119	0

**ANNEXE 8.4: TABLEAU DES PARAMETRES DES MODELES
MATHEMATQUES AJUSTES AUX VALEURS
EXPERIMENTALES DES SEMI-VARIOGRAMMES
DES VARIABLES TRAITES**

VARIABLE	UNITE	N	C ₀	NS	TYPE1	ANIS1	ROT1	C1	A1	DIST
BIO/FOND	kg/49 m2	25	15	1	PUIS	ISO	0	0,7	1	12
BIO/TEL	kg/49 m2	244	0	2	SPHER	ISO	0	8	6	6
BIO/TEL (suite)					TYPE2	ANIS2	ROT2	C2	A2	DIST
					SPHER	ZON-Y	35	6	2	6
VARIABLE	UNITE	N	C ₀	NS	TYPE1	ANIS1	ROT1	C1	A1	DIST
QTE-Cd	mg/49 m2	17	40	1	PUIS	ISO	0	5	1	12
QTE-CR	mg/49 m2	17	150	1	PUIS	ISO	0	11	1	12
QTE-Cu	mg/49 m2	17	7000	1	PUIS	ISO	0	1300	1	12
QTE-Ni	mg/49 m2	17	1500	1	PUIS	ISO	0	200	1	12
QTE-Pb	mg/49 m2	17	100	1	SPHER	ISO	0	90	3	12
QTE-Zn	mg/49 m2	17	140000	1	PUIS	ISO	0	10000	1	12
QTE-Mn	g/49 m2	17	50	1	SPHER	ISO	0	250	6	12
QTE-Fe	g/49 m2	17	40	1	PUIS	ISO	0	5	1	12
QTE-Ca	g/49 m2	17	7000	0						12

ANNEXE 9

Calculs pour estimer les quantités de métaux traces associées aux sédiments mobiles du lac Saint-Pierre (voir tableau 9.1).

1. Moyennes des concentrations en métaux traces (mg/kg) dans la partie superficielle des sédiments de fond du lac Saint-Pierre (selon Hardy et al., 1991).

ex: [Cr] → 119,7 mg/kg

2. Moyennes des concentrations en métaux traces (mg/kg) associées au sable dans la partie superficielle des sédiments de fond du lac Saint-Pierre (selon R. Carignan, manuscrit en préparation).

Station SL-7	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1-2 cm	0,05	45,1	10,4	18,4	26,9	60,8
2-3 cm	0,05	36,7	7,3	15,7	24,0	50,2
3-4 cm	<u>0,00</u>	<u>37,4</u>	<u>8,4</u>	<u>17,5</u>	<u>20,5</u>	<u>53,9</u>
moyenne	0,03	39,7	8,7	17,2	23,8	55,0 (mg/kg)

3. Pourcentage moyen de sable + gravier dans la partie superficielle des sédiments de fond du lac Saint-Pierre (selon Hardy et al., 1991).

60,4%

4. Quantités de métaux traces (mg) associées au sable dans 1 kg de la partie superficielle des sédiments de fond du lac Saint-Pierre.

ex: [Cr] → 1 kg X $\frac{60,4}{100}$ X 39,7 $\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$ = 24 mg

5. Quantités de métaux traces (mg) associées à la partie limon + argile de la couche superficielle des sédiments de fond du lac Saint-Pierre.

ex: [Cr] → 119,7 mg - 24 mg = 95,7 mg pour 0,4 kg de sédiment (partie limon + argile)

6. Concentrations en métaux traces (mg) par kg de sédiments mobiles au lac Saint-Pierre.

$$\text{ex: [Cr]} \rightarrow [\text{Cr}] \text{ limon + argile} = \frac{95,7 \text{ mg}}{0,4 \text{ kg}} = 240 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

7. Calcul de la quantité (kg) de métaux traces associée aux sédiments mobiles dans le lac Saint-Pierre.

Quantité de sédiments mobiles: 27,1 kg/m²
(selon R. Carignan, manuscrit en préparation)

X superficie de la zone d'estimation: 256 km² ou 2,56 X 10⁸ m²

X concentration (mg/kg) en métaux traces dans la partie limon + argile de la couche superficielle des sédiments de fond.

$$\text{ex: [Cr]} \rightarrow 27,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times 2,56 \times 10^8 \text{ m}^2 = 6,9 \times 10^9 \text{ kg}$$

$$6,9 \times 10^9 \text{ kg} \times 240 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = 1,7 \times 10^{12} \text{ mg ou}$$

$$1,7 \times 10^6 \text{ kg}$$

Tableau 9.1: Résultats des calculs pour l'estimation des quantités de métaux traces associées aux sédiments mobiles du lac Saint-Pierre (se référer aux explications précédentes).

	[] _{moy} (mg/kg)	[] _{sable} (mg/kg)	Quantité associée au 0.6 kg de sable (mg)	Quantité associée au 0.4 kg de limon + argile (mg)	[] _{limon+ argile} (mg/kg)	Quantité associée aux sédiments superficiels (limon+argile) (kg)
Cd	<1,0	0,03	0,02	<0,98	<2,5	<1,7X10 ⁴
Cr	119,7	39,7	24,0	95,7	240	1,7X10 ⁶
Cu	47,5	8,7	5,3	42,2	106	7,3X10 ⁵
Ni	38,0	17,2	10,4	27,6	69	4,8X10 ⁵
Pb	33,5	23,8	14,4	19,1	48	3,3X10 ⁵
Zn	148,0	55,0	33,2	114,8	287	2,0X10 ⁶