

## LE BASSIN DE LA RIVIÈRE RICHELIEU : CONTAMINATION DE L'EAU PAR DES MÉTAUX ET CERTAINES SUBSTANCES ORGANIQUES TOXIQUES

David Berryman<sup>1</sup> et André Nadeau<sup>2</sup>

Adresses :

<sup>1</sup> Direction des écosystèmes aquatiques, ministère de l'Environnement et de la Faune, édifice Marie-Guyart, 7<sup>e</sup> étage, 675, boul. René-Lévesque Est, Québec (Québec), G1R 5V7.

<sup>2</sup> Société Duvetnor ltée, 200, rue Hayward, casier postal 305, Rivière-du-Loup (Québec), G5R 3Y9.

BERRYMAN, D. et A. NADEAU, 1998. « Le bassin de la rivière Richelieu : contamination de l'eau par des métaux et certaines substances organiques toxiques », dans *Le bassin versant de la rivière Richelieu : état de l'écosystème aquatique — 1995*, ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq n° EN980604, rapport n° EA-13, section 2.

<sup>1</sup> Auteur pour correspondance

### RÉSUMÉ

Deux types de traceurs -la cellule à dialyse remplie d'hexane et la mousse aquatique *Fontinalis dalecarlica*- ont été utilisés en 1995 pour examiner les apports potentiels de toxiques dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires. Ces traceurs ont été placés en amont et en aval des municipalités de Saint-Jean-sur-Richelieu, Iberville, Chambly et McMasterville ainsi qu'à l'embouchure de trois tributaires de la rivière Richelieu : les rivières des Hurons et l'Acadie de même que le ruisseau Beloeil. Relevées après une certaine période de temps, les mousses aquatiques ont été analysées pour déterminer les concentrations de métaux, BPC, dioxines et furannes chlorés. Quant aux cellules à dialyse, elles ont permis de mesurer les acides gras et résiniques ainsi que les composés organiques semi-volatils, dont les HAP.

Les résultats de l'analyse des BPC dans les mousses aquatiques démontrent que Saint-Jean-sur-Richelieu, McMasterville et le ruisseau Beloeil sont des sources de BPC pour le Richelieu, même si les concentrations

mesurées ne sont pas très élevées en comparaison de ce qui a été mesuré aux autres endroits du Québec où la technique des mousses aquatiques a été employée. À Iberville, il y a peut-être apport d'un type différent de BPC, mais les résultats demeurent incertains en raison du fait qu'on ne dispose que d'une mesure à cet endroit. On ne détecte pas d'apport de BPC à Chambly.

Les résultats de l'analyse des dioxines et furannes chlorés dans les mousses aquatiques démontrent que Chambly et Saint-Jean-sur-Richelieu sont des sources de ces substances pour le milieu aquatique. Chambly se caractérise par des valeurs élevées d'OCDD en comparaison de ce qui a été mesuré ailleurs au Québec. Cependant, cette dioxine étant relativement peu toxique, il en résulte une charge que l'on peu qualifier de moyenne en équivalents toxiques. À Saint-Jean-sur-Richelieu, la présence de la dioxine 1,2,3,4,6,7,8-H7CDD et surtout du furanne 2,3,7,8-T4CDF fait monter les unités toxiques à un niveau qui, sans être très élevé, se situe au-dessus de la médiane de l'ensemble des sites du Québec où la technique a été employée.

Saint-Jean-sur-Richelieu, Chambly et la rivière L'Acadie sont des sources de HAP pour la rivière Richelieu. La rivière des Hurons et le ruisseau Beloeil sont aussi des sources de ces substances, mais nettement moins importantes. Saint-Jean-sur-Richelieu, Iberville, McMasterville et les trois tributaires à l'étude sont également des sources de composés organiques semi-volatils autres que HAP et phtalates, dont les plus fréquemment détectés sont des dichlorobenzènes, le dibenzofuranne, le 4-méthylphénol et l'oxybenzone. Pour ces substances aussi Saint-Jean-sur-Richelieu est une source plus importante que les autres. McMasterville se singularise par la présence de toluènes et d'hexachlorobenzène, qui n'ont pas été décelés ailleurs. Les rivières des Hurons et l'Acadie sont notamment des sources de pesticides.

Ce constat mène à la conclusion que le Richelieu est dans une situation préoccupante en ce qui a trait aux substances toxiques. Cette préoccupation ne tient pas tant aux teneurs mesurées qu'au nombre de substances détectées, au nombre de sources de ces substances et à l'importance du Richelieu pour la survie du chevalier cuirvé, une espèce de poisson unique au monde et menacée d'extinction. De tous les endroits étudiés jusqu'à maintenant à l'aide des mousses aquatiques et des cellules à dialyse, Saint-Jean-sur-Richelieu ressort

comme l'un de ceux qui présente la plus longue liste de substances rejetées.

**Mots clés :** qualité de l'eau, suivi, surveillance, substances toxiques, traceurs de substances toxiques, mousses aquatiques, cellules à dialyse, métaux, mercure, BPC, HAP, acides gras et résiniques, composés organiques semi-volatils, Québec, rivière Richelieu.

## TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	2.2
Méthodes.....	2.3
Emplacement des stations de mesure.....	2.3
Echantillonnage et analyses chimiques.....	2.3
Traitement des données.....	2.7
Résultats.....	2.8
Métaux.....	2.8
Biphényles polychlorés (BPC).....	2.8
Dioxines et furannes chlorés.....	2.11
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	2.14
Phtalates.....	2.21
Autres composés organiques semi-volatils.....	2.25
Acides gras et résiniques.....	2.30
Synthèse générale et conclusion.....	2.33
Saint-Jean-sur-Richelieu et Iberville.....	2.33
Chambly.....	2.33
McMasterville.....	2.39
Rivière des Hurons.....	2.39
Rivière l'Acadie.....	2.39
Ruisseau Beloeil.....	2.40
Comparaison avec d'autres cours d'eau.....	2.40
Suites à donner.....	2.41
Remerciements.....	2.42
Références bibliographiques.....	2.42
Annexes	

## INTRODUCTION

Le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF) a pour mission « de s'assurer, dans une perspective de développement durable, de la protection de l'environnement ainsi que de la conservation et de la mise en valeur de la faune et de son habitat ». Il a le mandat d'élaborer et de mettre en oeuvre des politiques visant notamment « la

prévention, la réduction et l'élimination de la contamination de l'eau, de l'air et du sol » (MEF, 1997).

Des connaissances sur l'état de l'environnement sont nécessaires pour cibler efficacement les actions du Ministère et évaluer leurs effets. L'étude de la contamination des eaux de la rivière Richelieu par les substances toxiques s'inscrit dans cette optique. L'objectif de la présente étude est de dresser un portrait de la contamination des eaux du Richelieu par un certain nombre de substances toxiques et, plus particulièrement, de vérifier l'importance de certains sites comme sources de ces substances.

L'analyse des substances toxiques dans l'eau comporte toutefois une difficulté majeure : ces substances se retrouvent souvent à des concentrations inférieures aux limites de détection imposées par les méthodes usuelles d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire. Même à ces faibles concentrations, la charge polluante peut être suffisante pour porter atteinte aux organismes vivants et limiter les usages de l'eau. Une solution à ce problème est d'utiliser un « traceur », c'est-à-dire un dispositif capable de concentrer les substances toxiques jusqu'à des niveaux décelables et qui reflètent bien les apports de toxiques dans le milieu aquatique. Les sédiments et certains organismes vivants, comme les poissons et les mollusques, sont des traceurs d'usage courant. Dans cette étude, deux types de traceurs ont été utilisés : des mousses aquatiques pour le suivi des métaux, des BPC, des dioxines et des furannes chlorés; des cellules à dialyse pour la mesure des acides gras et résiniques et des composés organiques semi-volatils.

Les méthodes employées, tant sur le terrain qu'au laboratoire, permettent de mesurer de très faibles concentrations de substances toxiques. Sur la rivière Chaudière par exemple, les cellules à dialyse ont permis de détecter la présence de 17 toxiques organiques, alors que les échantillons d'eau pris aux mêmes endroits n'en ont détecté qu'un seul (Berryman et Nadeau, 1998). Autre exemple : les dioxines et furannes sont analysés dans les mousses aquatiques par une méthode en ultra traces, dont la limite de détection est de l'ordre du picogramme par gramme (pg/g), soit une partie par 1 000 000 000 ; et ce, après concentration dans les mousses aquatiques. Le simple fait de détecter quelques toxiques dans un des traceurs ne veut donc pas dire qu'il y a un problème environnemental. Il s'agit plutôt de porter attention aux sites où plusieurs toxiques sont détectés, ou à ceux qui présentent des concentrations élevées pour certaines substances.

## MÉTHODES

### Emplacement des stations de mesure

L'emplacement des stations de mesure a été établi en fonction des sources probables de toxiques dans le bassin versant du Richelieu. Les effluents liquides provenant des industries, les rejets domestiques, le ruissellement urbain, le lixiviat qui s'écoule des sites de déchets dangereux ou des sols contaminés, les apports diffus d'origine agricole (métaux et pesticides) et les retombées de polluants atmosphériques sont autant de sources potentielles susceptibles de contaminer les eaux de surface.

La méthode des traceurs se prête peu à la détermination des sources de polluants agricoles et atmosphériques, à cause du caractère diffus de ce type de rejets. Les entreprises susceptibles de rejeter des substances toxiques sont listées au tableau 1, et les sites contenant des déchets dangereux sont identifiés dans Piché et Simoneau (1998). Compte tenu de ces sources, les stations de mesure ont été placées en amont et en aval des rejets de quatre municipalités riveraines du Richelieu : Iberville, Saint-Jean-sur-Richelieu, Chambly et McMasterville. Des stations ont également été placées à l'embouchure de trois tributaires pour vérifier s'ils constituent des sources de toxiques pour le Richelieu. Ces tributaires sont les rivières des Hurons et l'Acadie ainsi que le ruisseau Beloeil (figure 1). Certaines municipalités drainées par ces tributaires, comme Napierville et Marieville, comprennent des industries susceptibles de rejeter des toxiques (tableau 1).

### Échantillonnage et analyses chimiques

Les mousses aquatiques sont couramment utilisées en France pour le suivi des métaux, remplaçant les mesures directes dans l'eau (Mouvet, 1991). Elles ont aussi été utilisées dans plusieurs autres pays d'Europe et d'Asie (Aulio, 1985; Burton, 1990; Goncalves et coll., 1992; Satake et Nishikawa, 1990; Say et coll., 1981; Soderlund et coll., 1988). Les cellules à dialyse ont été utilisées en Suède (Sodergren, 1987, 1990), en Finlande (Herve et coll., 1991), aux États-Unis (Huckins et coll., 1990; Petty et coll., 1995; Mackay et coll., 1996; Hofelt et Shea, 1996; Huckins et coll., 1996; Huff et coll., 1996; Lefkovitz et Crecelius, 1996; Whyte et coll., 1996; Crecelius et coll., 1996) et au Canada (Birkolz et coll., 1996; Parrot et coll., 1996a et 1996b). Au Québec, les mousses aquatiques et les cellules à dialyse ont été utilisées pour caractériser

l'état des rivières Saint-Maurice, L'Assomption, Saint-François, Châteauguay, Chaudière, Yamaska et Richelieu (Berryman, 1991, 1993, 1996a, 1996b; Berryman et Nadeau, 1998 ; cette étude et rapports à venir).

Les cellules à dialyse sont des tubes souples de cellulose Spectra-Por® numéro 6, de 18 mm de diamètre remplis de 20 ml d'hexane. Cette membrane de cellulose laisse passer les substances chimiques d'un poids moléculaire inférieur à 1 000.

Pour l'exposition en rivière, les cellules à dialyse sont placées dans des cages rectangulaires de 20 cm de côté par 30 cm de haut, en treillis métallique. Chaque cage contient quatre cellules à dialyse. Les cages sont attachées à des blocs de ciment et mouillées dans environ un demi-mètre d'eau en bordure du cours d'eau (figure 2).

Deux cages contenant des cellules à dialyse ont été déposées à chaque station de mesure du Richelieu, les 11 et 12 juillet 1995. Elles ont été relevées du 24 au 26 juillet 1995. Les cellules à dialyse ont été placées dans des bocaux remplis d'eau de la rivière fermés par un couvercle muni d'une pellicule de téflon. Au laboratoire, l'hexane des cellules a été prélevé à l'aide d'une pipette et transvidé dans des petites fioles de verre munies d'un septum au téflon. Ces fioles ont été conservées au réfrigérateur jusqu'au moment de leur analyse chimique.

Des échantillons de la mousse aquatique *Fontinalis dalecarlica* ont été récoltés dans la rivière Cachée, située dans la Réserve faunique des Laurentides, à 30 km au nord de Québec. Les rameaux portant du feuillage ont été placés dans des sachets faits de treillis de plastique dont la maille est de 1 cm sur 1 cm, conformément à une méthode mise au point et largement utilisée en Europe (Mouvet, 1986). Deux sachets de mousses aquatiques ont été fixés sur les côtés extérieurs de chacune des cages contenant les cellules à dialyse. Ils ont été mouillés en même temps que ces dernières, soit les 11 et 12 juillet 1995, puis relevés quatre semaines plus tard, soit les 15 et 16 août 1995. Ils ont d'abord été rincés vigoureusement dans l'eau de la rivière pour les débarrasser des sédiments et autres particules étrangères. Ils ont ensuite été séchés à l'air libre, le soir même, pendant trois à quatre heures, avant d'être placés dans des enveloppes de papier. Au laboratoire, les mousses aquatiques ont été réhydratées, puis rincées cinq fois dans deux litres d'eau déminéralisée pour enlever les sédiments qui y adhéraient

Tableau 1 Liste des entreprises susceptibles de rejeter des substances toxiques dans le bassin du Richelieu

Municipalité	Raison sociale	Secteur industriel
Lacolle	Fils métalliques Le Gardeur inc. division Placage Alto	Transformation métallique
Iberville	Équipement militaire Mil-Quip inc Mondor Textiles Novacolor inc Thomas & Betts Itée	Transformation métallique Textile Textile Transformation métallique
Saint-Jean-sur-Richelieu	Aéro-Novation inc. Boehme Filatex Canada inc. Buanderie J.M. Gaudette inc. Crane Canada inc. division Poterie du Québec Formisa Canada inc. Câbles Pirelli inc. Produits électriques Commender inc. Produits chimiques textiles (Canada) Termaco Itée Textiles Monterey inc. division teintures et finissage Textiles Novacolor inc. Valcourt et frère inc	Transformation métallique Chimie Textile Produits minéraux non métalliques Chimie Métallurgie Transformation métallique Chimie Transformation métallique Textile  Textile Transformation métallique
Richelieu	A. et D. Prévost inc	Transformation métallique
Chambly	Bennett Fleet inc division Chambly Rougier inc	Pâtes et papiers  Chimie
Marieville	Infasco, division d'Ifastgroupe inc. Sivaco Québec, division de Ivaco inc.	Métallurgie  Métallurgie
Napierville	Raffineries de Napierville inc.	Chimie
Saint-Bruno de Montarville	Équipement Boni inc.	Transformation métallique
McMasterville	ICI Canada inc. division Explosifs	Chimie
Saint-Mathieu de Beloeil	Ifastgroupe inc. division Galvano	Transformation métallique

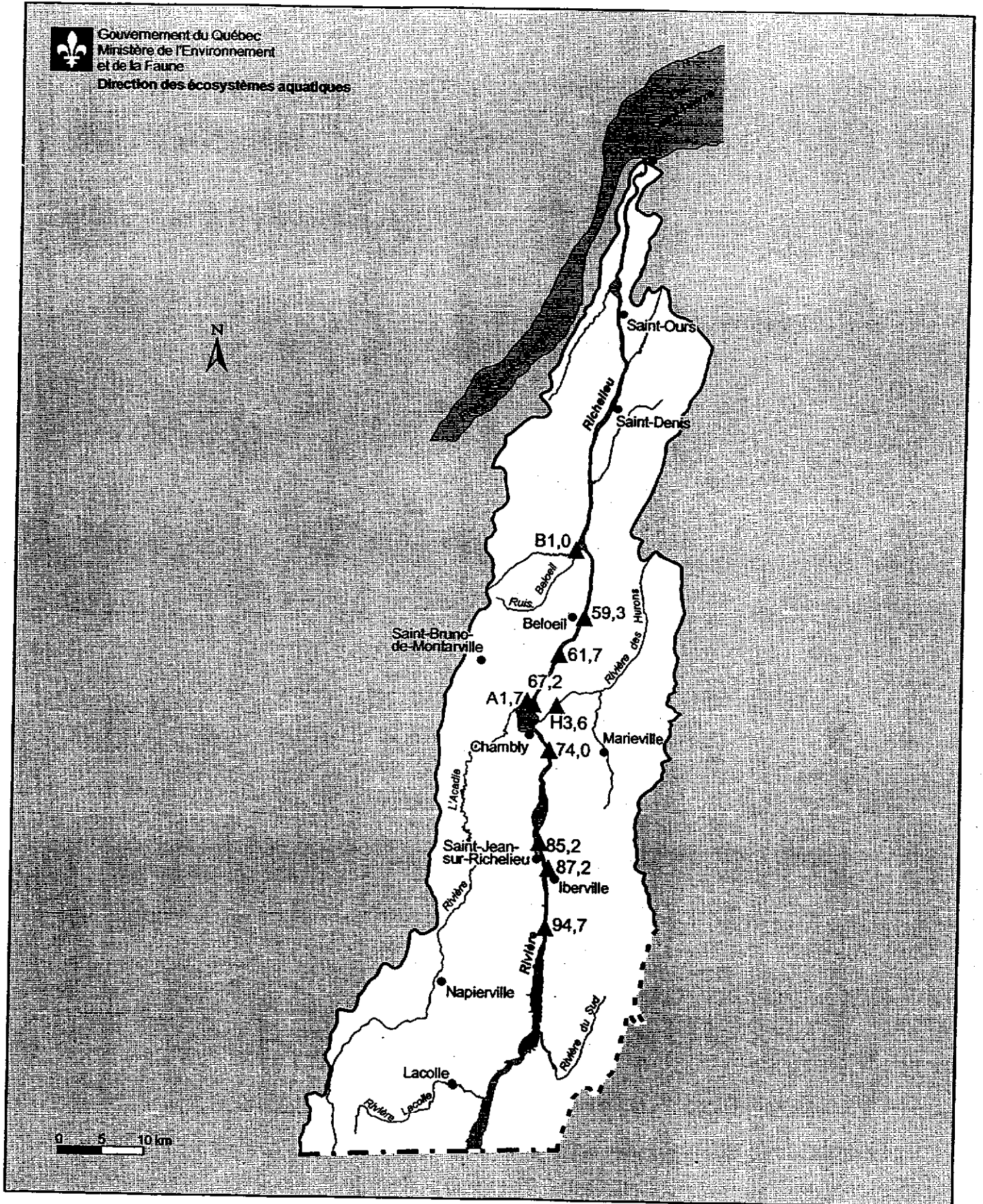


Figure 1 Emplacement des stations de mesure sur la rivière Richelieu et ses principaux tributaires

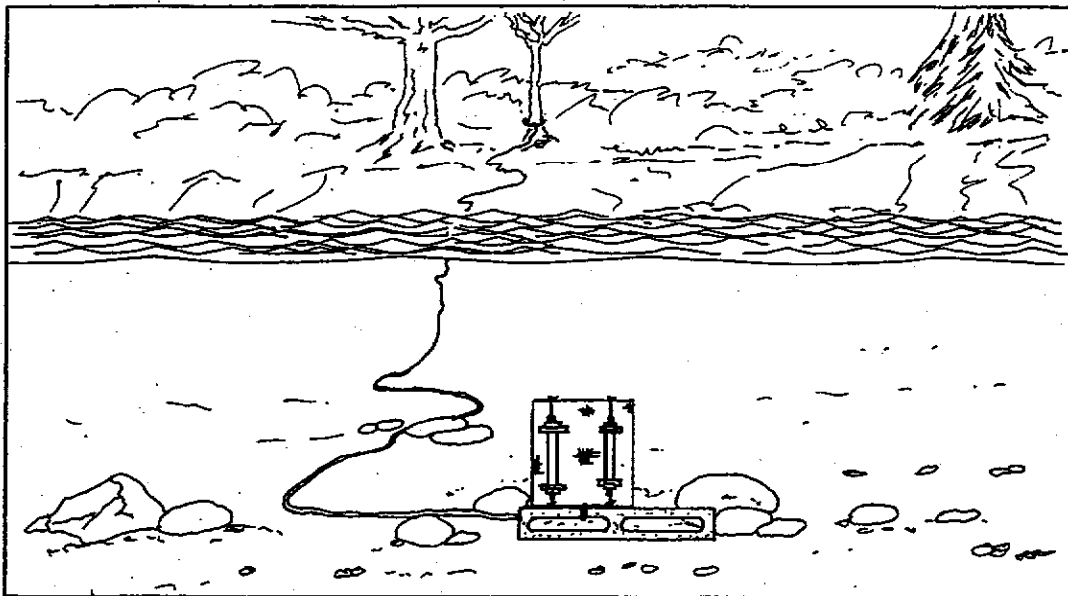
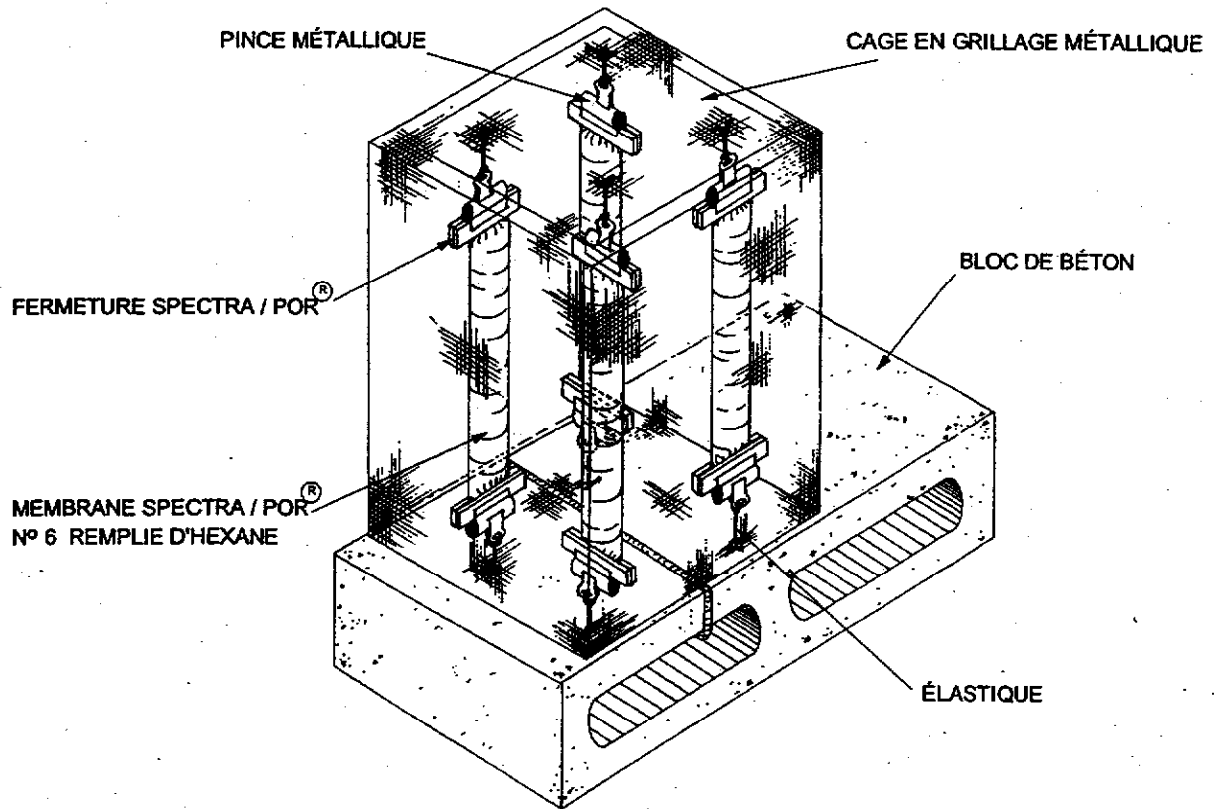


Figure 2 Schéma du dispositif employé pour l'exposition des cellules à dialyse en rivière

encore. Après avoir été séchées de nouveau, elles ont été conservées dans des enveloppes de papier jusqu'au moment de leur analyse chimique.

Les échantillons de mousses aquatiques ont tous été analysés pour leur contenu en métaux, ce qui donne quatre mesures par station, sauf en aval de Chambly où il n'y en a que deux à cause de la perte d'une cage. Étant donné le coût très élevé de leur analyse, les BPC, les dioxines et les furannes n'ont pas été analysés dans tous les échantillons. Les cellules à dialyse ont été analysées pour déterminer les concentrations de plusieurs composés organiques semi-volatils de même que d'acides gras et résiniques. Certaines cellules se sont brisées lors de leur exposition en rivière, ce qui fait que le nombre de cellules récupérées par station varie de trois à sept. Le tableau 2 présente le nombre d'échantillons analysés à chaque station, pour chacune des catégories de substances. Les annexes 1 et 2 donnent la liste complète des substances analysées. Toutes les analyses ont été effectuées aux laboratoires du ministère de l'Environnement et de la Faune. Les méthodes d'analyse sont décrites sommairement à l'annexe 3.

### Traitement des données

L'objectif du traitement des données est de vérifier, pour chacune des substances détectées, si les concentrations en aval des différents sites à l'étude sont significativement plus élevées qu'en amont. Le cas échéant, on considère que le site en question est une source de la substance considérée. Dans le cas des trois tributaires, on compare les concentrations mesurées à leur embouchure à celles en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu.

Il existe plusieurs méthodes permettant de comparer les concentrations mesurées aux différentes stations, mais aucune n'est parfaite. Le choix de la méthode dépend de l'erreur statistique que l'on veut contrôler. Deux tests ont été retenus : un test de t de comparaison deux à deux des moyennes ajustées en fonction du modèle hiérarchisé du plan d'échantillonnage et une analyse de la variance à deux critères de classification (la station et la cage), suivie du test de comparaisons multiples de Tukey - Kramer. La justification de ces choix et d'autres considérations concernant le traitement des données sont présentées à l'annexe 4.

Tableau 2 Nombre d'échantillons relevés et analysés à chacune des stations de mesure, pour chaque catégorie de substances

Numéro	Station Endroit	Mousses aquatiques			Cellules à dialyse	
		Métaux	BPC	Dioxines et furannes	C.O.S.V. <sup>1</sup>	Ac. gras et résiniques
94,7	Amont d'Iberville et Saint-Jean-sur-Richelieu	4	3	3	6	6
87,2	Aval d'Iberville	4	1	1	5	5
85,2	Aval de Saint-Jean-sur-Richelieu	4	2	2	7	7
74	Amont de Chambly	4	0	0	4	4
67,2	Aval de Chambly	2	2	2	3	3
61,7	Amont de McMasterville	4	0	0	5	5
59,3	Aval de McMasterville	4	3	3	6	6
H3,6	Embouchure de la rivière des Hurons	4	0	0	6	6
A1,7	Embouchure de la rivière l'Acadie	4	0	0	7	7
B1,0	Embouchure du ruisseau Beloeil	4	3	0	4	4
	Total	38	14	11	53	53

C.O.S.V.<sup>1</sup> composés organiques semi-volatils, c.-à-d. HAP, phtalates et autres

## RÉSULTATS

Les résultats d'analyse des mousses aquatiques et des cellules à dialyse sont présentés dans les sections qui suivent. Pour chaque substance, un graphique présente les teneurs mesurées aux différentes stations. Les hausses significatives de concentration y sont signalées par des astérisques. Les résultats détaillés des tests de comparaison deux à deux des moyennes, des analyses de la variance et des tests de Tukey-Kramer sont présentés respectivement aux annexes 5, 6 et 7. Dans la conclusion, la liste des substances détectées à chacun des sites est discutée en fonction des sources de toxiques qui s'y trouvent et des impacts potentiels sur la vie aquatique, tels que révélés par d'autres études réalisées en même temps que la présente.

### Métaux

L'analyse chimique des métaux dans les mousses aquatiques a donné des valeurs au-dessus des limites de détection pour tous les métaux sauf le cadmium, qui n'a pas été détecté, et le béryllium, qui n'a été détecté que sporadiquement. Les résultats pour les autres métaux sont synthétisés à la figure 3.

L'agglomération de Saint-Jean-sur-Richelieu et Iberville est une source de cuivre dans le Richelieu. En aval de ces deux municipalités, les concentrations sont respectivement 58 % et 85 % plus élevées qu'en amont. À Saint-Jean-sur-Richelieu, il y a également apport de plomb, en hausse de 50 %. Les concentrations atteintes, de l'ordre de 40 mg/kg pour le cuivre et de 30 mg/kg pour le plomb, sont parmi les valeurs élevées du bassin (figure 3). Elles sont relativement grandes en comparaison de ce qui a été mesuré sur l'ensemble des cours d'eau où la technique des mousses aquatiques a été employée (figure 4).

À Chambly, il y a hausse des concentrations d'aluminium (48%), de chrome (88%), de magnésium (36%) et de zinc (115%). Ces résultats doivent cependant être interprétés avec prudence, car ils ne sont basés que sur deux valeurs en aval, les sachets de mousse d'une des cages ayant été perdus. D'ailleurs, la différence significative en chrome ne tient qu'à une valeur élevée (12 mg/kg), qui est probablement un artefact. En magnésium, la hausse observée est peut-être d'origine naturelle, car les tributaires de ce secteur semblent avoir des valeurs élevées, comme en font foi les résultats dans les rivières des Hurons et l'Acadie (figure 3). Ces valeurs

sont élevées en comparaison de ce qui a été mesuré ailleurs au Québec (figure 4).

McMasterville ne présente pas de hausse marquée des concentrations; les valeurs en amont et en aval sont sensiblement les mêmes. Dans les trois tributaires, on observe des valeurs élevées de vanadium. De plus, le baryum est élevé dans la rivière des Hurons, le cuivre dans la rivière l'Acadie et le ruisseau Beloeil, et le magnésium dans les rivières des Hurons et l'Acadie. Les concentrations atteintes sont relativement élevées en comparaison de ce qui a été mesuré ailleurs au Québec (figure 4).

### Biphényles polychlorés (BPC)

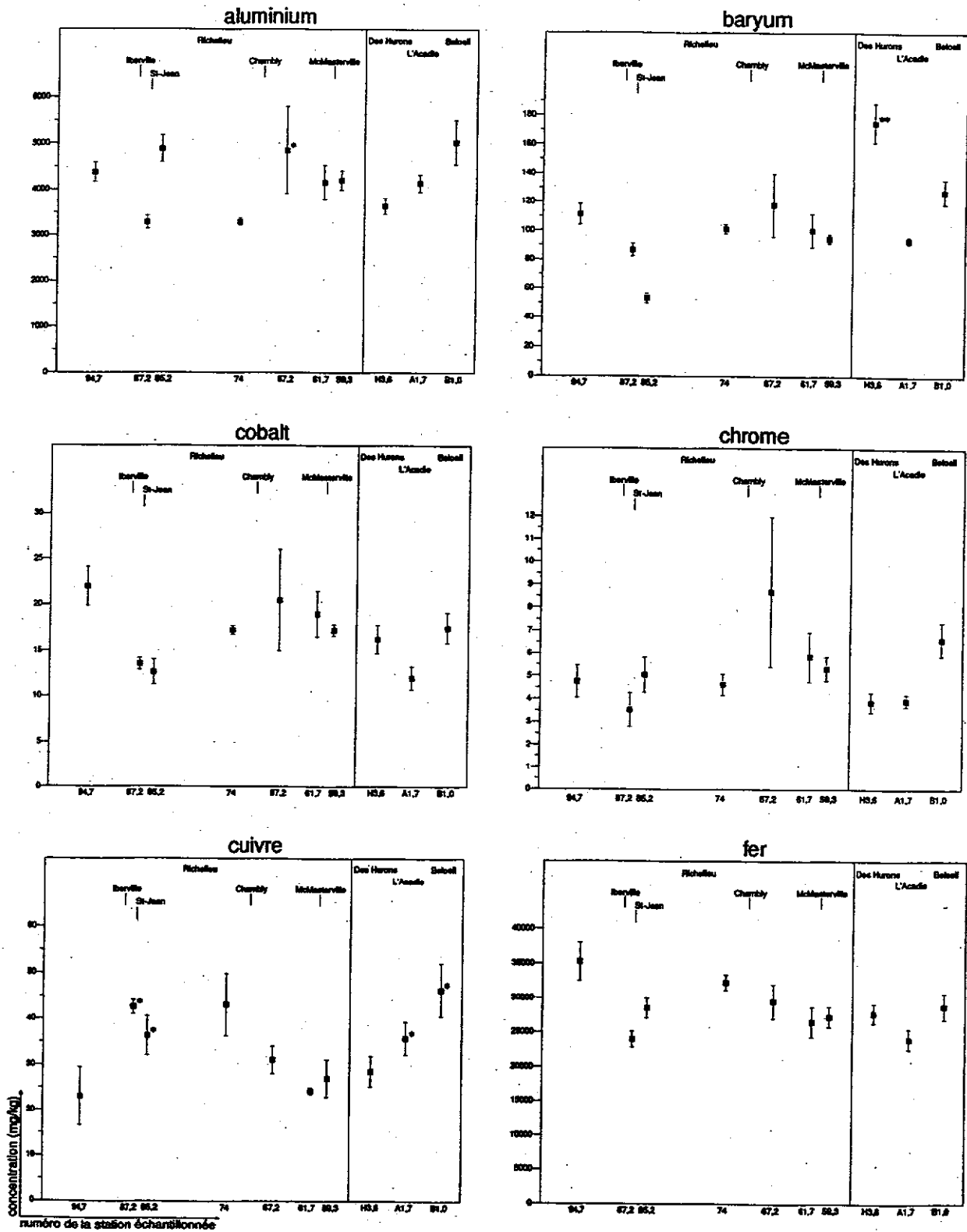
Les concentrations totales de BPC mesurées dans les mousses aquatiques sont présentées à la figure 5. En aval de Saint-Jean-sur-Richelieu, elles augmentent de façon très marquée (56 %) et statistiquement significative ( $P = 0,0071$ ) par rapport à l'amont. Un grand nombre de congénères présentent des hausses de concentrations, et ces dernières sont statistiquement significatives ( $\alpha < 0,1$ ) pour plusieurs tétra et pentachlorobiphényles, soit les numéros 44, 49, 52, 70, 74, 87, 95, 105 et 110 (figure 6).

Plus loin, en aval du bassin de Chambly, les concentrations diminuent, sans toutefois revenir au niveau mesuré en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu (figure 5). Cette diminution est peut-être attribuable à une certaine dégradation des BPC les moins chlorés, mais aussi à une possible sédimentation dans le bassin de Chambly. Il est en effet bien connu que les BPC ont tendance à adhérer au matériel particulaire, dont la sédimentation est favorisée dans les zones de courant faible.

De l'aval de Chambly à l'aval de McMasterville, il y a une nouvelle hausse de concentration (26%). Cette hausse, bien visible pour un grand nombre de congénères, atteint le seuil de signification statistique dans le cas des congénères numéros 31+28, 44, 49 et 52 (figure 6).

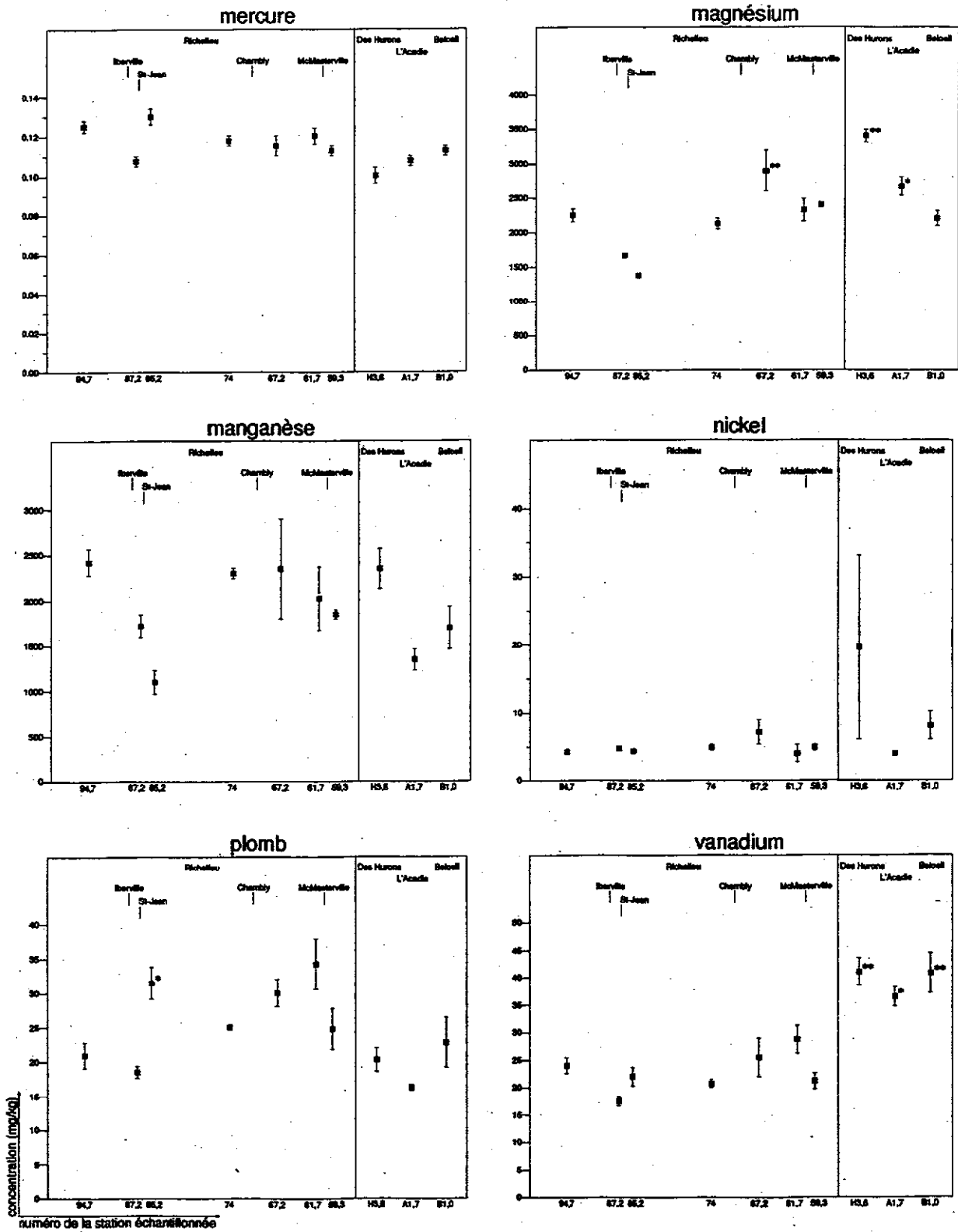
Le ruisseau Beloeil est aussi une source de BPC, car les concentrations totales mesurées à son embouchure sont 70 % plus élevées que dans le Richelieu en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu ( $P = 0,0056$ ). Par rapport à cette station de référence, on trouve à l'embouchure du ruisseau Beloeil des concentrations significativement plus élevées des congénères numéros 44, 49, 52, 70, 82, 87, 95, 149, 138 + 158, 170 ( $\alpha < 0,1$ ).





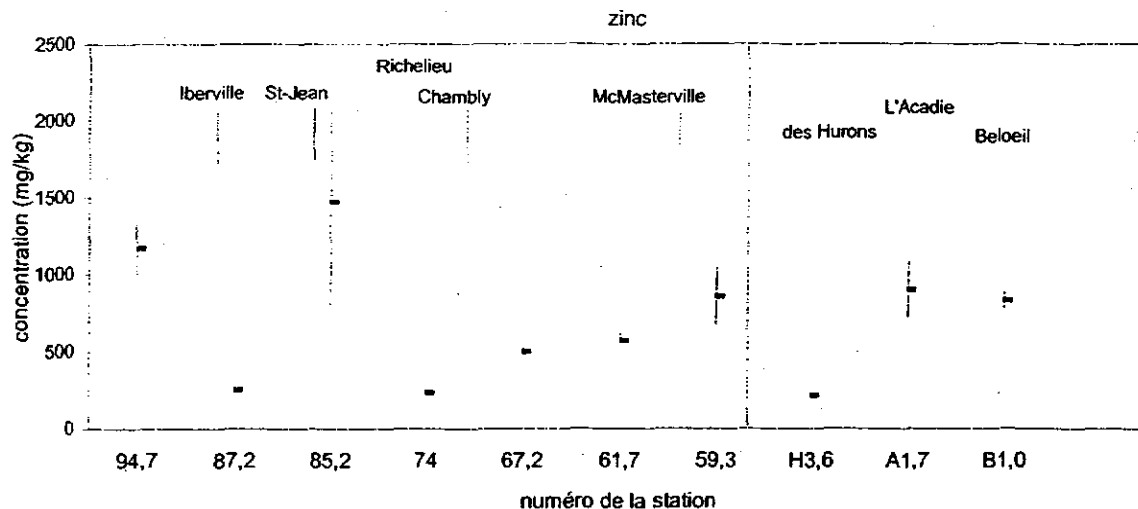
\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

Figure 3 Moyennes et erreurs types des concentrations de métaux dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

Figure 3 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de métaux dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t ( $\alpha = 0,05$ )

Figure 3 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de zinc dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

Iberville est un cas particulier. Le graphique des concentrations totales de BPC (figure 5) porte à croire qu'il n'y a pas de différence entre l'amont et l'aval de cette ville ( $P = 0,8151$ ), mais l'examen des résultats par congénère suggère autre chose. On constate en effet que l'aval d'Iberville présente des concentrations plus élevées qu'en amont pour plusieurs pentachlorobiphényles (ex. : n° 95, 101, 99, 87, 110 à la figure 6); mais ces hausses sont compensées par de fortes baisses en HAP à trois chlores (n° 17, 18, 31+28 et 33) et de deux congénères à quatre chlores (n° 44 et 49). Au chapitre des hausses, il n'y a que celle du congénère n° 110 qui est statistiquement significative; les baisses des BPC légers, elle, sont toutes significatives. Il en résulte que le profil de la contamination en BPC en aval d'Iberville est très différent de celui des autres stations. On y observe une beaucoup moins grande importance des formes à trois atomes de chlore, au profit des formes penta ou hexachlorés (figure 7). Cela porte à croire qu'Iberville aussi est une source de BPC, mais d'une nature différente des autres sites. Cette conclusion demeure cependant incertaine, car elle n'est basée que sur un seul échantillon.

Globalement, les concentrations de BPC dans les mousses aquatiques placées dans le Richelieu ne sont pas très élevées en comparaison de ce qui a été observé sur l'ensemble des cours d'eau où cette technique a été employée (figure 8). Elles sont du même ordre que celles mesurées dans les témoins provenant de la rivière Cachée. Des teneurs nettement plus élevées ont été mesurées dans la Yamaska et certaines stations du Saint-Maurice.

#### Dioxines et furannes chlorés

Les concentrations totales de dioxines et de furannes chlorés aux différentes stations de la rivière Richelieu sont présentées à la figure 9. À 300 pg/g, les teneurs mesurées en aval de Chambly sont nettement plus élevées qu'aux autres stations, où elles ne dépassent pas 100 pg/g. L'examen des résultats par congénère démontre que ce résultat est dû essentiellement à l'octachlorodioxine (OCDD), qui passe d'une concentration moyenne de 52,3 pg/g en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu et Iberville à 285 pg/g en aval de Chambly. Cette hausse est d'ailleurs statistiquement significative ( $p = 0,0324$ ).

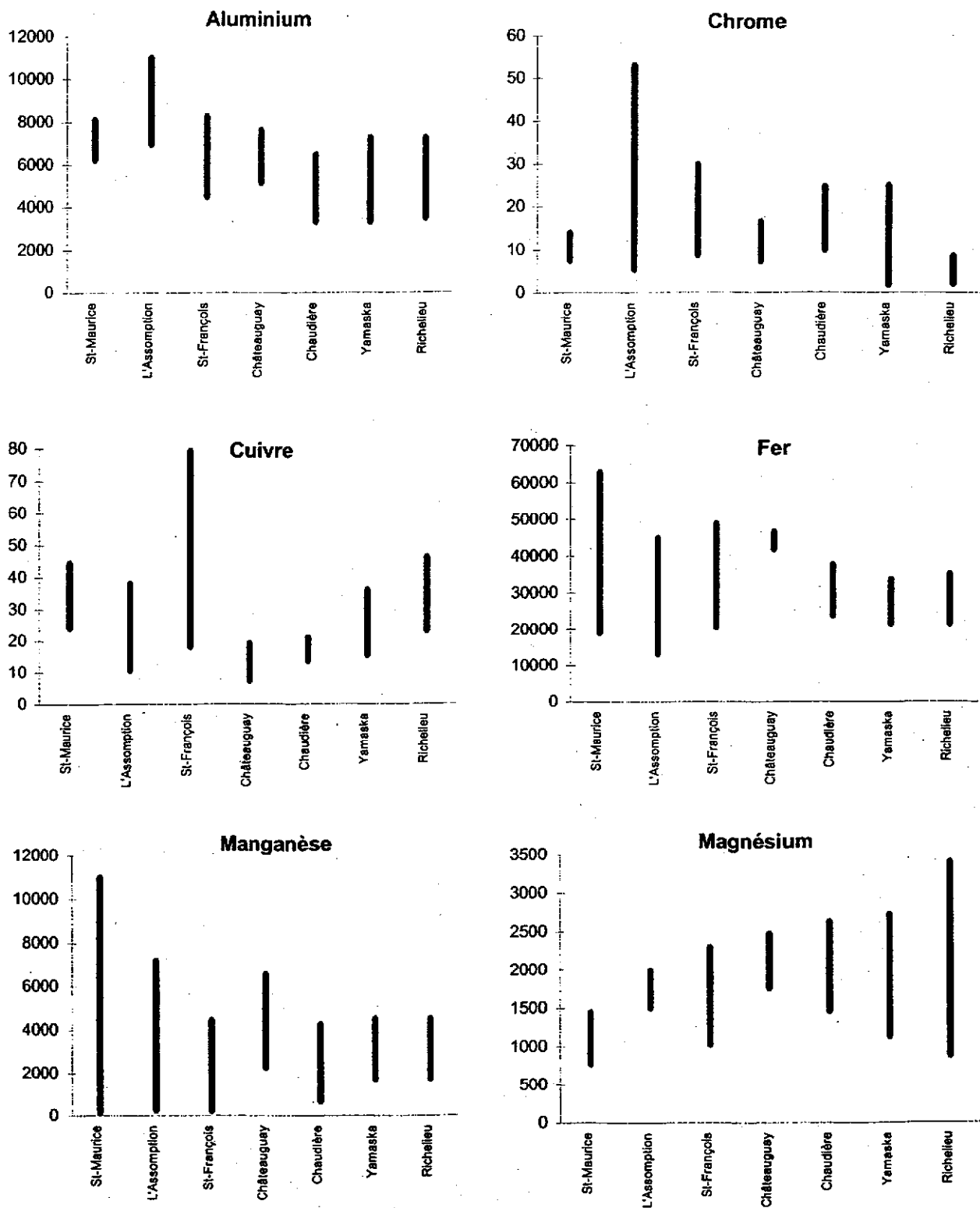


Figure 4 Concentrations (mg/kg) de métaux mesurées dans les mousses aquatiques placées dans plusieurs cours d'eau du Québec; gamme des concentrations moyennes par station

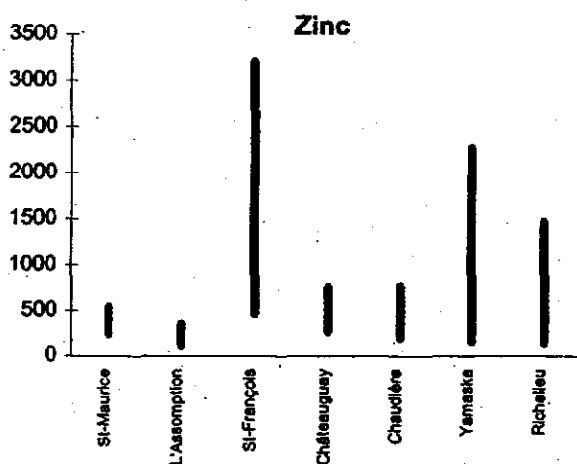
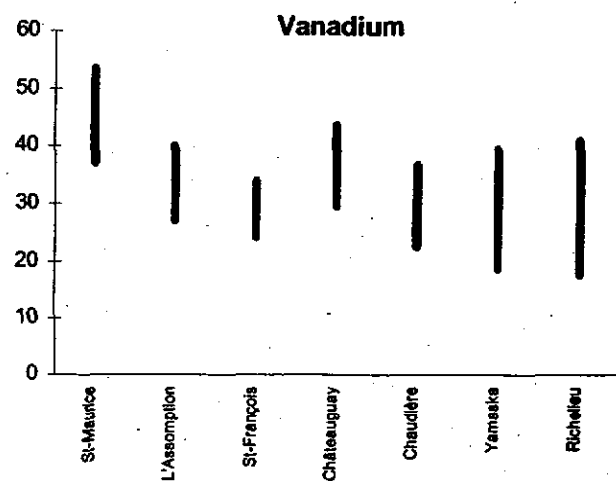
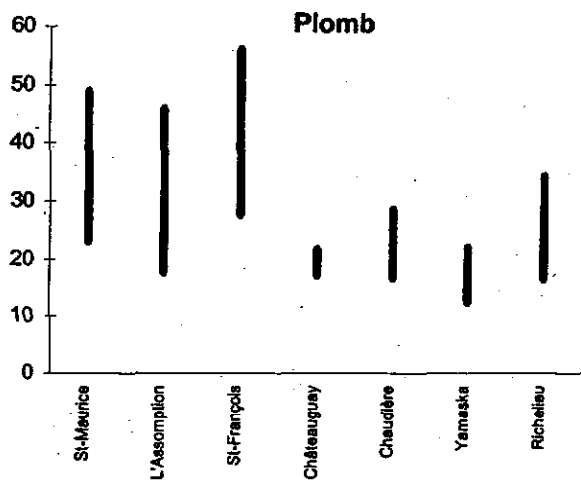
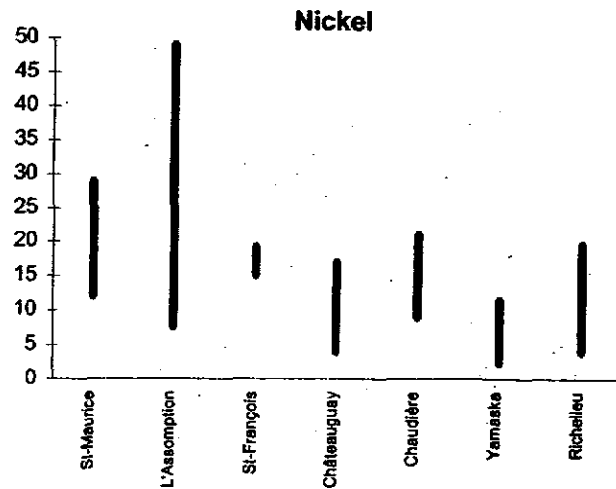
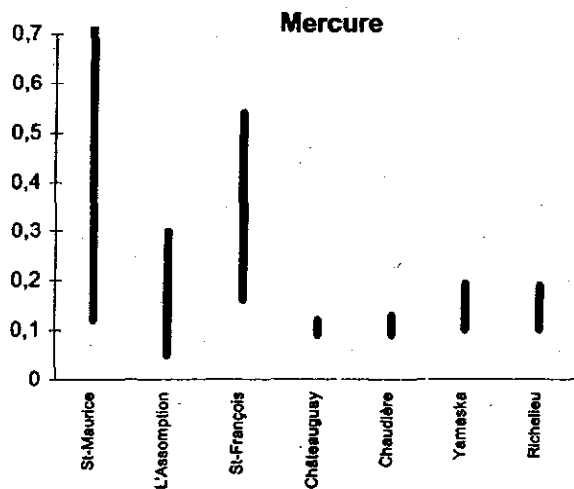
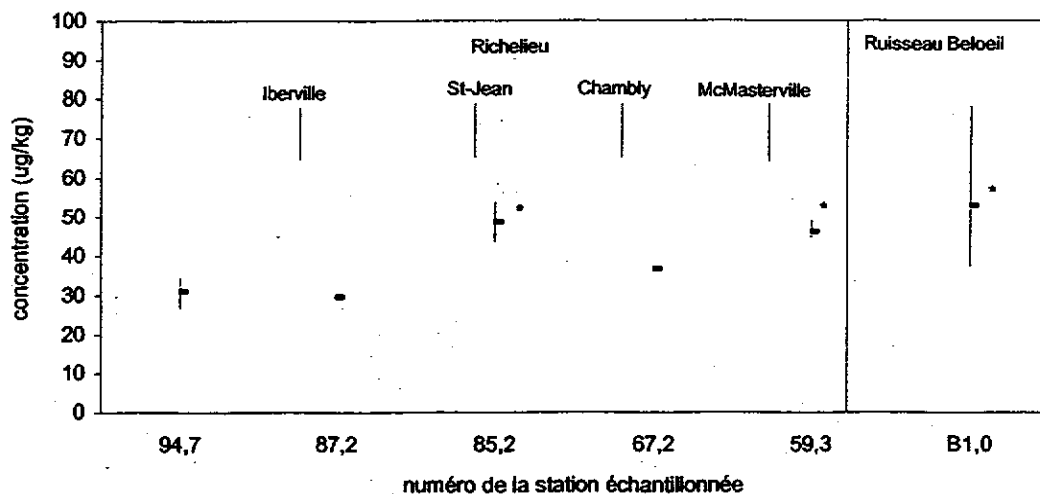


Figure 4 Concentrations (mg/kg) de métaux mesurées dans les mousses aquatiques placées dans plusieurs cours d'eau du Québec; gamme des concentrations moyennes par station (suite)



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t ( $\alpha = 0,05$ )

Figure 5 Moyenne et erreur type des concentrations de BPC dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et le ruisseau Beloeil

À la figure 9, les résultats en équivalents toxiques de 2,3,7,8-T4CDD signalent un apport à Saint-Jean-sur-Richelieu. L'examen des résultats par congénère confirme la présence d'une dioxine à sept atomes de chlore, la 1,2,3,4,6,7,8-H7CDD. La concentration moyenne en amont de Saint-Jean et Iberville est de 6,3 pg/g, alors qu'en aval les teneurs sont respectivement de 11,5 et 12 pg/g. Dans les deux cas, la différence avec l'amont est statistiquement significative. En aval de Saint-Jean-sur-Richelieu, les échantillons révèlent aussi la présence de deux furannes, le 2,3,7,8-T4CDF et le OCDF, qui ont respectivement quatre et huit atomes de chlore et qui sont virtuellement absents des autres échantillons. Le fait que les concentrations en équivalents toxiques soient plus élevées à Saint-Jean-sur-Richelieu qu'à Chambly est dû justement à la présence du 2,3,7,8-T4CDF, dont le facteur international d'équivalence toxique est cent fois plus élevé que celui du OCDD.

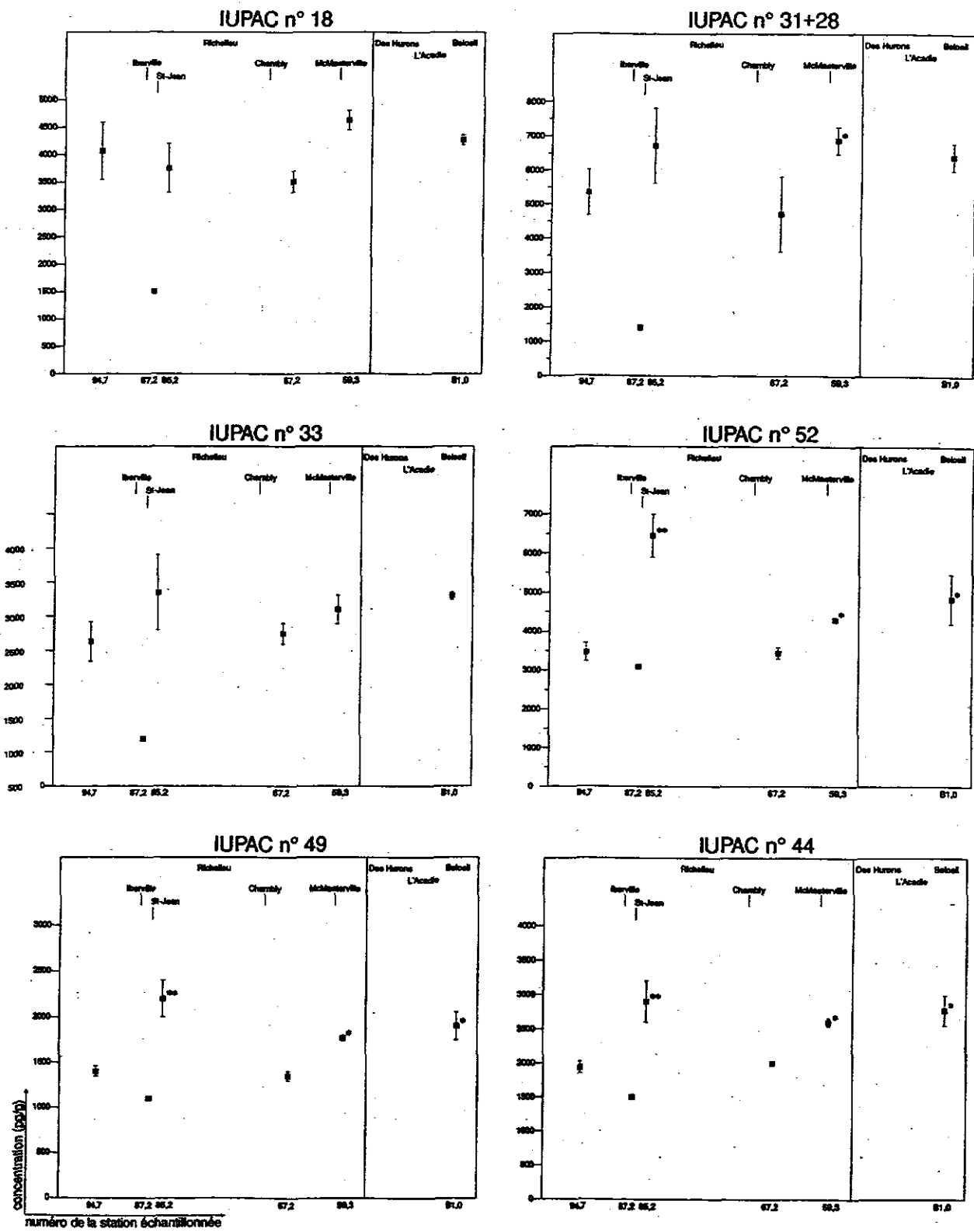
La figure 10 permet de comparer les concentrations de dioxines et de furannes du Richelieu à celles d'autres cours d'eau où la technique des mousses aquatiques a été employée. Les teneurs élevées d'OCDD à Chambly placent cette station au troisième rang sur 29 stations

au chapitre des concentrations totales. Il semble donc qu'il y ait à Chambly une source assez particulière de dioxine. Cependant, étant donné que l'OCDD est relativement peu toxique, la station de Chambly se retrouve à un niveau beaucoup plus bas lorsque l'on considère les équivalents toxiques (figure 10). À ce chapitre, la station de Saint-Jean-sur-Richelieu, la plus élevée du bassin, se trouve au huitième rang sur 29.

#### Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

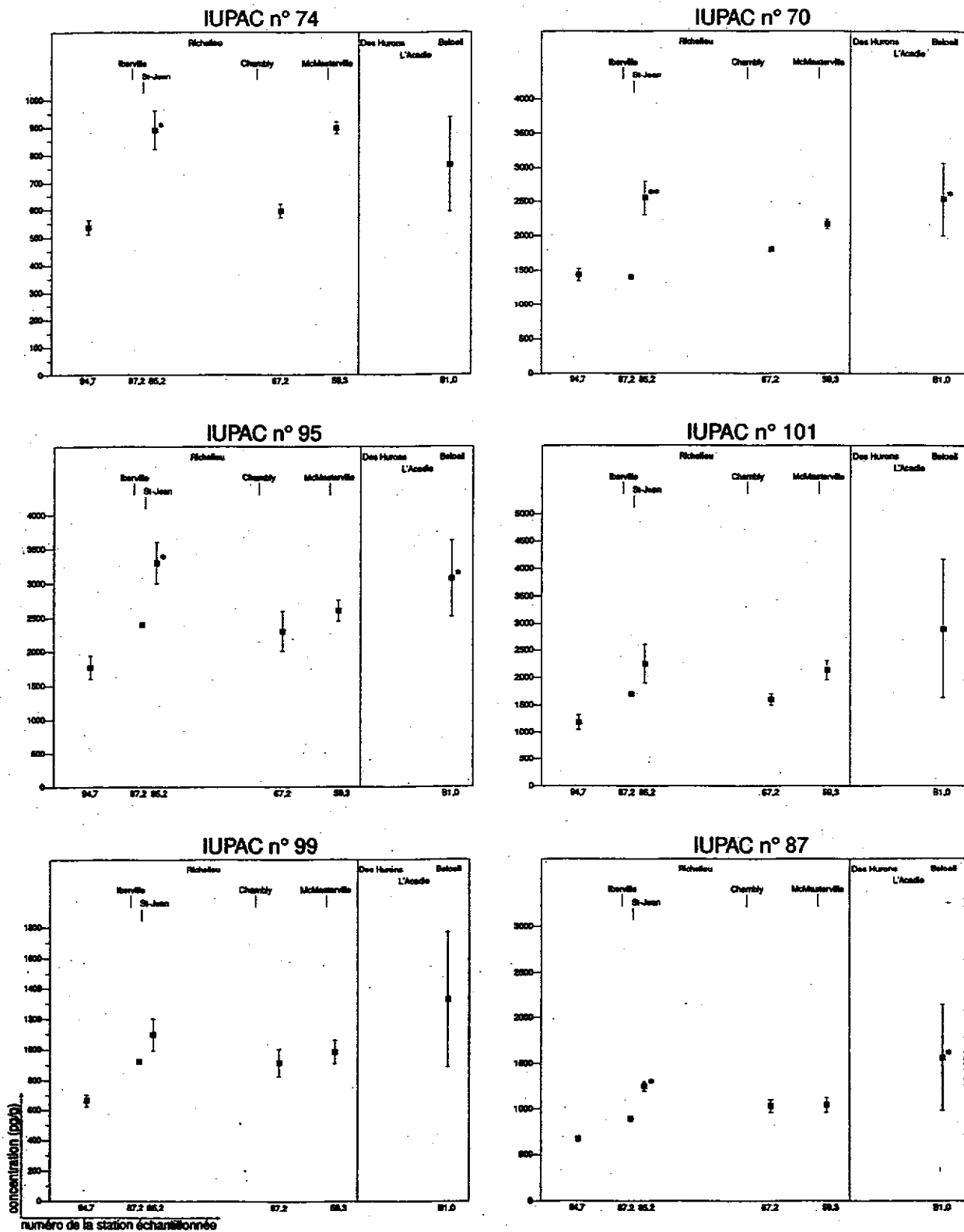
Quatorze HAP ont été détectés dans les cellules à dialyse placées dans le bassin de la rivière Richelieu, dont deux –les benzo(b) et benzo(k)fluoranthène– n'ont été détectés qu'en traces dans quelques cellules. La figure 11 présente les moyennes des concentrations à chaque station de mesure pour les 12 autres HAP.

Sauf l'acénaphthylène, les 12 HAP de la figure 11 présentent à Saint-Jean-sur-Richelieu des hausses substantielles de concentration. Selon les substances, les teneurs en aval de la ville sont 2,1 à 23 fois plus élevées qu'en amont. Toutes ces hausses sont statistiquement significatives selon le test de t, et la plupart le sont aussi selon le test de Tukey-Kramer.



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t ( $\alpha=0,10$ ) et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

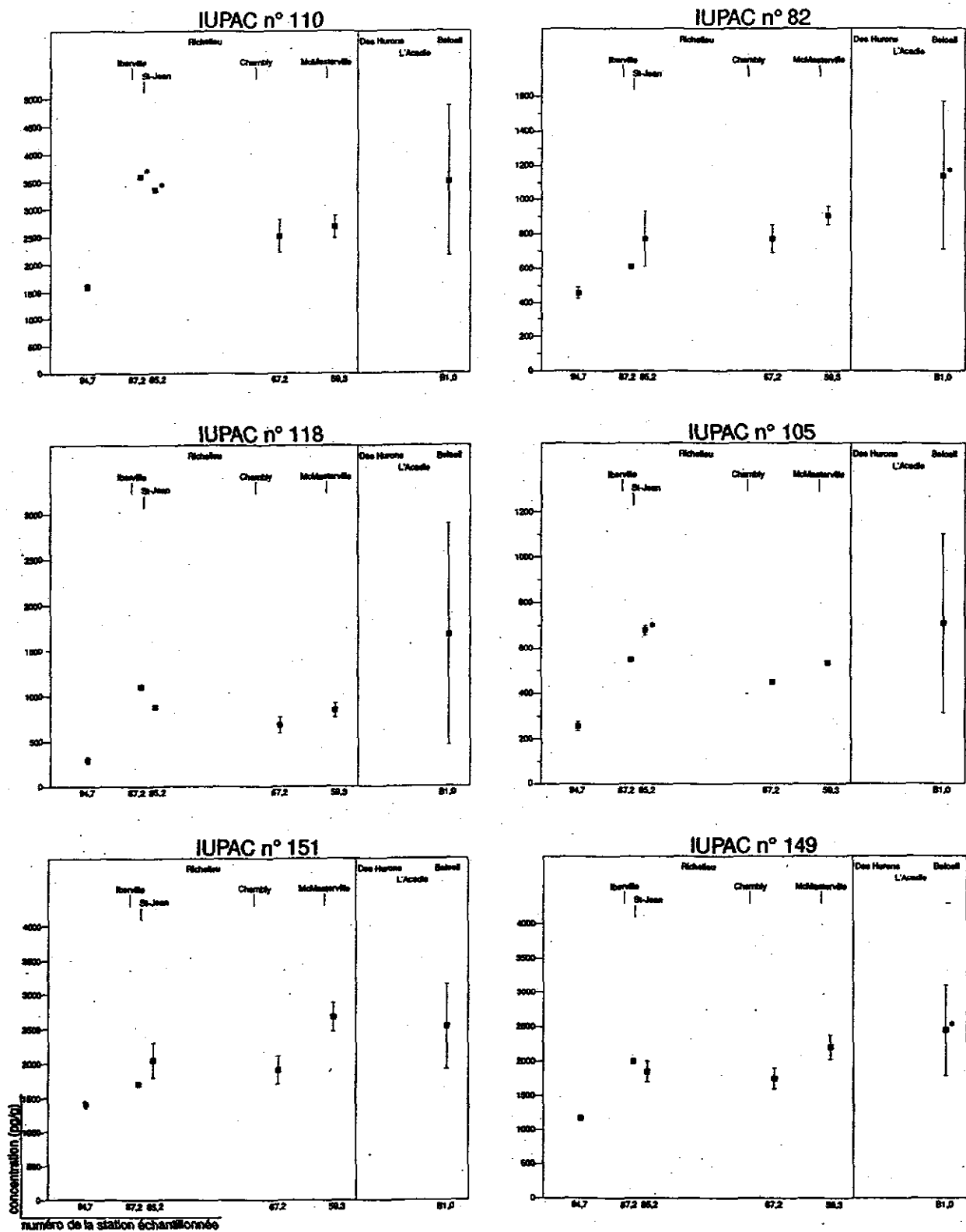
Figure 6 Moyennes et erreurs types des concentrations de congénères de BPC dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t ( $\alpha=0,10$ ) et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

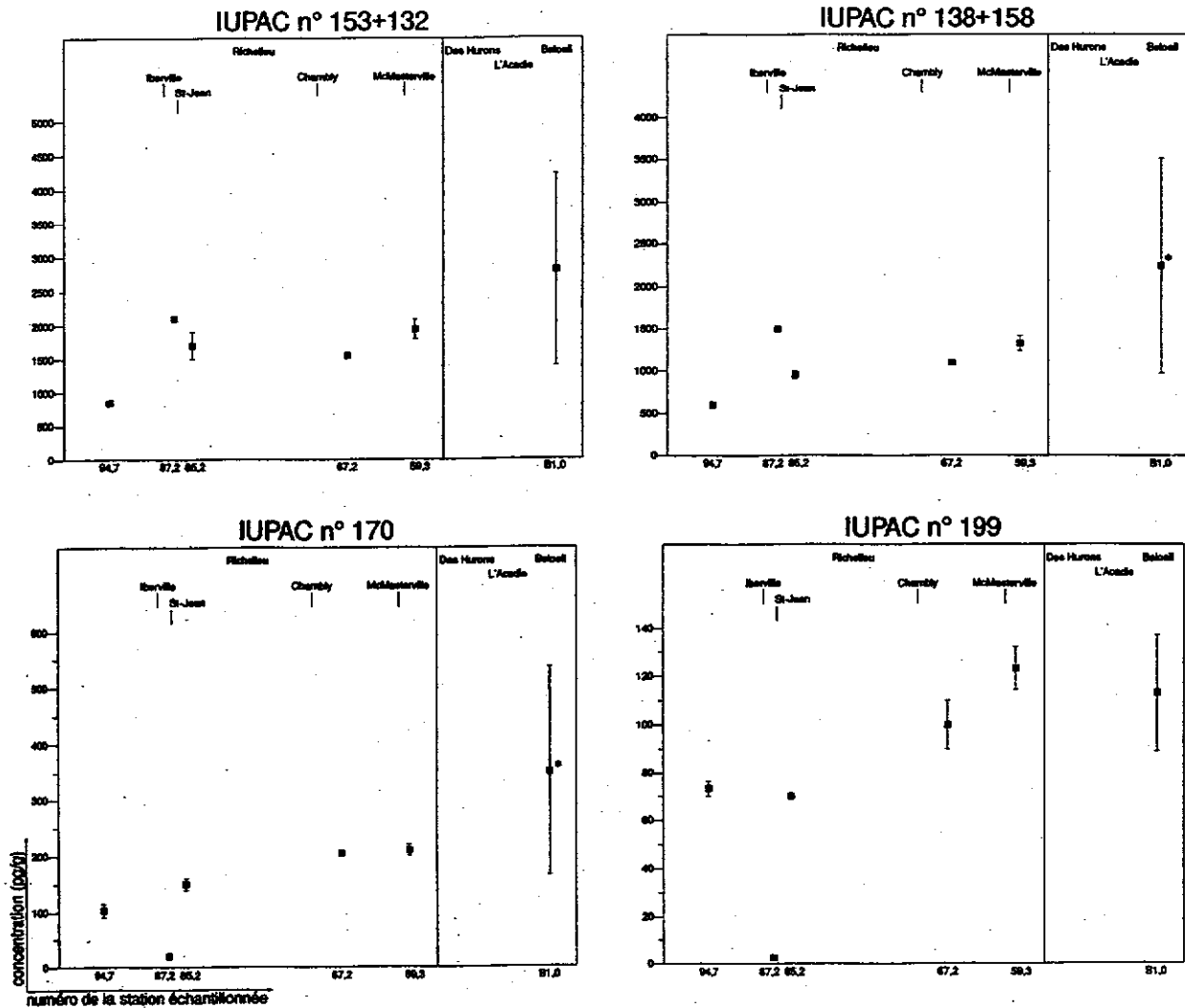
Figure 6 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de congénères de BPC dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires





\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t ( $\alpha=0,10$ ) et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

Figure 6 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de congénères de BPC dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t ( $\alpha=0,10$ ) et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

Figure 6 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de congénères de BPC dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

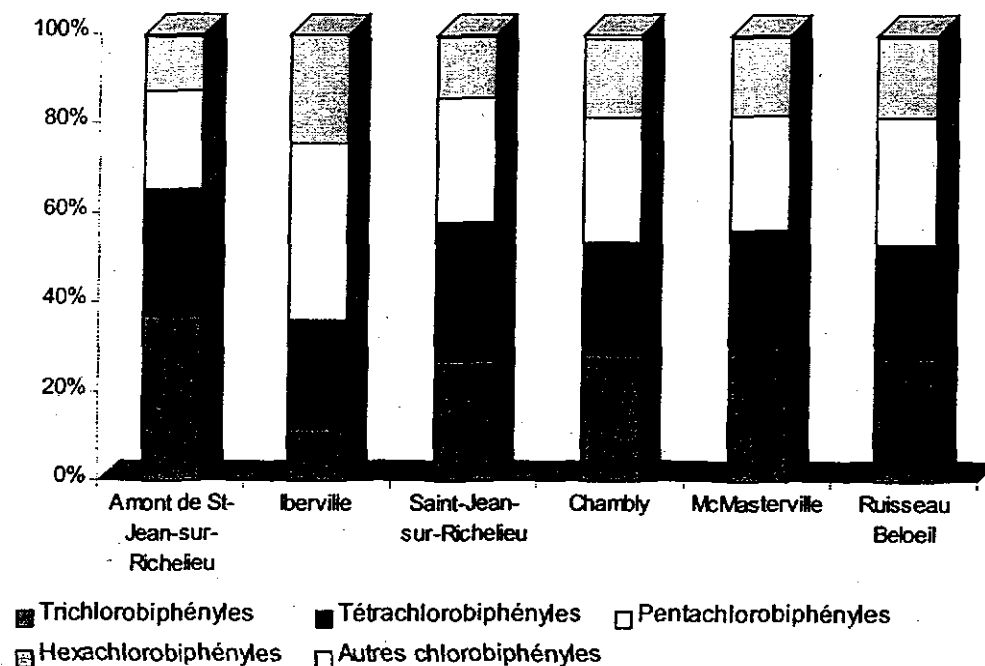


Figure 7 Pourcentage de BPC totaux, selon les différentes familles de congénères

Iberville, de l'autre côté du Richelieu, présente des hausses pour les mêmes substances, sauf l'acénaphthène et le benzo(a)anthracène. À l'exception du chrysène, les concentrations en aval d'Iberville sont cependant moins élevées que sur l'autre rive. Dans le cas du naphthalène et du 2-méthyl-naphthalène, la différence avec l'amont n'est pas significative. Selon les substances, les facteurs d'augmentation sont de 1,5 à 5,7. Il est difficile de savoir si les apports apparents à Iberville proviennent de rejets liquides de cette municipalité ou s'ils pourraient être le reflet, en plus diffus, d'apports atmosphériques locaux provenant de Saint-Jean.

À la station située au kilomètre 74, en amont de Chambly, tous les HAP rejetés dans l'agglomération de Saint-Jean sont revenus à des teneurs à peu près équivalentes à celles en amont cette dernière. C'est cependant à cette station qu'apparaissent les premières traces d'acénaphthylène. Chambly est aussi une source de HAP, car presque toutes les substances de la figure 11 présentent, immédiatement en aval du bassin, une hausse marquée de concentration par rapport à l'amont de la ville. Aux substances détectées en aval de Saint-Jean s'ajoutent l'acénaphthylène, qui est présent en quantité plus importante qu'en amont de la ville. Les différences entre l'amont et l'aval sont sous le seuil ou

près du seuil de signification de 0,05 pour tous les HAP, sauf le 1-méthyl-naphthalène. Les teneurs de HAP, de 3 à 15 fois plus élevées en aval qu'en amont, y atteignent dans certains cas des concentrations plus fortes qu'en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu.

Selon la documentation scientifique, les principales sources de HAP sont la combustion incomplète de matière organique et certains procédés industriels (Lalonde et coll. 1993). Le lessivage des matériaux créosotés, comme les pilotis de quais et les piliers de ponts, est aussi une source de HAP pour le milieu aquatique (CNRC 1984, cité dans CCMRE 1987). Il y a également des HAP dans les eaux de ruissellement urbain (Makepeace et coll. 1995). De fait, les sources potentielles de HAP dans le milieu aquatique sont nombreuses et variées. Il est donc difficile, sur la seule base des présents résultats, d'identifier les sources exactes des HAP détectés en aval de Saint-Jean et Chambly. Dans ce dernier cas, il est possible que le bassin agisse comme une trappe des HAP d'origine atmosphérique, en raison de sa grande surface d'échange avec l'air. La ville de Chambly compte aussi des sources potentielles de HAP, dont une entreprise du secteur des pâtes et papiers.

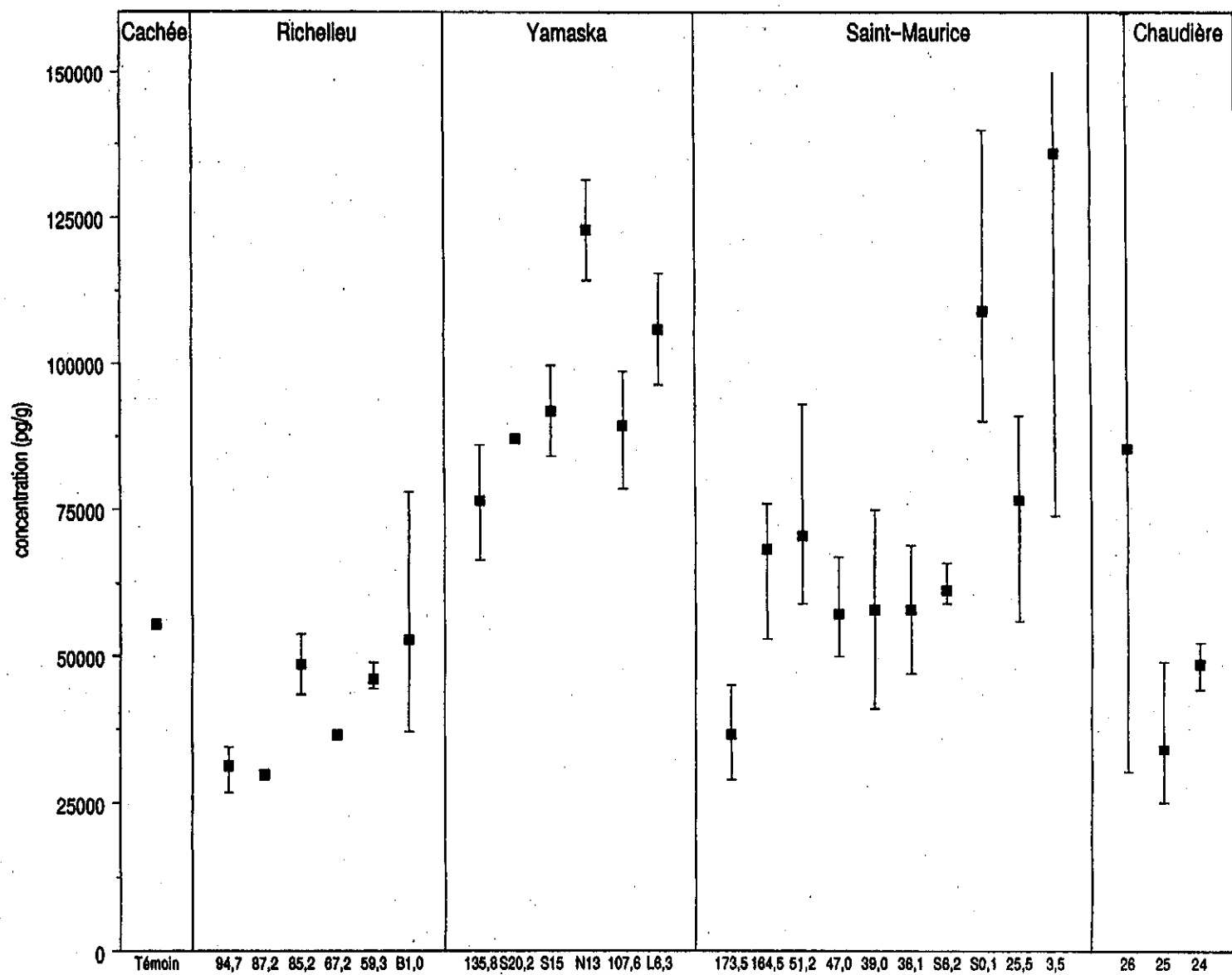


Figure 8 Moyennes, minimums et maximums des concentrations (pg/g) de BPC dans les mousses aquatiques placées dans plusieurs cours d'eau du Québec

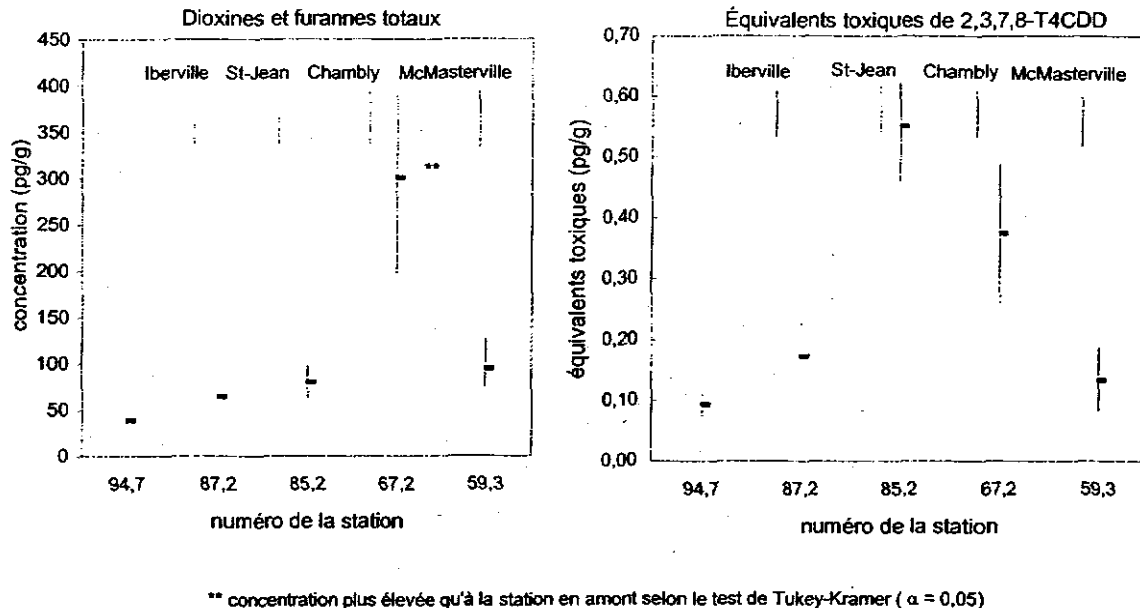


Figure 9 Moyennes et erreurs types des concentrations de dioxines et de furannes dans les mousses aquatiques placées dans la rivière Richelieu

En amont de McMasterville, les HAP sont en général revenus au bruit de fond déjà mesuré en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu et Chambly, et ils restent à ce niveau en aval de la ville. Les exceptions sont les trois formes de naphthalène, dont les teneurs en aval sont 2,3 à 3,3 fois plus élevées qu'en amont. Ces hausses sont statistiquement significatives mais plus modestes, et les teneurs atteintes sont moins élevées qu'en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu.

Parmi les trois tributaires à l'étude, la rivière l'Acadie se démarque vraiment comme source de HAP pour le Richelieu. Les 12 HAP de la figure 11, sauf l'acénaphthène, le chrysène et le benzo(a)anthracène, sont présents à l'embouchure de la rivière l'Acadie en concentrations 2,3 à 7,7 fois supérieures à celles mesurées dans le Richelieu en amont de Saint-Jean. Une source potentielle de ces HAP dans la rivière l'Acadie est l'entreprise Raffinerie de Napierville inc., située dans la ville du même nom, plus en amont. Cette entreprise produit du naphthalène, du paradichlorobenzène et du o-dichlorobenzène. Il est à noter que la municipalité de Napierville est située à environ 60 km de l'embouchure de la rivière l'Acadie. Les HAP étant assez volatils, si les teneurs relativement élevées à l'embouchure de la rivière

l'Acadie ne représentent que le résiduel, après évaporation et autres transformations, de ce qui est rejeté à Napierville, il se peut alors que les concentrations immédiatement en aval de cette municipalité soient très élevées.

À l'embouchure de la rivière des Hurons, il n'y a que le fluorène et le phénanthrène que l'on trouve en concentrations plus élevées qu'en amont de Saint-Jean. C'est également le cas au ruisseau Beloeil, où s'ajoutent du fluoranthène et des traces d'acénaphthène. Sauf pour le fluorène dans le ruisseau Beloeil, les concentrations atteintes dans ces deux cours d'eau ne sont toutefois pas très élevées (figure 11).

#### Phtalates

Les phtalates constituent un vaste groupe de produits chimiques utilisés principalement comme plastifiants. Il y a plusieurs sources de phtalates dans le milieu aquatique, notamment les usines de PVC, de textiles et de papier, les eaux de lixiviation des dépotoirs et les incinérateurs (CCMRE, 1987). De plus, on retrouve fréquemment des phtalates dans les eaux de ruissellement urbain (Makepeace et coll., 1995).

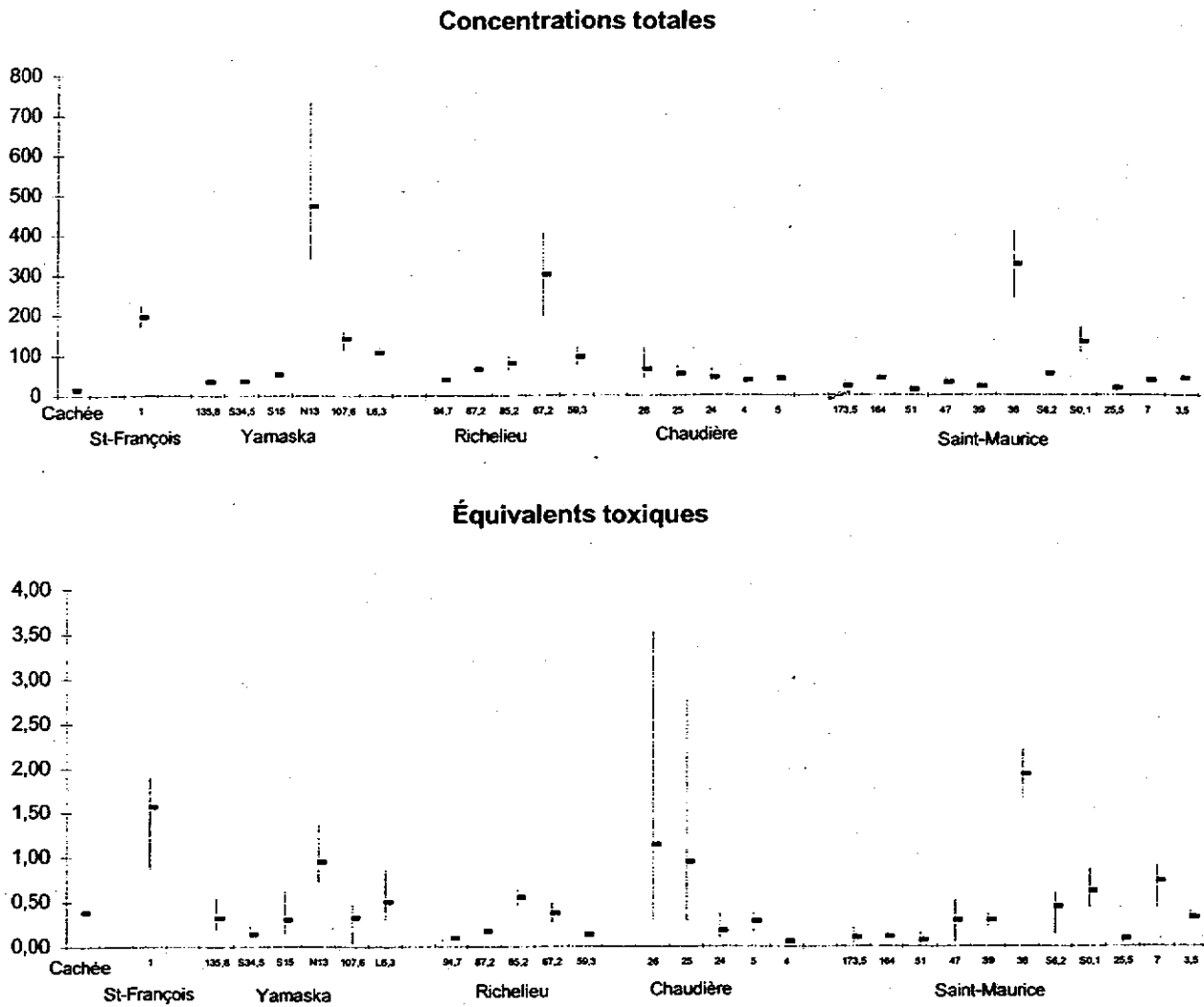


Figure 10 Concentrations (pg/g) de dioxines et furannes dans les mousses aquatiques dans six cours d'eau du Québec; maximum, minimum et moyenne des mesures à chaque station

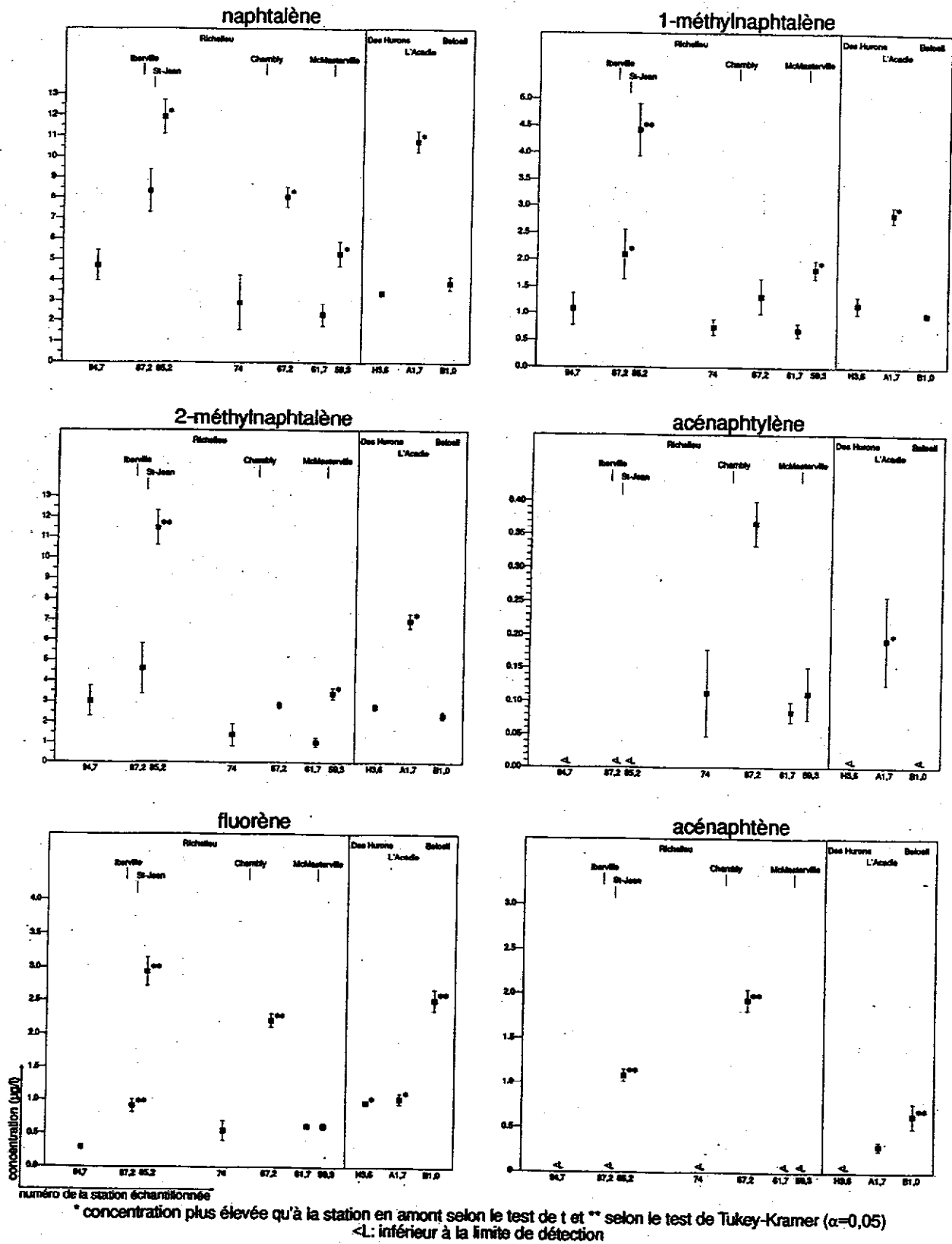
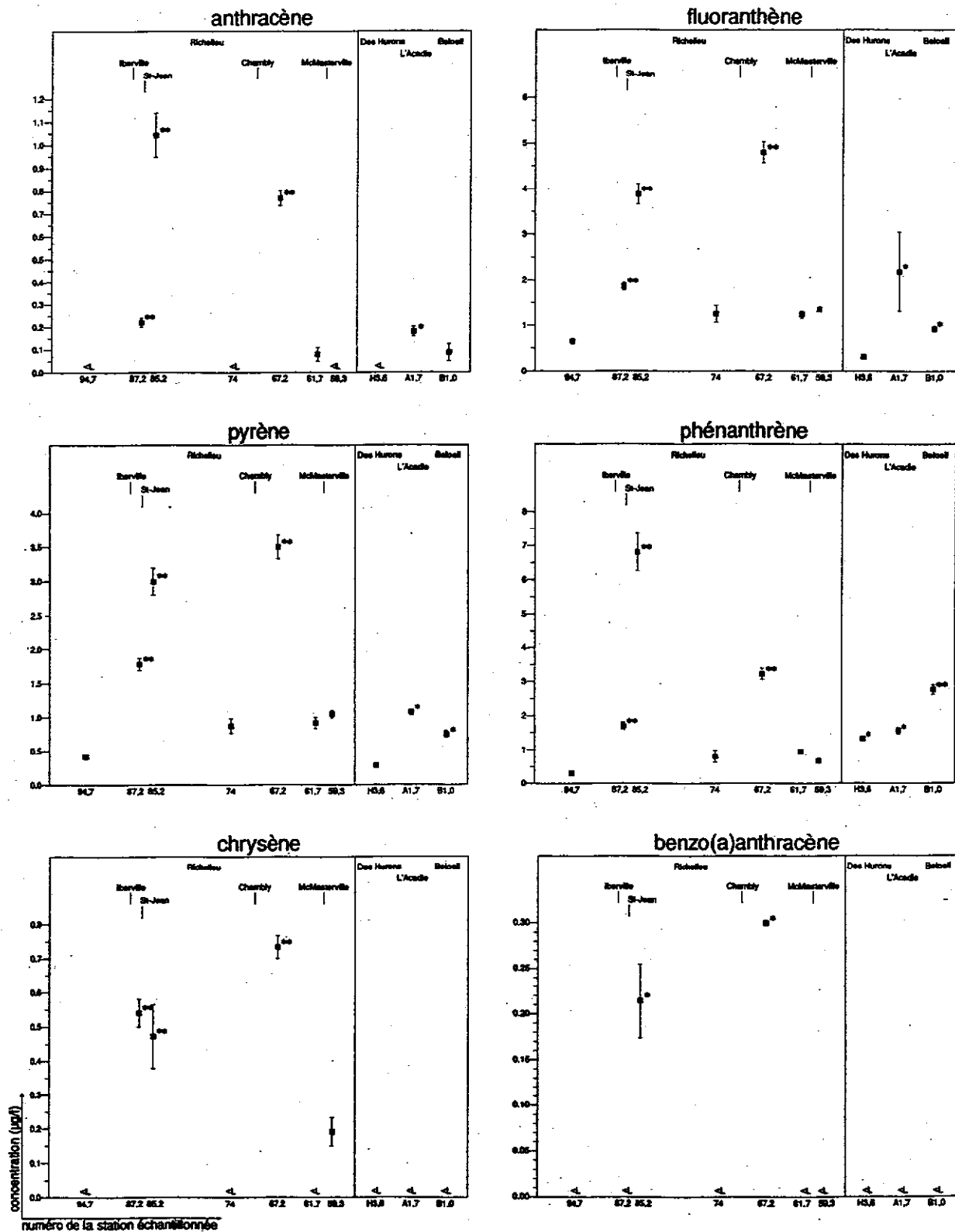


Figure 11 Moyennes et erreurs types des concentrations de HAP dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )  
 $\triangleleft$ : inférieur à la limite de détection

Figure 11 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de HAP dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



Six phtalates ont été détectés dans le bassin versant de la rivière Richelieu ; les concentrations moyennes par station ainsi que leur erreur type sont présentées à la figure 12. On constate qu'Iberville et Saint-Jean sont des sources de diéthylphtalate et de butylbenzylphtalate. Les concentrations y sont 4,8 à 16 fois plus élevées qu'en amont de Saint-Jean et significativement différentes des résultats enregistrés à toutes les autres stations.

À McMasterville, ce sont les concentrations de di-n-butylphtalate et de butylbenzylphtalate qui sont plus élevées en aval qu'en amont. Les hausses, respectivement d'un facteur 2,2 et 2,3, sont plus modestes que dans l'agglomération de Saint-Jean-sur-Richelieu, et les concentrations atteintes moins élevées. À l'embouchure des trois tributaires, les concentrations de diéthylphtalate, d'environ 6 µg/l, sont légèrement mais significativement plus élevées que dans le Richelieu en amont de Saint-Jean, où elles se situent à 3 µg/l.

Entre l'amont et l'aval des sites à l'étude, il n'y a pas de différence significative dans les concentrations de bis(2-éthylhexyl)phtalate et de di-n-octylphtalate. Cela est dû en partie à la grande variation intra-station des concentrations mesurées, qui rend les résultats difficiles à interpréter. Quoique très variables, les teneurs de bis(2-éthylhexyl)phtalate en amont de Saint-Jean sont très élevées, ce qui suggère qu'il y a en amont une source insoupçonnée de cette substance. Dans le cas du diméthylphtalate, on n'a mesuré que des traces dans certaines cellules.

#### Autres composés organiques semi-volatils

Outre les HAP et les phtalates, les cellules à dialyse ont permis de détecter 19 composés organiques semi-volatils dans les eaux du Richelieu et ses tributaires à l'étude. La figure 13 présente les résultats d'analyse obtenus pour 11 substances qui ont été détectées à plusieurs stations de mesure. Sauf pour le phénol et le 1,3-dichlorobenzène, Saint-Jean-sur-Richelieu est une source pour toutes ces substances. Les teneurs en aval sont 2,1 à 66 fois plus élevées qu'en amont, et toutes ces différences sont statistiquement significatives. Iberville est aussi une source pour certaines de ces substances, soit le 1,2- et le 1,4-dichlorobenzène, le 4-méthylphénol, l'oxybenzone et le benzophénone. Sauf pour le 4-méthylphénol, les concentrations atteintes sont cependant moins élevées qu'en aval de Saint-Jean.

À la station 74, en amont de Chambly, plusieurs des substances rejetées sont revenues à la concentration mesurée en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu. Cependant, les concentrations de 1,2- et le 1,4-dichlorobenzène, le 1,2,4-trichlorobenzène et l'oxybenzone demeurent relativement élevées. En aval de Chambly, il n'y a que le dibenzofuranne que l'on trouve en concentration supérieure à l'amont.

Dans l'ensemble, McMasterville n'est pas non plus une source importante de ces substances. Seul l'oxybenzone y affiche une hausse de concentration. Inférieure à la limite de détection dans les cinq cellules de la station 61,7, cette substance a été détectée dans quatre des six cellules de la station 59,3, en concentration variant de 3 à 29 µg/l.

Plusieurs des substances de la figure 13 ont été trouvées à l'embouchure des trois tributaires à l'étude en concentrations supérieures à celles mesurées en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu. C'est le cas pour le dibenzofuranne, l'oxybenzone et le benzophénone, dans la rivière des Hurons; les 1,2-, 1,3- et 1,4-dichlorobenzène, le 1,2,4-trichlorobenzène, le dibenzofuranne et le benzophénone dans la rivière l'Acadie; le 1,2,4-trichlorophénol, l'oxybenzone, le 1,3-dichlorophénol, le dibenzofuranne, le benzophénone et le carbazole dans le ruisseau Beloeil. Pour ces quatre dernières substances, les teneurs moyennes dans le ruisseau Beloeil correspondent aux valeurs maximales du bassin. Le carbazole n'a été décelé qu'à cet endroit et en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu.

La figure 14 présente les résultats pour six substances, dont cinq formes de toluène, qui n'ont été détectées qu'à un endroit : la station 59,3 située en aval des installations de ICI Canada, Division Explosifs à McMasterville. La présence de composés à base de toluène à cet endroit n'a rien de surprenant, car de telles substances ont été trouvées dans les rejets de l'entreprise (Sodexen, 1995). Il faut toutefois signaler que l'usine a cessé sa production de TNT (trinitrotoluène) en 1996.

La figure 15 présente les résultats obtenus pour deux autres composés détectés par le balayage des composés organiques semi-volatils : l'atrazine et le métolachlor. Ces deux produits sont des pesticides couramment utilisés dans la culture du maïs. Le fait qu'ils aient été captés surtout par les cellules à dialyse placées dans les rivières des Hurons et l'Acadie était à prévoir car leur présence à ces

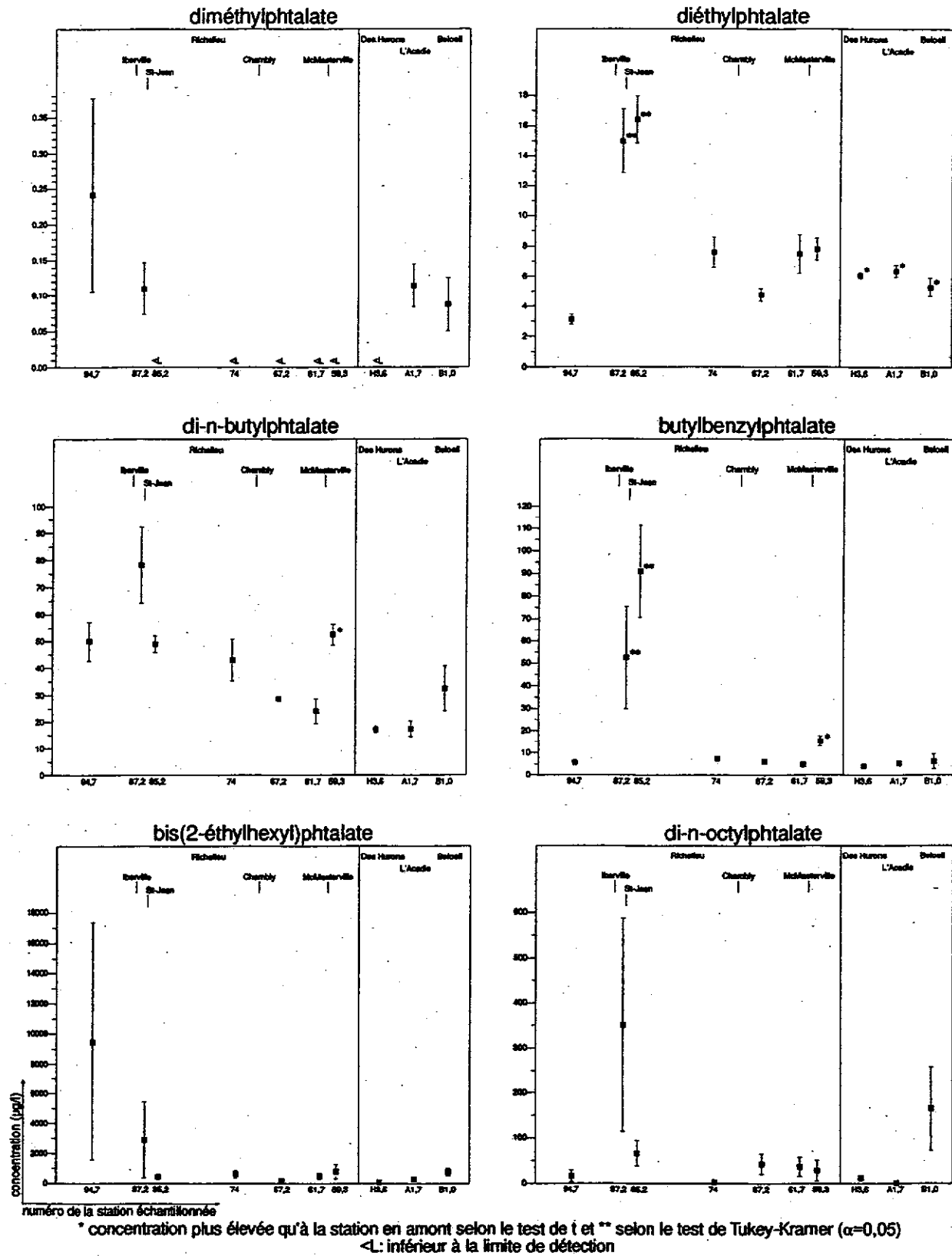


Figure 12 Moyennes et erreurs types des concentrations de phtalates dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

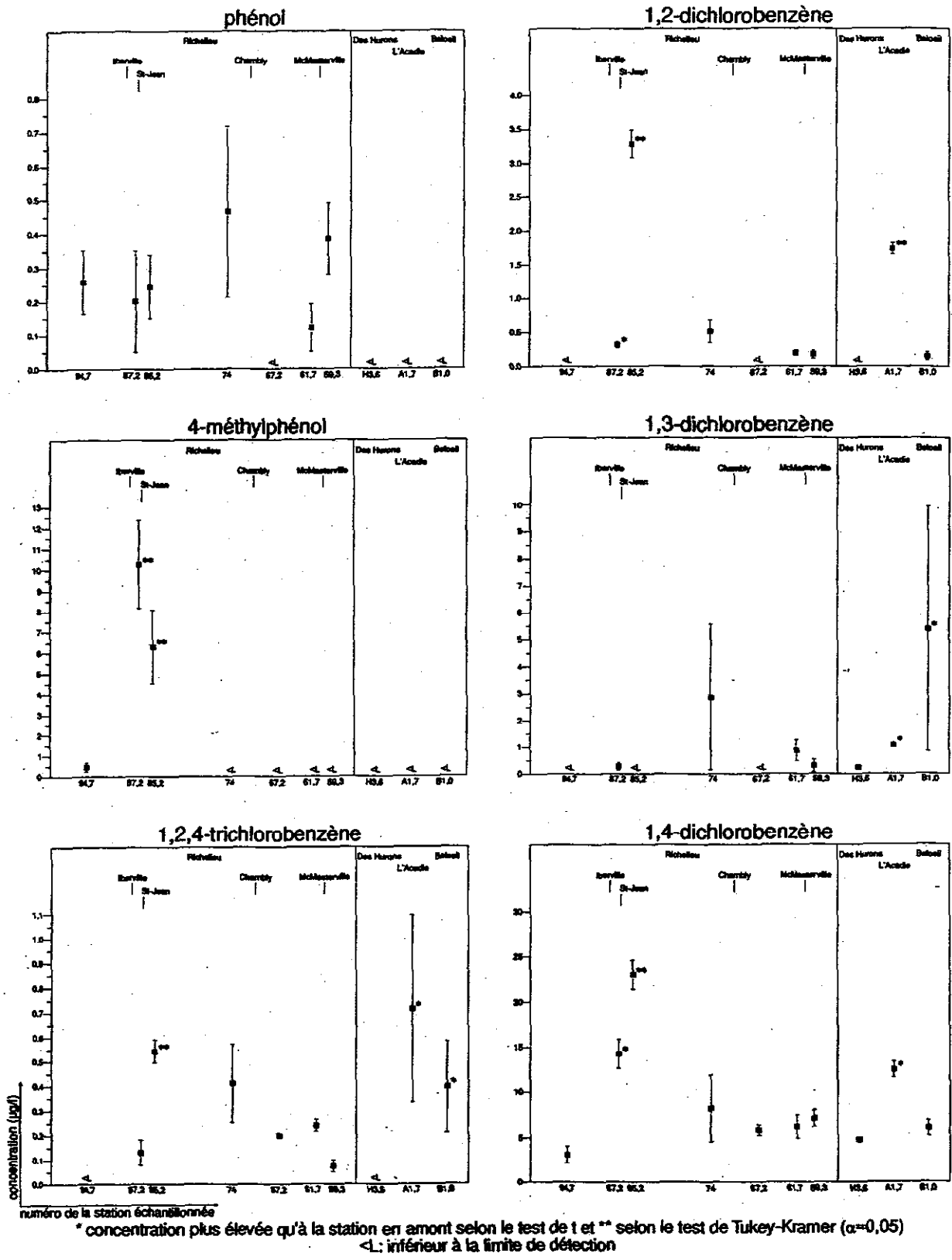
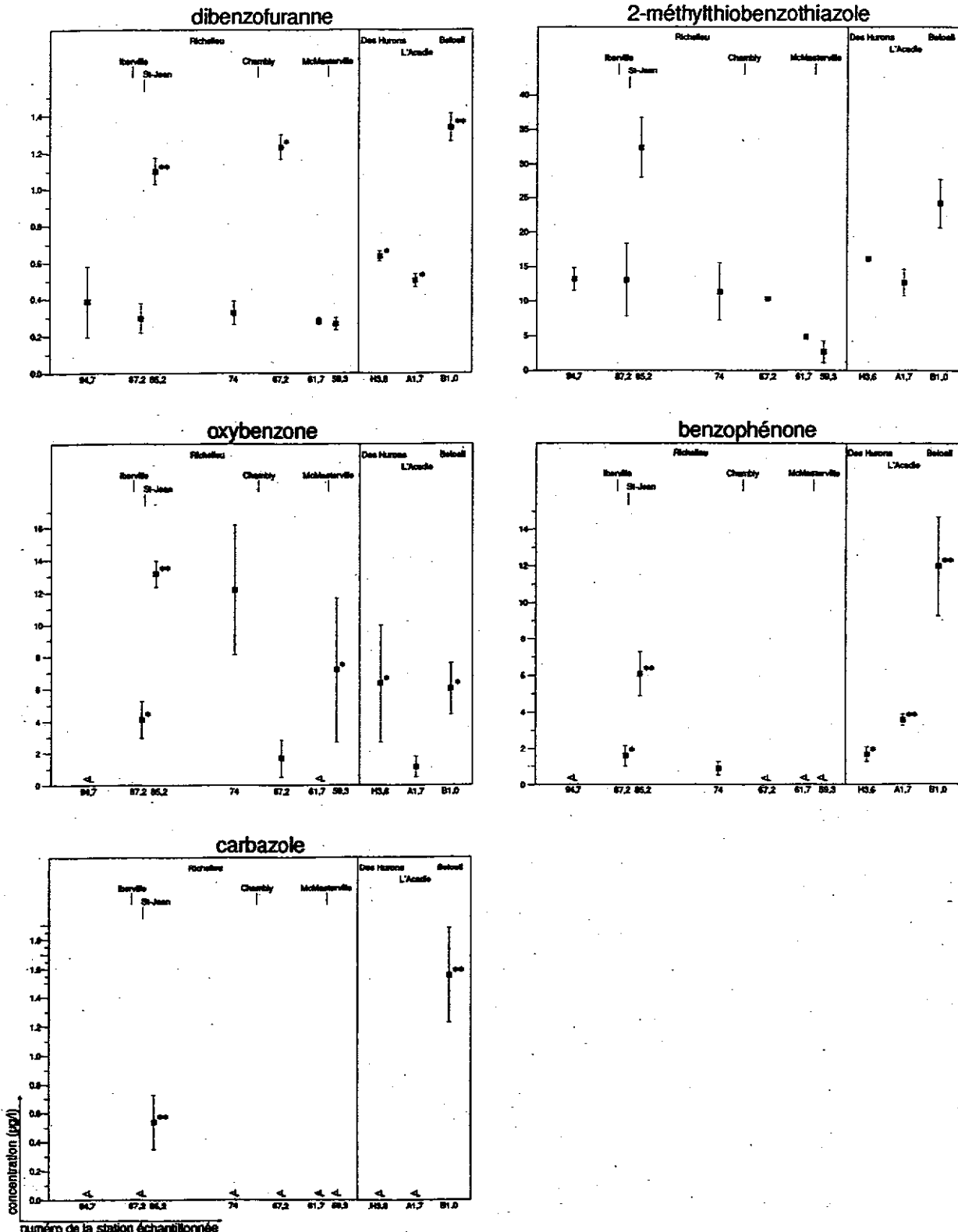
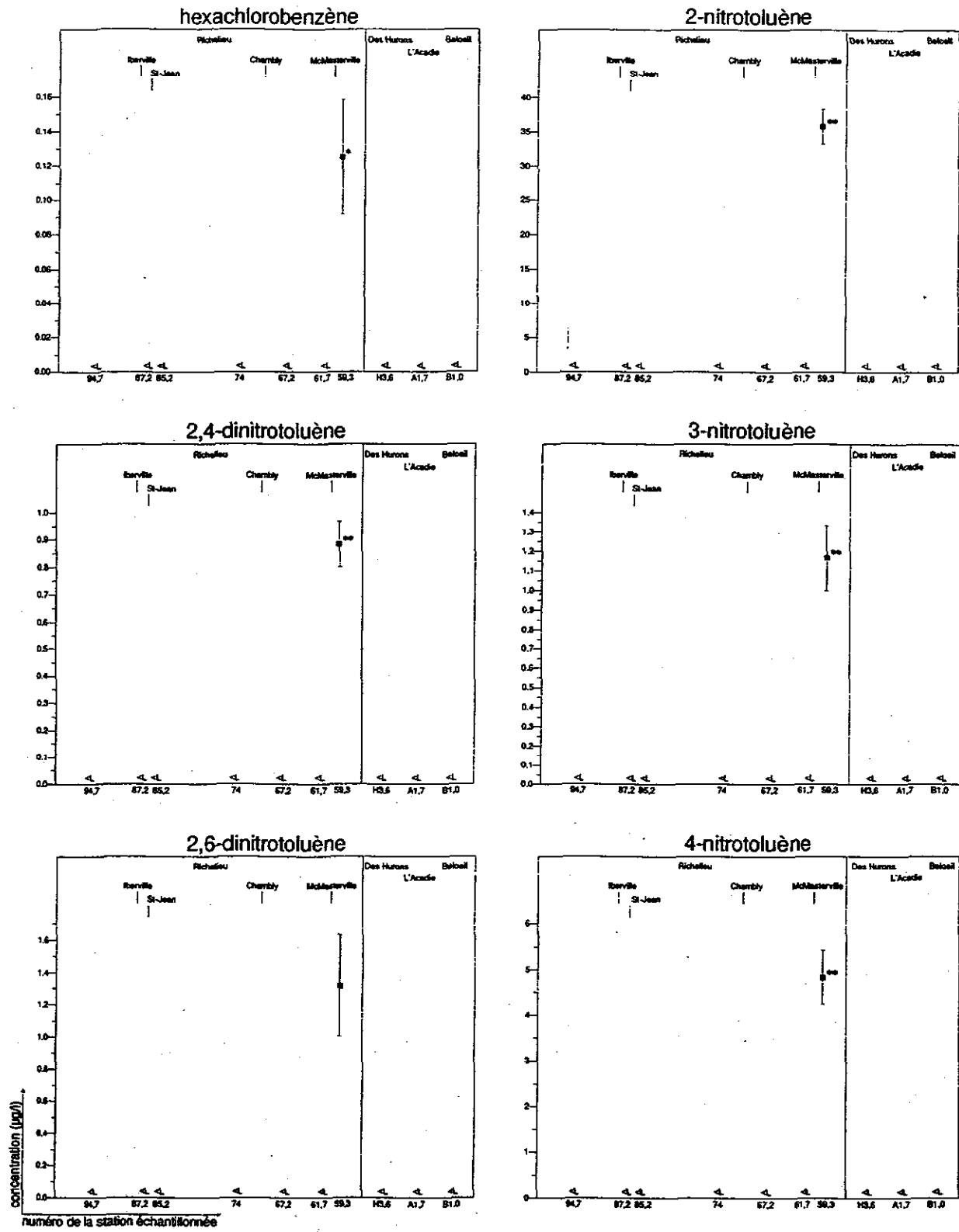


Figure 13 Moyennes et erreurs types des concentrations de divers composés organiques semi-volatils dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



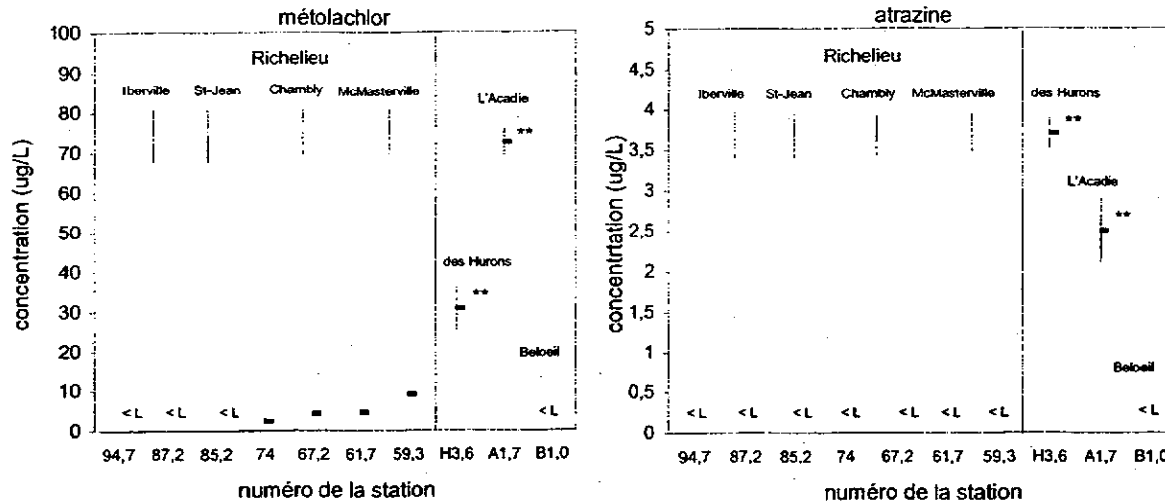
\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )  
 <L: inférieur à la limite de détection

Figure 13 (suite) Moyennes et erreurs types des concentrations de divers composés organiques semi-volatils dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )  
 <L: inférieur à la limite de détection

Figure 14 Moyennes et erreurs types des concentrations d'hexachlorobenzène et divers toluènes dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\*\* concentration plus élevée qu'à la station en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha = 0,05$ )

< L : inférieur à la limite de détection

Figure 15 Moyennes et erreurs types des concentrations de deux pesticides dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

en concentration élevée, a déjà été signalée (Giroux et coll., 1997 ; Berryman et Giroux, 1994). Ces fortes teneurs résultent de l'importance de la culture du maïs dans le bassin des rivières des Hurons et L'Acadie, qui occupe respectivement 29 % et 38 % du territoire.

#### Acides gras et résiniques

Les résultats de l'analyse des acides gras et des acides résiniques sont présentés respectivement aux figures 16 et 17. Le premier constat qui en ressort est que l'agglomération de Saint-Jean-sur-Richelieu et Iberville est une source d'acides gras et résiniques pour la rivière Richelieu. Pour les trois acides résiniques et cinq des six acides gras, les teneurs en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu sont, selon les acides, 2,2 à 8,8 fois plus élevées qu'en amont. Ces hausses sont statistiquement significatives ou près du seuil de signification. En aval d'Iberville, les concentrations d'acides gras sont semblables à celles de l'autre côté de la rivière, mais on n'y détecte qu'un seul des trois acides résiniques : l'acide déhydroabiétique.

En amont de Chambly, les teneurs sont en général revenues aux valeurs mesurées en amont de Saint-Jean.

À Chambly, on observe une hausse des concentrations de certains acides gras. Les teneurs en acide linoléique, notamment, sont trois fois plus élevées qu'en amont, et il y a augmentation d'un facteur 2,2 des concentrations d'acide palmitoléique.

À McMasterville, les teneurs en amont sont revenues au bruit de fond observé en amont de Saint-Jean et Chambly, sauf pour l'acide linoléique, qui affiche son maximum en aval de Chambly, à seulement 5,5 km en amont. Les teneurs en aval de McMasterville restent identiques à celles de l'amont, sauf pour l'acide déhydroabiétique. Les teneurs 6,2 fois plus élevées pour cette substance indiquent qu'il y a des rejets entre les stations situées de part et d'autre des installations d'ICI Canada.

Les trois tributaires à l'étude ne peuvent être considérés comme des sources d'acides gras ou résiniques pour le Richelieu. En effet, les teneurs de ces acides dans les cellules à dialyse placées à leur embouchure sont semblables à celles du Richelieu en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu.

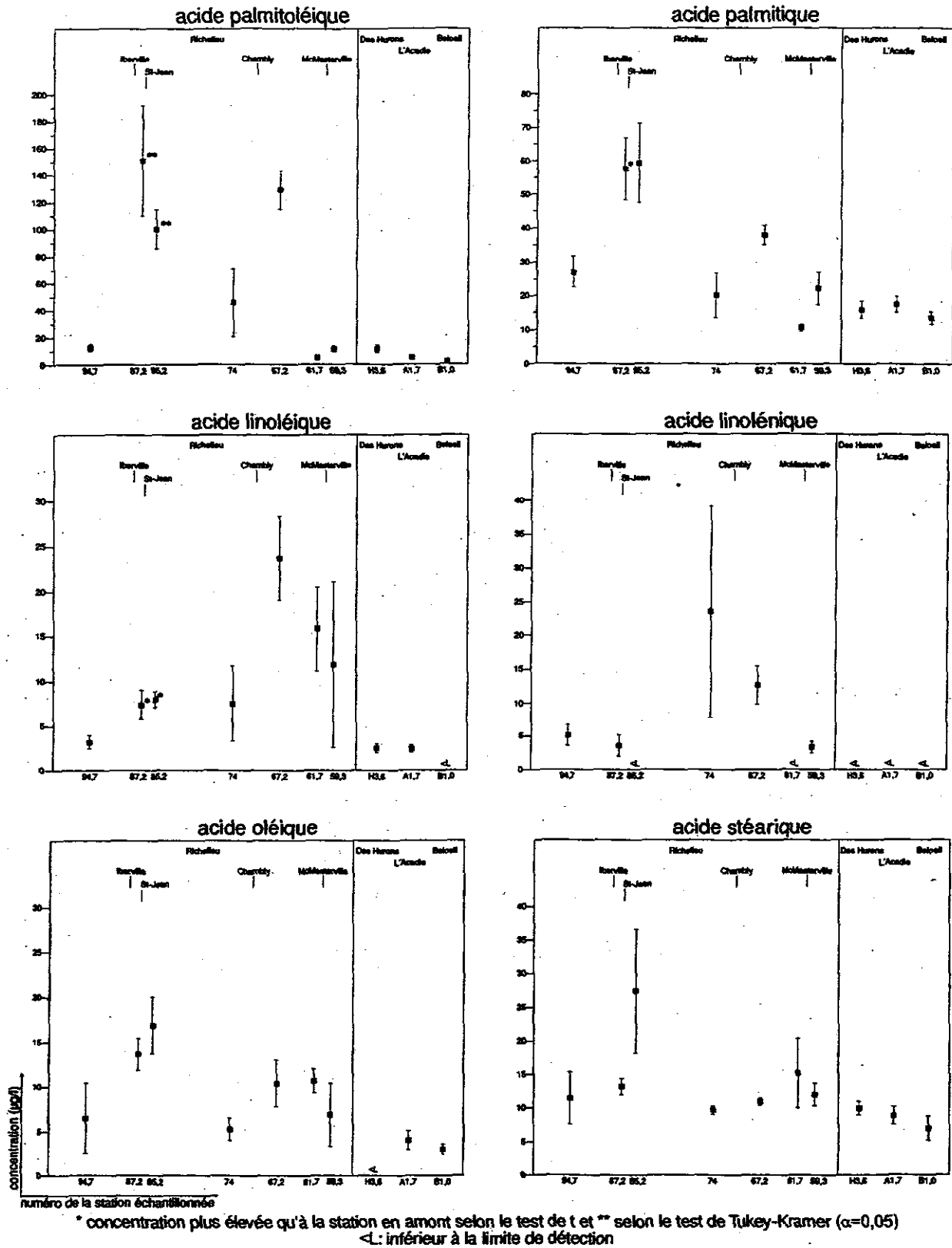
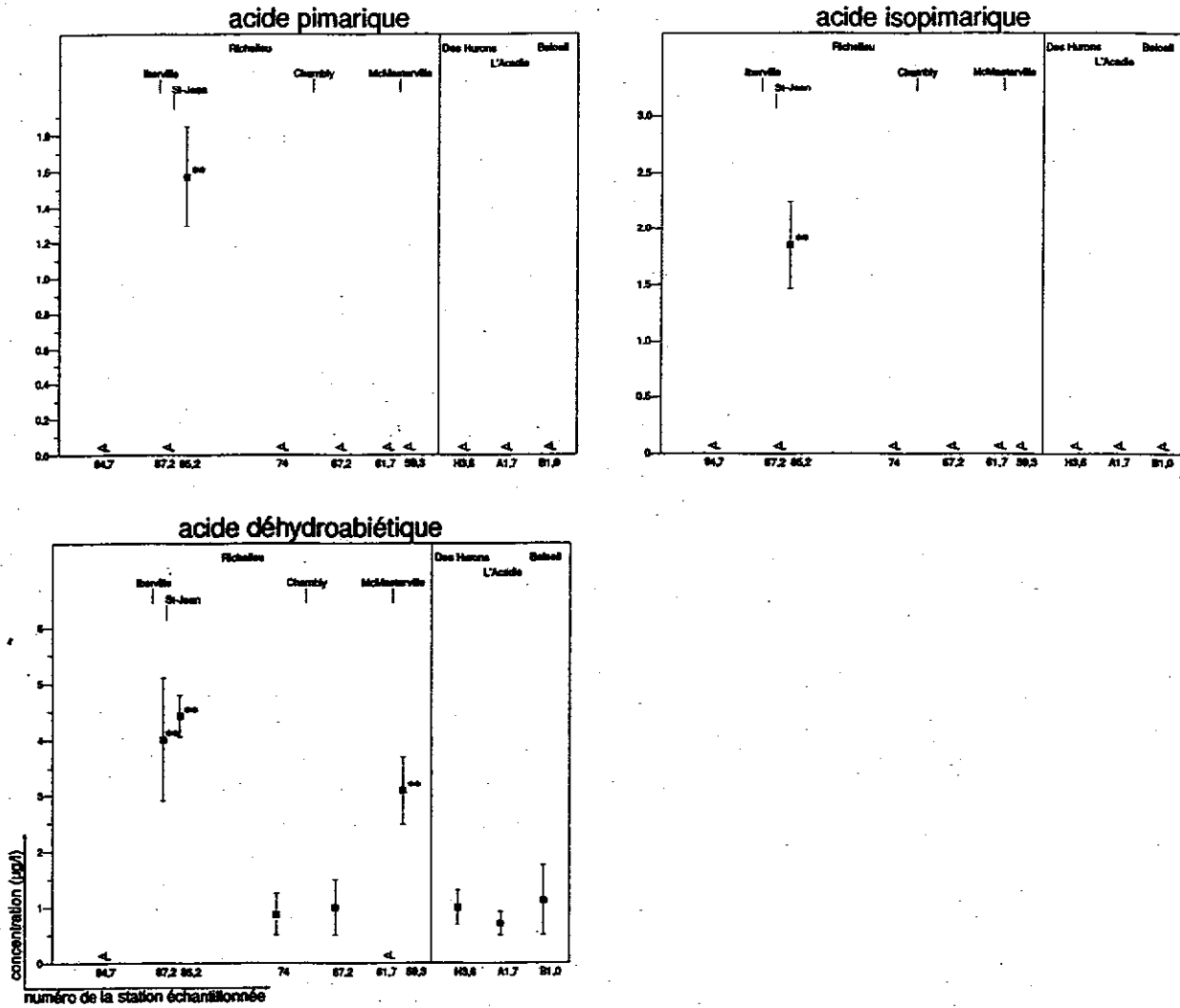


Figure 16 Moyennes et erreurs types des concentrations d'acides gras dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



\* concentration plus élevée qu'à la station en amont selon le test de t et \*\* selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )  
 <L: inférieur à la limite de détection

Figure 17 Moyennes et erreurs types des concentrations d'acides résiniques dans les cellules à dialyse placées dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires



## SYNTHÈSE GÉNÉRALE ET CONCLUSION

L'objectif de la présente étude était de dresser un portrait de la contamination des eaux du bassin versant de la rivière Richelieu par un certain nombre de substances toxiques et, plus particulièrement, de vérifier l'importance de certains sites (Iberville, Saint-Jean-sur-Richelieu, Chambly et McMasterville) et de certains tributaires (rivières des Hurons et l'Acadie et ruisseau Beloeil) comme sources de ces substances. Le tableau 3 énumère, pour chacun de ces sites, les substances pour lesquelles on observe des hausses de concentration. Le facteur d'augmentation, à la quatrième colonne, quantifie l'amplitude de l'augmentation des concentrations de l'amont à l'aval du site considéré. Par exemple, la dixième ligne du tableau indique que les teneurs du congénère de BPC n° 110 sont 2,1 fois plus élevées en aval qu'en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu. De façon plus synthétique, la figure 18 donne le nombre de substances qui présentent des hausses de concentration à chacun des sites à l'étude.

### Saint-Jean-sur-Richelieu et Iberville

Le tableau 3 et la figure 18 démontrent que Saint-Jean-sur-Richelieu est de loin le site le plus préoccupant quant à la contamination par les toxiques. Au total, 43 substances différentes présentent des concentrations plus élevées en aval qu'en amont de cette ville, alors que dans les autres sites on en compte un maximum de 25. Pour plusieurs substances, c'est également à Saint-Jean-sur-Richelieu que l'on mesure les teneurs maximales du bassin.

On constate à Saint-Jean-sur-Richelieu une hausse des concentrations de cuivre, plomb, plusieurs BPC, une dioxine et un furanne, des acides gras, des acides résiniques, des HAP, deux phtalates et divers autres composés organiques semi-volatils. Les hausses de concentration sont de l'ordre de 50 % à 60 % pour le cuivre, le plomb et les BPC totaux. Pour certains congénères de BPC, les teneurs en aval de la ville sont deux fois plus élevées qu'en amont. L'augmentation est encore plus forte dans le cas des HAP et de plusieurs autres composés organiques semi-volatils, avec des teneurs 20 fois plus élevées en aval qu'en amont de la ville dans certains cas.

Le portrait qui se dégage à Iberville a des analogies avec celui de Saint-Jean, située en face sur l'autre rive, mais la situation y est moins accablante. En effet, toutes les substances rejetées à Iberville le sont

également à Saint-Jean, mais la moitié de substances y sont rejetées; les teneurs y sont en général moins élevées et il n'y a pas vraiment de rejets de BPC. C'est d'ailleurs au chapitre des BPC que se situe l'une des principales différences entre les deux villes. À Saint-Jean, des hausses pour neuf congénères résultent en une augmentation de 56 % des BPC totaux. À Iberville, la situation est beaucoup moins claire : il y a hausse de certains congénères, compensée par une baisse pour d'autres, pour aboutir à des teneurs totales égales à l'amont.

Quant aux HAP, phtalates et autres composés organiques semi-volatils, on détecte à Saint-Jean-sur-Richelieu des apports de 22 substances différentes, dont 8 affichent des teneurs en aval au moins dix fois plus élevées qu'en amont. À Iberville, 15 de ces 22 substances affichent des hausses, mais aucune de ces dernières n'atteint un facteur dix.

L'origine exacte de la pollution à Saint-Jean-sur-Richelieu est difficile à déterminer, car les sources potentielles sont nombreuses. En effet, cette municipalité compte 12 entreprises rejetant des eaux de procédés dans les secteurs industriels suivants : chimie, textile, produits minéraux non métalliques, métallurgie et transformation métallique. À Iberville, il y a quatre entreprises dans les domaines de la transformation métallique et du textile. Les rejets de ces entreprises subissent un certain traitement avant d'être acheminés au réseau d'égout, puis à la station d'épuration municipale. En 1995, au moment de l'échantillonnage réalisé pour cette étude, la station d'épuration municipale n'était pas encore en service. Les toxiques rejetés, auxquels s'ajoutaient la pollution domestique non traitée, avaient des impacts importants sur la faune aquatique du Richelieu (Piché, 1998 ; Saint-Jacques, 1998). L'ensemble des eaux usées de Saint-Jean-sur-Richelieu et d'Iberville sont maintenant traitées avant d'être rejetées dans le cours d'eau, mais les systèmes de traitement municipaux ne sont pas vraiment conçus pour l'élimination des toxiques. Il est donc possible que plusieurs des substances listées au tableau 3 soient encore rejetées dans le Richelieu.

### Chambly

Sous l'effet de la sédimentation, de la volatilisation et de divers processus de dégradation ou de séquestration naturelles, une majorité des substances rejetées dans l'agglomération de Saint-Jean sont revenues, en amont de Chambly, aux teneurs observées en amont de Saint-Jean. Chambly constitue cependant une nouvelle

Tableau 3 Liste des substances rejetées à chacun des sites à l'étude

Site	Classe de substances	Substance	Facteur d'augmentation des concentrations
Saint-Jean-sur-Richelieu	Métaux	Cuivre	1,6
		Plomb	1,5
	BPC	n° 52 <sup>1</sup>	1,9
		n° 49 <sup>1</sup>	1,6
		n° 44 <sup>1</sup>	1,5
		n° 74	1,7
		n° 70 <sup>1</sup>	1,8
		n° 95	1,9
		n° 87 <sup>2</sup>	1,9
		n° 110 <sup>2</sup>	2,1
		n° 105	2,6
		Dioxines et furannes	1,2,3,4,6,7,8-H7CDD
	2,3,7,8-H4CDF		4,0
	HAP	Naphtalène <sup>2</sup>	2,5
		1-méthylnaphtalène <sup>1</sup>	4,1
		2-méthylnaphtalène <sup>1</sup>	3,8
		Fluorène <sup>1</sup>	10
		Acénaphène <sup>1</sup>	4,4
		Anthracène <sup>1</sup>	21
		Fluoranthène <sup>1</sup>	6,0
		Pyrène <sup>1</sup>	7,1
		Phénanthrène <sup>1</sup>	23
		Chrysène <sup>1</sup>	3,1
		Benzo(a)anthracène	2,1
	Phtalates	Diéthylphtalate <sup>1</sup>	5,3
		Butylbenzylphtalate <sup>1</sup>	16
	Autres C.O.S.V.	1,2-dichlorobenzène <sup>1</sup>	66
		1,4-dichlorobenzène <sup>1</sup>	7,4
		1,2,4-trichlorobenzène <sup>1</sup>	11
		4-méthylphénol <sup>1</sup>	14,0
		Dibenzofuranne <sup>1</sup>	14
		2-méthylthiobenzothiozole	2,5
		Oxybenzone <sup>1</sup>	26
Benzophénone <sup>1</sup>		12	
Carbazole <sup>1</sup>		2,1	
Acides gras et résiniques		Acide palmitoléique <sup>1</sup>	7,8
	Acide palmitique <sup>1</sup>	2,2	
	Acide linoléique	2,5	
	Acide oléique	2,6	

Tableau 3 (suite) Liste des substances rejetées à chacun des sites à l'étude

Site	Classe de substances	Substance	Facteur d'augmentation des concentrations	
Saint-Jean-sur-Richelieu (suite)	Acides gras et résiniques (suite)	Acide stéarique <sup>2</sup>	2,4	
		Acide pimarique <sup>1</sup>	3,2	
		Acide isopimarique <sup>1</sup>	3,8	
		Acide déhydroabiétique <sup>1</sup>	8,8	
Iberville	Métaux	Cuivre	1,9	
		BPC	n° 110	2,3
	Dioxines et furannes	1,2,3,4,6,7,8-H7CDD	1,9	
		HAP	Naphtalène <sup>2</sup>	1,8
	1-méthylnaphtalène		1,9	
	Fluorène <sup>1</sup>		3,1	
	Anthracène <sup>1</sup>		4,4	
	Fluoranthène <sup>1</sup>		2,9	
	Pyrène <sup>1</sup>		4,3	
	Phénanthrène <sup>1</sup>		5,7	
	Chrysène <sup>1</sup>		3,6	
	Phtalates		Diéthylphtalate <sup>1</sup>	4,8
			Butylbenzylphtalate <sup>1</sup>	9,3
	Autres C.O.S.V.	1,2-dichlorobenzène	6,4	
		1,4-dichlorobenzène	4,6	
		4-méthylphénol <sup>1</sup>	22	
		Oxybenzone	8,2	
		Benzophénone	3,2	
		Acides gras et résiniques	Acide palmitoléique <sup>1</sup>	12
	Acide palmitique		2,1	
	Acide linoléique		2,1	
	Acide oléique		2,1	
Acide déhydroabiétique <sup>1</sup>	8,0			
Chambly	Métaux	Aluminium	1,5	
		Magnésium <sup>1</sup>	1,4	
		Zinc	2,1	
	Dioxines et furannes	OCDD	5,4	
		HAP	Naphtalène	2,8
	2-méthylnaphtalène <sup>2</sup>		2,0	
	Acénaphylène <sup>2</sup>		3,3	
	Fluorène <sup>1</sup>		4,0	
	Acénaphène <sup>1</sup>		7,7	
	Anthracène <sup>1</sup>	15		

Tableau 3 (suite) Liste des substances rejetées à chacun des sites à l'étude

Site	Classe de substances	Substance	Facteur d'augmentation des concentrations	
Chambly (suite)	HAP (suite)	Fluoranthène <sup>1</sup>	3,8	
		Phénanthrène <sup>1</sup>	4,0	
		Pyrène <sup>1</sup>	4,3	
		Chrysène <sup>1</sup>	4,9	
		Benzo(a)anthracène	3,0	
	Autres C.O.S.V.	Dibenzofuranne <sup>1</sup>	3,8	
		Métolachlor <sup>2</sup>	1,1	
	Acides gras et résiniques	Acide palmitoléique <sup>2</sup>	2,2	
		Acide linoléique	3,2	
	McMasterville	BPC	n° 31+28	1,5
n° 52 <sup>2</sup>			1,2	
n° 49			1,3	
n° 44			1,3	
HAP		Naphtalène	2,3	
		1-méthylnaphtalène	2,6	
		2-méthylnaphtalène	3,3	
Phtalates		Di-n-butylphtalate	2,2	
		Butylbenzylphtalate	3,2	
Autres C.O.S.V.		Hexachlorobenzène	2,5	
		2-nitrotoluène <sup>1</sup>	72	
		3-nitrotoluène <sup>1</sup>	2,3	
		4-nitrotoluène <sup>1</sup>	9,7	
		2,4-dinitrotoluène <sup>1</sup>	3,5	
		2,6-dinitrotoluène <sup>2</sup>	1,3	
Acides gras et résiniques		Acide d'éhydroabiétique <sup>1</sup>	6,2	
Rivière des Hurons <sup>3</sup>		Métaux	Baryum <sup>1</sup>	1,6
			Magnésium <sup>1</sup>	1,5
			Vanadium <sup>1</sup>	1,7
		HAP	Fluorène	3,3
	Phénanthrène		4,4	
	Phtalates	Diéthylphtalate	1,9	
	Autres C.O.S.V.	1,4-dichlorobenzène <sup>2</sup>	1,5	
		Dibenzofuranne	1,6	
		Oxybenzone	13	
		Benzophénone	3,4	
		Atrazine <sup>1</sup>	7,0	
		Métolachlor <sup>1</sup>	62	

Tableau 3 (suite) Liste des substances rejetées à chacun des sites à l'étude

Site	Classe de substances	Substance	Facteur d'augmentation des concentrations	
Rivière L'Acadie <sup>3</sup>	Métaux	Cuivre	1,6	
		Magnésium	1,2	
		Vanadium	1,5	
	HAP	Naphtalène	2,3	
		1-méthylnaphtalène	2,7	
		2-méthylnaphtalène	2,3	
		Acénaphtylène	7,7	
		Fluorène <sup>1</sup>	3,5	
		Anthracène	3,6	
		Fluoranthène <sup>1</sup>	3,4	
		Pyrène <sup>1</sup>	2,5	
		Phénanthrène <sup>1</sup>	5,2	
		Phtalates	Diéthylphtalate	2,0
			Autres C.O.S.V.	1,2-dichlorobenzène <sup>1</sup>
		1,3-dichlorobenzène		21
		1,4-dichlorobenzène		4,0
	1,2,4-trichlorobenzène	14		
	Dibenzofuranne	1,3		
	Benzophénone <sup>1</sup>	2,3		
	Atrazine <sup>1</sup>	5,0		
Métolachlor <sup>1</sup>	145			
Ruisseau Beloeil <sup>3</sup>	Métaux	Cuivre	2,0	
		Vanadium <sup>1</sup>	1,7	
	BPC	n° 52	1,4	
		n° 49	1,4	
		n° 44	1,4	
		n° 70	1,8	
		n° 95 <sup>2</sup>	1,7	
		n° 87 <sup>2</sup>	2,3	
		n° 149 <sup>2</sup>	2,1	
		n° 170	3,4	
		n° 138+158 <sup>2</sup>	3,8	
		n° 82 <sup>2</sup>	2,5	
	HAP	Fluorène <sup>1</sup>	8,6	
		Acénaphène <sup>1</sup>	2,6	
		Fluoranthène	1,4	
		Pyrène <sup>1</sup>	1,8	
		Phénanthrène <sup>1</sup>	9,3	
	Phtalates	Diéthylphtalate	1,7	

Tableau 3 (suite) Liste des substances rejetées à chacun des sites à l'étude

Site	Classe de substances	Substance	Facteur d'augmentation des concentrations
Ruisseau Beloeil <sup>3</sup> (suite)	Autres C.O.S.V.	1,3-dichlorobenzène	11
		1,4-dichlorobenzène <sup>2</sup>	1,9
		1,2,4-trichlorobenzène	8,0
		Dibenzofuranne <sup>1</sup>	3,5
		Oxybenzone	12
		Benzophénone <sup>1</sup>	24
		Carbazole <sup>1</sup>	6,2

Les substances listées dans ce tableau sont celles qui présentent une hausse significative de concentration de l'amont à l'aval du site à l'étude, c.-à-d. une valeur de P associée au test de t de comparaison deux à deux des moyennes < 0,05, sauf <sup>2</sup> : < 0,1. Dans les cas indiqués par <sup>1</sup>, la différence est aussi significative selon le test de Tukey - Kramer (P < 0,05).

<sup>3</sup> La concentration dans ces tributaires, à leur embouchure, est comparée à celle du Richelieu en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu.

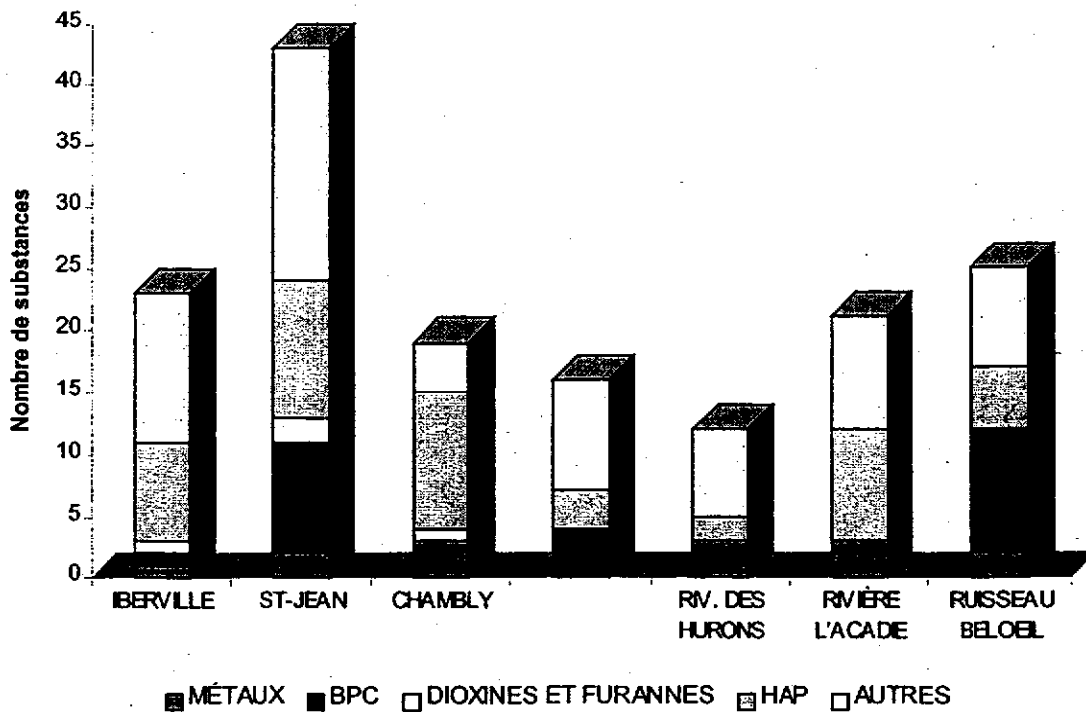


Figure 18 Nombre de substances toxiques détectées dans les mousses aquatiques et les cellules à dialyse placées à chacun des sites à l'étude

source pour 19 substances, dont 11 HAP (tableau 3 et figure 18). Ces derniers se trouvent en aval du bassin de Chambly dans des concentrations qui sont généralement deux à cinq fois plus élevées qu'en amont. Chambly se caractérise également par des rejets d'octachlorodioxine, une dioxine à huit atomes de chlore, qui présente à cet endroit le maximum rencontré sur tous les cours d'eau du Québec où les dioxines ont été mesurées dans des mousses aquatiques. Néanmoins, ce composé étant le moins toxique des dioxines, les teneurs en équivalents toxiques de 2,3,7,8-T4CDD demeurent à un niveau normal.

Outre ces substances, on trouve en aval du bassin de Chambly des teneurs plus élevées pour trois métaux, un pesticide, deux acides gras et un composé organique semi-volatil. Le pesticide (métolachlor) provient probablement de la rivière des Hurons. Les acides gras peuvent être associés aux rejets domestiques. Le magnésium est sans doute d'origine naturelle, car on en trouve aussi des teneurs plus élevées dans les rivières des Hurons et l'Acadie. L'origine des autres substances présentant des hausses de concentration en aval de Chambly est présentement inconnue. En plus du ruissellement urbain, les sources potentielles comprennent une fabrique de carton, de fibres à base de cuir et de plastique moulé, ainsi qu'une usine de produits chimiques et pharmaceutiques.

### McMasterville

Les stations de mesure à McMasterville étaient situées en amont et en aval des installations d'ICI Canada inc., division Explosifs. On y a détecté un apport pour 16 substances (tableau 3 et figure 18), dont 6 – l'hexachlorobenzène et cinq formes de toluène – ont été détectées qu'à cet endroit. La présence des toluènes est associée à la fabrication d'explosifs, le trinitrotoluène étant le TNT bien connu. ICI Canada a produit du TNT à son usine de McMasterville jusqu'à 1996, et des toluènes ont été détectés dans son effluent en 1995.

Cet endroit est aussi une source d'organochlorés; on y détecte un apport de BPC et des traces d'hexachlorobenzène. L'apport en BPC est cependant moins évident qu'à Saint-Jean-sur-Richelieu, la hausse de concentration étant de 26 % comparativement à 56 %. Cette hausse est tout de même visible pour plusieurs congénères et atteint le seuil de signification statistique pour certains BPC à trois ou quatre atomes de chlore.

Pour ce qui est des HAP, McMasterville n'est pas une source aussi importante que Saint-Jean-sur-Richelieu, Iberville et Chambly. On y a tout de même détecté un apport de trois formes de naphthalènes, qui n'atteignent pas cependant les teneurs mesurées en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu. Les autres substances qui présentent des hausses sont deux phtalates et un acide résinique.

### Rivière des Hurons

La rivière des Hurons se jette dans le Richelieu, sur sa rive droite, à la hauteur du bassin de Chambly. Les concentrations mesurées dans cette rivière, près de son embouchure, ont été comparées à celles du Richelieu en amont de Saint-Jean, pour vérifier si le tributaire constitue une source de toxiques pour le cours d'eau principal. C'est le cas pour une liste de 12 substances (figure 18 et tableau 3).

Trois de ces substances – le baryum, le magnésium et le vanadium – sont des métaux. Leur origine est peut-être naturelle. En effet, des teneurs plus élevées en magnésium et en vanadium ont déjà été trouvées dans les mousses aquatiques placées dans les cours d'eau traversant des régions d'agriculture intensive, sujettes à une forte érosion des sols (Berryman et Nadeau, à paraître).

Outre ces métaux, la rivière des Hurons est la source de neuf composés organiques. Pour ces substances, les teneurs mesurées à l'embouchure du cours d'eau sont plus élevées qu'à la station témoin en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu, mais, sauf pour l'atrazine et le métolachlor, elles ne sont pas très élevées en comparaison des autres sites du bassin. L'atrazine et le métolachlor sont des pesticides utilisés couramment dans la culture du maïs. Cette culture occupe une place très importante dans le bassin de la rivière des Hurons. L'origine exacte des autres substances – deux HAP, un phtalate et quatre autres composés organiques semi-volatils – est inconnue. Outre le secteur agro-alimentaire, les seules entreprises industrielles du sous-bassin sont des usines du secteur de la métallurgie situées à Marieville.

### Rivière l'Acadie

La rivière l'Acadie draine les eaux d'un vaste territoire nettement dominé par l'agriculture et l'industrie agro-alimentaire. Des onze entreprises ayant des eaux de procédé dans ce sous-bassin, une seule n'est pas de ce

secteur industriel. Il s'agit d'une usine de produits chimiques située à Napierville.

Avec 21 substances qui se trouvent en concentration plus élevée à son embouchure que dans le Richelieu en amont de Saint-Jean, la rivière l'Acadie s'avère une source non négligeable de substances toxiques (tableau 3 et figure 18). Comme dans la rivière des Hurons, on y trouve les pesticides atrazine et métolachlor, mais la rivière l'Acadie est une source beaucoup plus importante de HAP et autres composés organiques semi-volatils. Les teneurs pour 16 de ces substances y sont 2 à 35 fois plus élevées qu'en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu. Pour les trois formes de naphthalène, l'acénaphthylène et deux chlorobenzènes, les teneurs mesurées dans la rivière l'Acadie sont parmi les deux plus élevées du bassin.

#### Ruisseau Beloeil

Le ruisseau Beloeil est une importante source de toxiques pour le Richelieu. Au total, 25 substances toxiques y ont des teneurs supérieures à celles mesurées en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu (tableau 3 et figure 18). L'importance de cette source tient aussi à la nature des toxiques détectés, dont dix sont des BPC. Les teneurs en BPC totaux dans le ruisseau Beloeil sont 70 % plus élevées que dans le Richelieu, en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu, et sont du même ordre qu'en aval de cette municipalité. L'origine de ces BPC est inconnue. Outre les industries agro-alimentaires, la seule entreprise industrielle en amont dans le ruisseau Beloeil et dans son tributaire – le Grand ruisseau – est une usine de placage de métaux située à Saint-Mathieu-de-Beloeil.

Le ruisseau Beloeil est également la source de 13 composés organiques semi-volatils. Trois de ces substances (le dibenzofuranne, le benzophénone et le carbazole) présentent à cet endroit les teneurs maximales du bassin. Trois autres, des HAP (le fluorène, l'acénaphthène et le phénanthrène), y présentent la deuxième ou troisième moyenne plus élevée.

#### Comparaison avec d'autres cours d'eau

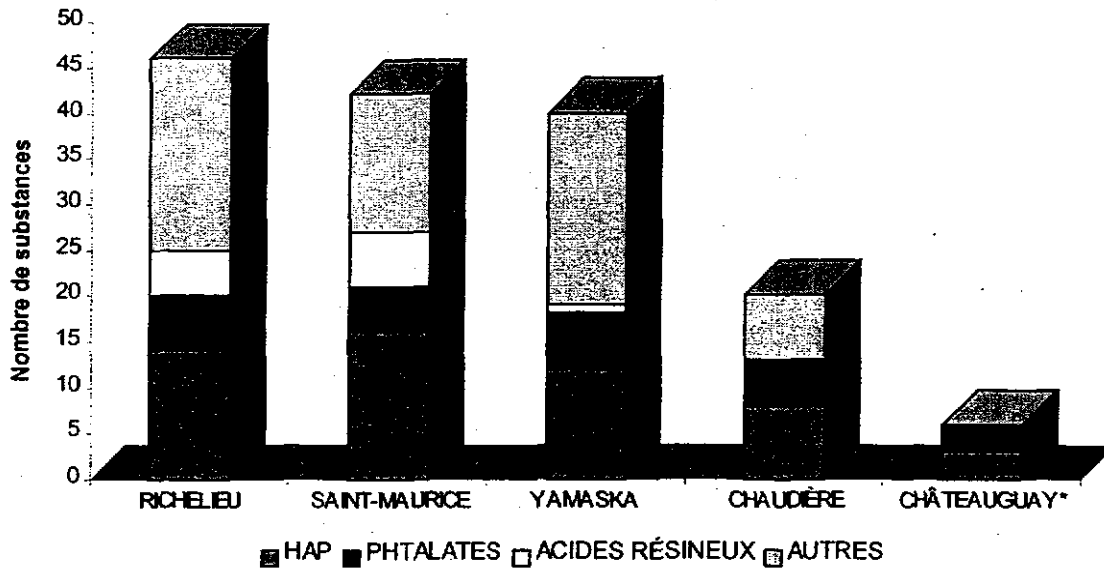
La technique des mousses aquatiques et des cellules à dialyse a jusqu'à maintenant été utilisée sur sept cours d'eau majeurs du Québec méridional, ainsi que sur quelques rivières secondaires. En général, ce n'est pas dans le bassin du Richelieu que l'on a trouvé les concentrations records pour les substances toxiques

que l'on peut détecter à l'aide de cette technique. Les teneurs en métaux, BPC, dioxines et furannes, notamment, y sont la plupart du temps égales ou inférieures à ce qui est mesuré en maints endroits. Néanmoins, la situation du Richelieu en ce qui a trait aux toxiques est très préoccupante. Cette préoccupation tient au nombre élevé de substances détectées – plutôt qu'aux concentrations mesurées –, au nombre et à la proximité des sources de ces substances ainsi qu'à l'importance du Richelieu pour la survie d'une espèce de poisson menacée d'extinction : le chevalier cuirvé

Pour ce qui est du nombre de substances toxiques, il faut signaler que l'on en a détecté 46 différentes dans les cellules à dialyse placées dans le Richelieu. Ce nombre élevé place le Richelieu au même niveau que le Saint-Maurice et la Yamaska. Beaucoup moins de substances ont été détectées dans les rivières Chaudière et Châteauguay (figure 19). Dans le Richelieu, ce nombre élevé se conjugue au un nombre relativement grand d'endroits où de telles substances sont rejetées. Il y a d'abord Saint-Jean-sur-Richelieu, qui est une source majeure, mais la Yamaska et le Saint-Maurice ont aussi un « point chaud ». Le Richelieu se caractérise par l'importance de ses sites secondaires, qui rejettent chacun de 19 à 25 toxiques différents : Iberville, Chambly, la rivière l'Acadie et le ruisseau Beloeil. Dans la Yamaska, il n'y a que le deuxième site le plus contaminé qui affiche un tel nombre de substances; les autres en totalisent entre 3 et 11. De plus, toutes les sources révélées par cette étude se déversent dans un tronçon de rivière relativement court (moins de 40 km), alors que dans la Yamaska et le Saint-Maurice elles sont plus distancées.

Une autre considération très importante est le fait que le Richelieu constitue pratiquement le dernier refuge du chevalier cuirvé. Autrefois plus largement répandue dans le Québec méridional, cette espèce n'a plus que deux frayères connues, toutes deux situées dans le Richelieu. Or, même dans ces deux frayères, le chevalier cuirvé éprouve des difficultés à se reproduire, ce qui fait qu'il est maintenant menacé d'extinction. Une étude réalisée pour le ministère de l'Environnement et de la Faune (Gendron et Branchaud, 1997) démontre que l'hypothèse la plus plausible pour expliquer les difficultés de reproduction de ce poisson est une interférence par des substances toxiques lors de l'étape finale du cycle reproducteur. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas d'identifier avec certitude la ou les substances toxiques en cause. Il faut donc considérer les toxiques





\* la catégorie des autres substances n'a pas été mesurée dans la rivière Châteauguay

Figure 19 Nombre de substances toxiques détectées dans les cellules à dialyse placées dans cinq cours d'eau du Québec

présents dans le Richelieu —ceux révélés par cette étude et ceux qui ne sont pas détectés par les méthodes employées— comme une menace à la survie d'une espèce de poisson unique au monde.

#### Suites à donner

Ce constat mène à la conclusion qu'il faut maintenant accorder une plus grande attention aux substances toxiques pour l'assainissement des eaux du Richelieu. Cette attention devrait se porter plus particulièrement :

- sur Saint-Jean-sur-Richelieu, à cause de l'importante liste de substances toxiques qui y sont rejetés, notamment des BPC qui sont des organochlorés persistants. Il ne faut pas présumer que les rejets de toxiques ont été arrêtés par les récentes installations municipales d'assainissement des eaux. De tels ouvrages peuvent retenir certains toxiques mais, n'étant pas conçus à cette fin, leur efficacité à cet égard est limitée;
- sur Chambly, où l'apport détecté en HAP et en octachlorodioxine devrait faire l'objet d'une investigation;

- sur la rivière l'Acadie, pour son étonnante liste de composés organiques semi-volatils, dont plusieurs HAP. Il serait utile de vérifier les teneurs plus haut sur la rivière l'Acadie, car elles pourraient être très élevées si la source de ces substances est l'usine de produits chimiques sise à Napierville;
- sur McMasterville, où l'apport de BPC et d'hexachlorobenzène devrait faire l'objet d'une investigation;
- sur le ruisseau Beloeil, qui affiche la deuxième plus longue liste de substances après Saint-Jean-sur-Richelieu, qui semble être une source de BPC et où certains composés organiques semi-volatils présentent les teneurs maximales du bassin.

À cette liste doivent s'ajouter les pesticides et autres substances mentionnés par Gendron et Branchaud (1997) comme étant possiblement à l'origine des dysfonctions reproductives du chevalier cuirvé.

Arriver à un tel constat en 1997, à l'aube du troisième millénaire, peut paraître étonnant. Il faut toutefois rappeler que ce portrait de la contamination du Richelieu par les toxiques a été rendu possible par l'emploi de techniques d'échantillonnage et d'analyse

en laboratoire qui permettent de détecter les substances en très faibles concentrations. Sans ces techniques – qui n'étaient pas encore disponibles il y a quelques années – un grand nombre des toxiques détectés dans cette étude seraient passés inaperçus. Finalement, il est à noter que les BPC rejetés à Saint-Jean-sur-Richelieu, McMasterville et par le ruisseau Beloeil, l'octachlorodioxine rejetée à Chambly et l'hexachlorobenzène trouvé à McMasterville sont des organochlorés persistants qui font partie de la Liste des substances prioritaires dont la Loi canadienne sur la protection de l'environnement vise l'élimination virtuelle.

#### REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier plusieurs membres du personnel du ministère de l'Environnement et de la Faune qui ont contribué à la réalisation de cette étude : Paul Harrison et Denis Robichaud pour l'échantillonnage, Charles Brochu, Christian DeBlois, Andrée Gendron, Marc Gignac, Guy Hamelin, Gilles Labbé, Annie Laverdière, Hélène Lemaire, Serge Moore, Nicole Nadeau, Serge Noël, Luci Tremblay, Paule Tremblay et Louise Vromet pour les analyses chimiques; Francine Matte-Savard pour le graphisme. Nos remerciements vont également à Micheline Lampron pour la révision linguistique et à Nathalie Beaulieu et Nathalie Milhomme pour la dactylographie et la mise en forme du rapport.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AULIO, K., 1985. Metal Accumulation Capacity of Five Species of Sphagnum Moss, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 35 : 439-442.
- BERRYMAN, D., 1991. *Mise à l'essai et comparaison de cinq traceurs de substances toxiques sur le Saint-Maurice*, ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, envirodoq 910345, collection QEN/QE 72/1, 74 p.
- BERRYMAN, D., 1993. *Mise à l'essai et comparaison de cinq traceurs de substances toxiques dans la rivière l'Assomption*, ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, envirodoq EN920513, collection QEN/QE-79/1, 84 p. + 4 annexes.
- BERRYMAN, D., 1996a. *Le bassin versant de la rivière Saint-François : contamination de l'eau par les métaux et certaines substances toxiques organiques*, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, envirodoq n° EN960252, rapport n° EA-1, 44 p. + 4 annexes.
- BERRYMAN, D., 1996b. *Le bassin versant de la rivière Châteauguay : contamination de l'eau par les métaux et certaines substances toxiques organiques*, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, envirodoq n° EN960453, rapport n° EA-6, 34 p. + 4 annexes.
- BERRYMAN, D. et A. NADEAU, 1998. « Le bassin de la rivière Chaudière : contamination de l'eau par les métaux et certaines substances toxiques organiques », dans *Le bassin de la rivière Chaudière : l'état de l'écosystème aquatique — 1996*, ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq n° EN980022, section 3.
- BIRKHOFF, D.A., R. ROGERS, J.S. GOUDEY et J. SEVIGNY, 1996. *Incorporation of Toxicity Tests and SPMDs in the Design of Environmental Impact Assessments*, compte rendu du 23<sup>e</sup> Atelier de Toxicologie Aquatique.
- BURTON, M. A., 1990. Terrestrial and Aquatic Bryophytes as Monitors of Environmental Contaminants in Urban and Industrial Habitats, *Botanical Journal of the Linnean Society* 104 : 267-280.
- CCMRE, 1987. *Recommandations pour la qualité des eaux du Canada*, Conseil canadien des ministères des Ressources et de l'Environnement.
- CONOVER, W. J., 1980. *Practical Non-parametric Statistics*, 2nd edition, Wiley, New York, 462 p.
- CRECELIUS, E.A., G.A. RAUSINA, W.R. BIGGS et W.R. GALA, 1996. Using Semipermeable Membrane Devices (SPMDs) to Estimate Bioconcentration Potential of Petroleum Additives, dans : *Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996*, Washington, p. 311.
- GENDRON, A. et A. BRANCHARD, 1997. Impact potentiel de la contamination du milieu aquatique sur

la reproduction du suceur cuivré (*Moxostoma hubbsi*) : Synthèse des connaissances, ministère de l'Environnement et de la Faune, Suivie de l'aménagement et de l'exploitation de la faune 160 p.

GONCALVES, E.P.R., R.A.R. BOAVENTURA et C. MOUVET, 1992. *Science of the Total Environment* 114 : 7.

HERVE, S., R. PAUKKU, J. PAASIVIRTA, P. HEINONEN et A. SÖDERGREN, 1991. Uptake of Organochlorines from Lake Water by Hexane-Filled Dialysis Membranes and by Mussels, *Chemosphere*, vol. 22, n° 11, p. 997-1001.

HOFELT, C.S. et D. SHEA, 1996. *The Semipermeable Membrane Device : Configuration and Kinetics*, dans : Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996, Washington, p. 29.

HUCKINS, J.N., J.D. PETTY, J.C. MEADOWS, K.R. ECHOLS, R.W. GALE, J.A. LEBO, C.E. ORAZIO et D.E. TILLITT, 1996. *How Chemical Uptake by Semipermeable Membrane Device (SPMDs) Relates to Bioconcentration and Basis Comparison*, dans : Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996, Washington, p. 217.

HUCKINS, J. N., M. W. TUBERGEN et G. K. MANUWEERS, 1990. Semipermeable Membranes Devices Containing Model Lipid : A New Approach to Monitoring the Bioavailability of Lipophilic Contaminants and Estimating their Bioconcentration Potential, *Chemosphere* 20(5) : 533-552.

HUFF, T., G. FOSTER et D. KELSO, 1996. *Use of Semipermeable Membrane Devices for Estimating Bioconcentration Factors of Hydrophobic Organic Contaminants in Corbicula*, dans : Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996, Washington, p. 217.

LALONDE, GIROUARD, LETENDRE ET ASSOCIÉS, 1993. *Rejet de HAP à l'environnement au Canada*, 1990, rapport préparé pour Environnement Canada, région du Québec, Montréal.

LEFKOVITZ, L. et E. CRECELIUS, 1996. *The Use of SPMDs Consisting of Polyethylene Alone to Predict Dissolved-Phase Organics in the Columbia River*,

dans : Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996, Washington, p. 217.

MACKAY, D., E. BENNET et T. METCALFE, 1996. *A Fundamental Study and Predictive Model of the Uptake and Release of Chemicals by Semi-permeable Membrane Devices (SPMDs)*, dans : Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996, Washington, p. 30.

MAKEPEACE, D. K., D. W. SMITH et J. STANKEY, 1995. Urban Storm Water Quality : Summary of Contaminant Data, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 25(2) : 93-139.

MEF, 1997. *Le ministère de l'Environnement et de la Faune, une organisation au service de ses clientèles*, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, envirodoq n° EN970133, 37 p.

MOUVET, C., 1986. *Métaux lourds et mousses aquatiques - Synthèse méthodologique*, Rapport de l'Agence de l'eau Rhin - Meuse et de l'Agence de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse, 110 p.

MOUVET, C., 1991. *Métaux lourds et mousses aquatiques - Standardisation des aspects analytiques - 1<sup>re</sup> phase : tests préliminaires à la calibration multilaboratoires*, BRGM, Service géologique national, rapport n° R 32 744, PR 9304600317, 68 p.

PARROT, J.L., P.V. HODSON, D.E. TILLITT, D.T. BENNIE et M.E. COMBA, 1996a. *Accumulation of Fish Mixed Function Oxygenase Inducers by Semipermeable Membrane Devices in River Water and Effluents, Athabasca River, August and September, 1994*, Northern River Basins Study, Edmonton, Alberta, Canada. Project report ISSN 1192-3571; n° 127, 62 p.

PARROT, J.L., J.J. WHYTE, S.M. BACKUS et M.E. COMBA, 1996b. *Accumulation of Fish Mixed Function Oxygenase Inducers by Semipermeable Membrane Devices in River Water and Effluents, Athabasca, Peace and Wapiti Rivers, August and September, 1995*, Northern River Basins Study, Edmonton, Alberta, Canada. Project report ISSN 1192-3571; n° 83, 31 p. + annexes.

PETTY, J.D., J.N. HUCKINS, D.B. MARTIN et T.G. ADORNATO, 1995. *Use of Semipermeable Membrane Devices (SPMDs) to Determine*

Bioavailable Organochlorine Pesticide Residues in Streams Receiving Irrigation Drainwater, *Chemosphere*, vol. 30, n° 10, p. 1891-1903.

PICHÉ, I. et M. SIMONEAU, 1998. « Le bassin de la rivière Richelieu : profil géographique, sources de pollution, interventions d'assainissement et qualité des eaux », dans *Le bassin versant de la rivière Richelieu : l'état de l'écosystème aquatique — 1995*, ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq n° EN980604, rapport n° EA-13, section 1.

PICHÉ, I., 1998. « Le bassin de la rivière Richelieu : les communautés benthiques et l'intégrité biotique du milieu », dans *Le bassin versant de la rivière Richelieu : l'état de l'écosystème aquatique — 1995*, ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq n° EN980604, rapport n° EA-13, section 4.

SAINT-JACQUES, N., 1998. Le bassin de la rivière Chaudière : les communautés ichtyologiques et l'intégrité biotique du milieu, dans *Le bassin de la rivière Chaudière : l'état de l'écosystème aquatique — 1996*, ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq n° EN980022, section 5.

S.A.S. INSTITUTE, 1989. *SAS/STAT User's Guide, Version 6*, Fourth Edition, Volume 2, Cary NC, 943 p.

SATAKE, K. et M. NISHIKAWA, 1990. Accumulation of scandium in the shoots of Aquatic Bryophytes in Acid Water *Hydrobiologia* 199 : 173-177.

SAY, P.J.; J.P.C. HARDING et B.A. WHITTON, 1981. Aquatic Mosses as Monitors of Heavy Metal Contamination in the River Etherow, Great Britain, *Environmental Pollution (Series B)* 2 : 295-307.

SCHOLZ, N.J., B. MENZEL et D. THÖLMANN, 1997. Are Phtalate Esters Bioaccumulating and Persisting Chemicals?, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Abstract Book, 18th Annual Meeting, 16 - 20 November 1997, San Francisco, p. 90.

SÖDERGREN, A. 1987. Solvent-Filled Dialysis Membranes Simulate Uptake of Pollutants by Aquatic Organisms, *Environmental Science and Technology* 21(9) : 855 - 859.

SÖDERGREN, A. 1990. Monitoring of Persistent Lipophilic Pollutants in Water and Sediment by Solvent-Filled Dialysis Membranes, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 19 : 143 - 149.

SODERLUND, S., A. FORSBERG et M. PEDERSEN, 1988. Concentrations of Cadmium and Other Metals in *Fucus vesiculosus* L. and *Fontinalis dalecarlica* Br. Eur. from the Northern Baltic Sea and the Southern Bothnian Sea, *Environmental Pollution* 51 : 97-212.

SODEXEN, 1995. Rapport technique préliminaire remis à ICI Canada inc. pour la caractérisation des effluents de l'usine de McMasterville. Rapport préparé par Sodexen inc. Et déposé le 11 décembre 1995, 26 p. + 3 annexes.

WHYTE, J.J., N. KARROW, S. MAGDIC, D.G. DIXON et N.C. BOLS, 1996. *Use of SPMDs and Rainbow Trout to Examine CYP1A1 Induction in Creosote Contaminated Mesocosms*, dans : Abstract Book, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 17th Annual Meeting, 17-21 November 1996, Washington, p. 217

Annexe 1 Liste des substances toxiques analysées dans les mousses aquatiques, avec les limites de détection.

Substance	Limite de détection	Substance	Limite de détection
<b><u>Métaux</u></b>		<b><u>Congénères de BPC<sup>1</sup> (suite)</u></b>	
Aluminium	1 mg/kg	n° 177	10 à 70 pg/g
Baryum	mg/kg	n° 171	1 à 40 pg/g
Béryllium	1 mg/kg	n° 180	4 à 30 pg/g
Cadmium	0,5 mg/kg	n° 191*	1 à 20 pg/g
Cobalt	mg/kg	n° 170*	1 à 40 pg/g
Chrome	0,5 mg/kg	n° 199	1 à 7 pg/g
Cuivre	0,5 mg/kg	n° 195	1 à 6 pg/g
Fer	0,5 mg/kg	n° 194	4 à 20 pg/g
Magnésium	5 mg/kg	n° 205	1 à 50 pg/g
Manganèse	0,5 mg/kg	n° 208	1 à 10 pg/g
Mercure	0,03 mg/kg	n° 206	1 à 9 pg/g
Nickel	0,5 mg/kg	n° 209	1 à 3 pg/g
Plomb	1 mg/kg	<b><u>Dioxines chlorées<sup>1</sup></u></b>	
Vanadium	0,5 mg/kg	2,3,7,8-TCDD	0,7 à 2 pg/g
Zinc	0,5 mg/kg	1,2,3,7,8-P5CDD	0,5 à 1 pg/g
<b><u>Congénères de BPC<sup>1</sup></u></b>		1,2,3,4,7,8-H6CDD	0,6 à 1 pg/g
n° 18	8 à 30 pg/g	1,2,3,6,7,8-H6CDD	0,4 à 1 pg/g
n° 17	2 à 10 pg/g	1,2,3,7,8,9-H6CDD	0,4 à 1 pg/g
n° 31+28	1 à 50 pg/g	1,2,3,4,6,7,8-H7CDD	0,4 à 2 pg/g
n° 33*	40 à 200 pg/g	OCDD	0,2 à 2 pg/g
n° 52	10 à 50 pg/g	<b><u>Dioxines homologues<sup>1</sup></u></b>	
n° 49*	3 à 60 pg/g	T4CDD	0,7 à 2 pg/g
n° 44*	1 à 40 pg/g	P5CDD	0,5 à 1 pg/g
n° 74	20 à 60 pg/g	H6CDD	0,4 à 1 pg/g
n° 70*	10 à 30 pg/g	H7CDD	0,4 à 2 pg/g
n° 95	9 à 80 pg/g	<b><u>Furannes chlorés<sup>1</sup></u></b>	
n° 101	40 à 100 pg/g	2,3,7,8-T4CDF	0,4 à 3 pg/g
n° 99	60 à 300 pg/g	1,2,3,7,8-P5CDF	0,8 à 2 pg/g
n° 87	40 à 200 pg/g	2,3,4,7,8-P5CDF	0,7 à 2 pg/g
n° 110	8 à 70 pg/g	1,2,3,4,7,8-H6CDF	0,3 à 1 pg/g
n° 82	40 à 200 pg/g	1,2,3,6,7,8-H6CDF	0,2 à 1 pg/g
n° 118	7 à 60 pg/g	2,3,4,6,7,8-H6CDF	0,3 à 1 pg/g
n° 105	8 à 40 pg/g	1,2,3,7,8,9-H6CDF	0,3 à 1 pg/g
n° 151	30 à 200 pg/g	1,2,3,4,6,7,8-H7CDF	0,4 à 1 pg/g
n° 149	1 à 60 pg/g	1,2,3,4,7,8,9-H7CDF	0,4 à 2 pg/g
n° 153+132	2 à 9 pg/g	OCDF	0,2 à 2 pg/g
n° 138+158*	20 à 200 pg/g	<b><u>Furannes homologues<sup>1</sup></u></b>	
n° 128	1 à 30 pg/g	T4CDF	0,4 à 3 pg/g
n° 156	1 à 10 pg/g	P5CDF	0,7 à 2 pg/g
n° 169	1 à 4 pg/g	H6CDF	0,2 à 1 pg/g
n° 187*	20 à 100 pg/g	H7CDF	0,4 à 1 pg/g
n° 183	20 à 100 pg/g		

<sup>1</sup> Limite de détection variable selon les échantillons analysés

## Annexe 2

## Liste des substances toxiques analysées dans les cellules à dialyse, avec les limites de détection.

Substance	Limite de détection	Substance	Limite de détection
<b><u>Acides gras et résiniques</u></b>		<b><u>Composés organiques semi-volatils (suite)</u></b>	
Acide palmitoléique	2 µg/l	Acénaphène	0,5 µg/l
Acide palmitique	1 µg/l	Dibenzofuranne	0,05 µg/l
Acide linoléique	4 µg/l	2,4-dinitrotoluène	0,5 µg/l
Acide linoléique	4 µg/l	Diéthylphthalate	0,1 µg/l
Acide oléique	4 µg/l	Fluorène	0,05 µg/l
Acide stéarique	4 µg/l	4-chlorophénylphényl éther	0,5 µg/l
Acide pimarique	1 µg/l	2,4-dinitrophénol	15 µg/l
Acide sandaracopimarique	1 µg/l	4-nitrophénol	2 µg/l
Acide isopimarique	1 µg/l	4-nitroaniline	1,5 µg/l
Acide palustrique + lévopimarique	3 µg/l	2-méthyl-4,6-dinitrophénol	2 µg/l
Acide déhydroabiétique	1 µg/l	N-nitrosodiphénylamine	2 µg/l
Acide abiétique	2 µg/l	Azobenzène	0,3 µg/l
Acide néoabiétique	1 µg/l	4-bromophénylphényl éther	0,1 µg/l
Acide 9,10-dichlorostéarique	1 µg/l	Hexachlorobenzène	0,1 µg/l
Acide chlorodéhydroabiétique	2 µg/l	Pentachlorophénol	2 µg/l
Acide dichlorodéhydroabiétique	1 µg/l	Phénanthrène	0,1 µg/l
<b><u>Composés organiques semi-volatils</u></b>		Anthracène	0,1 µg/l
Phénol	0,1 µg/l	Di-N-butylphthalate	2 µg/l
Aniline	0,5 µg/l	Fluoranthène	0,1 µg/l
Bis(2-chloroéthyl)éther	0,2 µg/l	Pyrène	0,1 µg/l
2-chlorophénol	0,3 µg/l	Butylbenzylphthalate	2 µg/l
1,3-dichlorobenzène	0,1 µg/l	Benzo(a)anthracène	0,2 µg/l
1,4-dichlorobenzène	0,5 µg/l	Chrysène	0,3 µg/l
Benzyl alcool	0,5 µg/l	Bis(2-éthylhexyl)phthalate	1 µg/l
1,2-dichlorobenzène	0,1 µg/l	Di-N-octylphthalate	1 µg/l
2-méthylphénol	0,5 µg/l	Benzo(b)fluoranthène	0,05 µg/l
Bis(2-chloroisopropyl)éther	0,1 µg/l	Benzo(k)fluoranthène	0,05 µg/l
4-méthylphénol	0,5 µg/l	Benzo(a)pyrène	0,1 µg/l
N-nitrosodi-n-propylamine	0,1 µg/l	Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0,2 µg/l
Hexachloroéthane	1 µg/l	Dibenzo(a,h)anthracène	0,5 µg/l
Nitrobenzène	0,3 µg/l	Benzo(g,h,i)pérylène	0,3 µg/l
Isophorone	1 µg/l	2,6-dinitrotoluène	2 µg/l
2-nitrophénol	1 µg/l	Carbazole	0,5 µg/l
2,4-diméthylphénol	0,5 µg/l	o,m,p-xylène	1 µg/l
Bis(2-chloroéthoxy)méthane	0,1 µg/l	Benzothiazole	1 µg/l
2,4-dichlorophénol	1 µg/l	1-méthylinaphthalène	1 µg/l
1,2,4-trichlorobenzène	0,1 µg/l	Benzylbenzoate	1 µg/l
Naphtalène	0,05 µg/l	Oxybenzone	1 µg/l
4-chloroaniline	0,1 µg/l	Octadécanamide	1 µg/l
Hexachlorobutadiène	0,2 µg/l	Méthylstyrène	1 µg/l
4-chloro-3-méthylphénol	1 µg/l	2-carène	1 µg/l
2-méthylinaphthalène	0,05 µg/l	2-méthylthiobenzothiazole	1 µg/l
Hexachlorocyclopentadiène	0,5 µg/l	Benzophénone	1 µg/l
2,4,6-trichlorophénol	1 µg/l	2,6-di-ter-butyl p-benzophénone	1 µg/l

Annexe 2 (suite) Liste des substances toxiques analysées dans les cellules à dialyse,  
avec les limites de détection.

Substance	Limite de détection	Substance	Limite de détection
<b><i>Composés organiques semi-volatils (suite)</i></b>		<b><i>Composés organiques semi-volatils (suite)</i></b>	
2,4,5-trichlorophénol	1 µg/l	Indole	1 µg/l
2-chloronaphtalène	0,1 µg/l	2-nitrotoluène	1 µg/l
2-nitroaniline	1,5 µg/l	3-nitrotoluène	1 µg/l
Diméthylphthalate	0,1 µg/l	4-nitrotoluène	1 µg/l
Acénaphthylène	0,05 µg/l	Métolachlor	1 µg/l
3-nitroaniline	0,1 µg/l	Atrazine	1 µg/l

### **Annexe 3 Sommaire des méthodes d'analyse chimique**

#### **1. Métaux dans les mousses aquatiques**

Pour les métaux autres que le mercure (Mn, Fe, Mg, Cu, Zn, Ni, Al, V, Pb, Cr, Cd), la méthode commence par une digestion à l'acide nitrique concentré. La digestion est suivie d'une solubilisation dans un mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique. Le dosage est ensuite effectué sur un appareil au plasma. Dans le cas des tissus végétaux (mousses aquatiques), la solubilisation est effectuée dans du peroxyde d'hydrogène. Pour l'analyse du mercure, la digestion est commencée avec un mélange d'acide nitrique et d'acide sulfurique concentré, et poursuivie avec du permanganate de potassium. Le précipité est dissous dans du peroxyde d'hydrogène, puis dosé à l'aide d'un détecteur de mercure.

#### **2. BPC, dioxines et furannes dans les mousses aquatiques**

Les tissus biologiques sont d'abord lyophilisés durant 48 heures, puis extraits au soxhlet au toluène. L'extrait est ensuite purifié sur une colonne multicouches et une colonne d'alumine. L'extrait résultant est concentré à l'aide d'un évaporateur rotatif et sous un jet d'azote, jusqu'à ce qu'il soit sec. Il est alors dissous avec une solution étalon pour injection, puis injecté dans un système de chromatographie en phase gazeuse, où les différents composés sont séparés. Ceux-ci pénètrent ensuite dans le spectromètre de masse haute résolution (GC-MS), où ils sont dosés.

Les 41 congénères spécifiques de BPC sont rapportés individuellement, et le paramètre «BPC totaux» est rapporté grâce à la somme des BPC spécifiques et des autres BPC calculée à l'aide d'un facteur de réponse moyen. Le dosage en GC-MS permet de rapporter les groupes homologues.

#### **3. Composés organiques semi-volatils et acides résiniques dans les cellules à dialyse**

Dans le cas des acides gras et résiniques, la méthode consiste en un échange de solvant suivi d'une dérivatisation au diazométhane produite dans un microsystème. Le dosage s'effectue à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse à secteur magnétique à haute résolution. Des standards internes deutérés sont utilisés lors de la quantification.

La même méthode est suivie pour l'analyse des phénols, sauf que les standards internes sont des produits marqués au carbone 13.

Dans le cas des HAP, la méthode consiste en un échange de solvant suivi d'un dosage par chromatographe en phase gazeuse «on column» couplé à un spectromètre de masse à secteur magnétique à haute résolution. Des standards internes deutérés sont utilisés pour la quantification.

### **Annexe 4 Traitement statistique des données**

Comme il a été mentionné dans la section portant sur la méthodologie, il existe plusieurs tests statistiques permettant de comparer les teneurs mesurées en amont et en aval des sites à l'étude. Le choix du test dépend de l'erreur statistique que l'on veut contrôler. Deux tests ont été retenus : un test de t de comparaison deux à deux des moyennes ajustées en fonction du modèle hiérarchisé du plan d'échantillonnage et une analyse de la variance à deux critères de classification (la station et la cage), suivie du test de comparaisons multiples de Tukey - Kramer.

Le test de Tukey-Kramer permet de contrôler l'erreur globale pour l'ensemble des comparaisons à une valeur nominale (0,05, par exemple), mais il ne contrôle pas l'erreur de chaque comparaison. Le test de Tukey-Kramer étant très conservateur, cette erreur est faible, ce qui mène à un taux élevé d'erreurs de type II. Cela veut dire que le test ne décèle pas toujours une différence, alors que dans les faits, cette différence existe. Seuls les cas qui présentent de très grands écarts de moyennes sont alors retenus comme significatifs. Dans la présente étude par exemple, les cas qui se sont révélés significatifs selon le test de Tukey-Kramer ont presque tous une valeur de P inférieure à 0,0006 pour le test de comparaison deux à deux des moyennes.

La comparaison des moyennes deux à deux se situe à l'autre extrémité des tests disponibles. Elle contrôle au seuil nominal l'erreur de type I de chacune des comparaisons, mais ne contrôle pas l'erreur sur l'ensemble des comparaisons. La probabilité de faire au moins une erreur de type I sur cet ensemble de comparaisons devient alors supérieure au seuil nominal. Cette probabilité augmente avec le nombre de comparaisons effectuées, et elle est difficile à estimer. S.A.S. Institute (1989) propose une formule permettant de faire une estimation pessimiste de la probabilité de faire une telle erreur. À sept comparaisons (quatre sites



sur le Richelieu et trois tribulaire), on arrive pour chaque substance à une probabilité maximale de 0,30 de faire une erreur de type I.

Le modèle de variance qui s'applique au plan d'échantillonnage utilisé est un modèle hiérarchisé (« nested design »), puisque les mesures dans les stations dépendent de la variation entre les cages et de celle entre les traceurs à l'intérieur de chaque cage. Une première source de variation, appelée erreur expérimentale, consiste en la différence entre les stations. La seconde source — l'erreur d'échantillonnage — est la somme de l'erreur « inter-cage » à l'intérieur d'une station et de l'erreur « inter-traceur » à l'intérieur d'une même cage. Les différences entre les stations sont testées à partir de l'erreur expérimentale, et la validité des tests de Fisher dépend de l'homogénéité de l'erreur d'échantillonnage entre les stations. Une analyse de variance faite sur les valeurs résiduelles du modèle constituant l'erreur expérimentale (test d'homogénéité de Levene) permet de vérifier si l'erreur d'échantillonnage est homogène entre les stations.

Il s'est avéré que pour toutes les substances chimiques analysées, la variance résiduelle aux différentes stations n'était pas homogène. Cela n'est pas surprenant, surtout pour les substances qui ne sont pas détectées à certaines stations. Dans ces cas extrêmes, la variance est nulle aux stations où toutes les valeurs sont sous la limite de détection, alors qu'elle peut être élevée aux stations où la substance est présente. Cette violation du postulat d'homogénéité de la variance ne conduit pas nécessairement à une violation d'interprétation des résultats. Conover (1980) explique que dans de tels cas, une analyse de variance sur les rangs des données doit être faite; si les résultats sont similaires à l'analyse de variance sur les données métriques, il conclut que la violation du postulat de l'analyse de variance n'a pas conduit à une violation de l'interprétation des résultats et que l'analyse de variance paramétrique est valide. Dans les cas où les résultats diffèrent, il faut les interpréter à partir de l'analyse de variance sur les rangs. Ces cas sont indiqués dans l'annexe présentant les niveaux de probabilité des ratios F obtenus de l'analyse de la variance. Par ailleurs, une transformation logarithmique a été appliquée à toutes les données. Cette transformation ne peut qu'aider à réduire l'hétérogénéité des variances, même si pour certaines substances elle n'était pas absolument nécessaire.

Les concentrations mesurées de plusieurs toxiques se retrouvent sous le seuil de détection des appareils de

laboratoire. Une valeur égale à la moitié de la limite de détection a été attribuée aux concentrations des substances non détectées pour pouvoir les inclure dans le traitement statistique.

Pour les BPC, les dioxines et les furannes, l'analyse de variance selon le modèle hiérarchisé présente des problèmes d'ordre mathématique. En effet, on obtient dans certains cas des ratios F négatifs. Cela est dû au fait que le plan d'échantillonnage n'est pas équilibré, avec seulement une analyse dans l'une des cages. Il a été possible de vérifier si la variation entre les cages était significativement différente de celle existant entre les sachets d'une même cage. Ce n'était pas le cas. Les données ont donc été regroupées pour réaliser une analyse de variance à un seul critère de classification, c'est-à-dire la station de mesure. Les résultats sur les BPC présentés dans ce rapport proviennent de cette dernière analyse.

De plus, dans le cas des BPC, des dioxines et des furannes, il n'y a en général que deux ou trois mesures par station, à cause du coût très élevé de l'analyse de ces substances au laboratoire. Pour cette raison, un seuil  $\alpha$  de 0,10 a été retenu pour le test de t, plutôt que le traditionnel 0,05. L'utilisation d'un niveau de signification un peu moins élevé contribue à diminuer la probabilité de faire une erreur de type II. Cette probabilité est élevée lorsque l'effectif est petit et que le niveau de signification est élevé.

Finalement, pour les dioxines et les furannes, les données sont analysées sur la base des dioxines et furannes totaux de même qu'en unités toxiques. Ces unités sont basées sur les facteurs internationaux d'équivalence toxique pour les sept dioxines et les dix furannes les plus toxiques et les plus persistants, c'est-à-dire ceux qui ont des atomes de chlore aux positions 2, 3, 7 et 8 (OTAN, 1988).

## Annexe 5

## Probabilité associée à la valeur de t du test de comparaison deux à deux des moyennes entre l'amont et l'aval des sites à l'étude

	Iberville	St-Jean	Chambly	McMasterville	Rivière des Hurons <sup>1</sup>	Rivière L'Acadie <sup>1</sup>	Ruisseau Beloeil <sup>1</sup>
<b>Métaux</b>							
Aluminium	0,0369	0,3130	<b>0,0135</b>	0,8410	0,0919	0,5730	0,2310
Baryum	0,0119	0,0001	0,1882	0,6159	<b>0,0003</b>	0,0635	0,1172
Cobalt	0,0077	0,0031	0,4774	0,6157	0,0577	0,0018	0,1372
Chrome	0,1446	0,7972	<b>0,0543</b>	0,8062	0,3959	0,4744	0,1323
Cuivre	<b>0,0080</b>	<b>0,0320</b>	0,2856	0,7279	0,1997	<b>0,0345</b>	<b>0,0050</b>
Fer	0,0080	0,0596	0,4575	0,7279	0,0379	0,0030	0,0658
Mercure	0,1700	0,6864	0,3891	0,0063	0,0354	0,0063	0,0050
Magnésium	0,0012	0,0001	<b>0,0016</b>	0,5090	<b>0,0001</b>	<b>0,0141</b>	0,6862
Manganèse	0,0142	0,0001	0,9681	0,6991	0,7394	0,0005	0,0087
Nickel	0,8454	0,9530	0,6152	0,2460	0,1400	0,9517	0,3353
Plomb	0,4183	<b>0,0169</b>	0,3193	0,0442	0,8089	0,1122	0,7039
Vanadium	0,0131	0,3983	0,1461	0,0172	<b>0,0005</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0006</b>
Zinc	0,0001	0,8135	0,0268	0,1785	0,0001	0,2442	0,2220
<b>BPC</b>							
n° 18	0,0050	0,4541	0,7074	0,1152			0,9763
n° 17	0,0048	0,9411	-	-			0,4762
n° 31+28	0,0028	0,3037	0,1038	<b>0,0617</b>			0,4568
n° 33	0,0051	0,1556	0,2260	0,3259			0,1410
n° 52	0,4215	<b>0,0025</b>	0,0032	<b>0,0802</b>			<b>0,0265</b>
n° 49	0,0951	<b>0,0069</b>	0,0067	<b>0,0418</b>			<b>0,0281</b>
n° 44	0,0677	<b>0,0069</b>	0,0126	<b>0,0338</b>			<b>0,0095</b>
n° 74	-	<b>0,0567</b>	0,1192	0,1005			0,2687
n° 70	0,9845	<b>0,0134</b>	0,0857	0,2794			<b>0,0180</b>
n° 95	0,2516	<b>0,0316</b>	0,1643	0,6520			<b>0,0631</b>
n° 101	0,4809	0,1689	0,4625	0,5601			0,1837
n° 99	0,3595	0,1290	0,5651	0,9032			0,1182
n° 87	0,4388	<b>0,0856</b>	0,5551	0,9526			<b>0,0800</b>
n° 110	<b>0,0813</b>	<b>0,0568</b>	0,3806	0,9202			0,1086
n° 82	0,4517	0,1634	0,9634	0,6875			<b>0,0730</b>
n° 118	0,1394	0,1309	0,6827	0,7268			0,1577
n° 105	0,1283	<b>0,0385</b>	0,3088	0,6381			0,1156
n° 151	0,5761	0,2174	0,8005	0,3028			0,1409
n° 149	0,1614	0,1404	0,8490	0,4895			<b>0,0731</b>
n° 153+132	0,1635	0,1877	0,8535	0,6736			0,1286
n° 138+158	0,1255	0,2817	0,7397	0,6968			<b>0,0728</b>
n° 170	0,0200	0,2528	0,4280	0,9511			<b>0,0430</b>
n° 199	0,0011	0,9099	0,3031	0,4616			0,1992
Totaux	0,8151	<b>0,0071</b>	0,0697	<b>0,0357</b>			<b>0,0056</b>

## Annexe 5 (suite)

Probabilité associée à la valeur de t du test de comparaison deux à deux des moyennes entre l'amont et l'aval des sites à l'étude

	Iberville	St-Jean	Chambly	McMasterville	Rivière des Hurons <sup>1</sup>	Rivière L'Acadie <sup>1</sup>	Ruisseau Beloeil <sup>1</sup>
<b>Dioxines et furannes</b>							
1,2,3,6,7,8 - H6CDD	0,3911	0,2817	0,3081	1,0000			
1,2,3,7,8,9 - H6CDD	1,0000	0,2817	0,3081	1,0000			
1,2,3,4,6,7,8 - H7CDD	<b>0,0309</b>	<b>0,0205</b>	0,1862	0,2475			
OCDD	0,3775	0,2751	<b>0,0324</b>	0,0572			
2,3,7,8 - T4CDF	0,3911	0,2411	0,2411	0,2817			
1,2,3,4,6,7,8 - H7CDF	0,1508	0,0954	0,2306	0,4813			
OCDF	0,5565	0,5951	0,0891	0,2725			
<b>HAP</b>							
Naphtalène	0,0625	<b>0,0099</b>	<b>0,0112</b>	<b>0,0464</b>	0,7677	<b>0,0156</b>	0,9410
2-méthylnaphtalène	0,2241	<b>0,0008</b>	0,0613	<b>0,0169</b>	0,2535	<b>0,0050</b>	0,4871
1-méthylnaphtalène	<b>0,0101</b>	<b>0,0001</b>	0,1276	<b>0,0369</b>	0,1950	<b>0,0008</b>	0,4058
Acénaphthylène	1,0000	1,0000	0,0789	0,8331	1,0000	<b>0,0389</b>	1,0000
Acénaphthène	1,0000	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	0,4661	<b>0,0007</b>
Fluorène	<b>0,0002</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,7635	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>
Phénanthrène	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,0300	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>
Anthracène	<b>0,0026</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,1050	1,0000	<b>0,0051</b>	0,3606
Fluoranthène	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,6330	0,0002	<b>0,0001</b>	<b>0,0258</b>
Pyrène	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,0680	0,0001	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>
Benzo(a)anthracène	1,0000	<b>0,0091</b>	<b>0,0031</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Chrysène	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,1590	1,0000	1,0000	1,0000
<b>Phtalates</b>							
Diméthylphtalate	0,0640	0,0039	1,0000	1,0000	0,0047	0,1602	0,0505
Diéthylphtalate	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	0,0241	0,2624	<b>0,0006</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0058</b>
Di-n-butylphtalate	0,2231	0,6529	0,3399	<b>0,0190</b>	0,0068	0,0016	0,2237
Butylbenzylphtalate	<b>0,0004</b>	<b>0,0001</b>	0,5555	<b>0,0033</b>	0,2107	0,5894	0,2439
Bis(2-éthylhexyl)phtalate	0,0195	0,0175	0,2163	0,7737	0,0008	0,0042	0,1016
Di-n-octylphtalate	0,4586	0,2054	0,3151	0,6868	0,9883	0,1406	0,1699
<b>Autres C.O.S.V.</b>							
Phénol	0,5563	0,7865	0,1165	0,3764	0,2982	0,2855	0,3475
1,3-dichlorobenzène	0,4958	1,0000	0,0984	0,0804	0,1450	<b>0,0020</b>	<b>0,0050</b>
1,4-dichlorobenzène	<b>0,0086</b>	<b>0,0010</b>	0,6074	0,7219	0,0975	<b>0,0053</b>	0,0757
1,2-dichlorobenzène	<b>0,0046</b>	<b>0,0001</b>	0,0085	0,2040	1,0000	<b>0,0001</b>	0,1451
4-méthylphénol	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	0,2543	0,2241	0,2810
1,2,4-trichlorobenzène	0,0999	<b>0,0003</b>	0,5559	0,0167	1,0000	<b>0,0004</b>	<b>0,0074</b>
Dibenzofuranne	0,3394	<b>0,0006</b>	<b>0,0122</b>	0,7834	<b>0,0077</b>	<b>0,0222</b>	<b>0,0007</b>
2-méthylthiobenzothiazole			0,5831	0,1584	0,7029	0,9005	0,4231
Oxybenzone	<b>0,0094</b>	<b>0,0002</b>	0,0230	<b>0,0331</b>	<b>0,0117</b>	0,5966	<b>0,0033</b>
Benzophénone	<b>0,0194</b>	<b>0,0001</b>	0,4693	1,0000	<b>0,0159</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0001</b>

## Annexe 5 (suite)

Probabilité associée à la valeur de t du test de comparaison deux à deux des moyennes entre l'amont et l'aval des sites à l'étude

	Iberville	St-Jean	Chambly	McMasterville	Rivière des Hurons <sup>2</sup>	Rivière L'Acadie <sup>1</sup>	Ruisseau Beloeil <sup>1</sup>
<b>Autres C.O.S.V. (suite)</b>							
Carbazole	1,0000	<b>0,0003</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0001</b>
Hexachlorobenzène	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0135</b>	1,0000	1,0000	1,0000
2-nitrotoluène	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	1,0000
3-nitrotoluène	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	1,0000
4-nitrotoluène	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	1,0000
2,4-dinitrotoluène	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0001</b>	1,0000	1,0000	1,0000
2,6-dinitrotoluène	1,0000	1,0000	1,0000	0,1054	1,0000	1,0000	1,0000
Atrazine	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	1,0000
Métolachlor	1,0000	1,0000	0,0749	0,1972	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	1,0000
<b>Ac. gras et résiniques</b>							
Acide palmitoléique	<b>0,0008</b>	<b>0,0010</b>	0,0547	0,3812	0,0093	0,1208	0,8246
Acide palmitique	<b>0,0458</b>	0,0819	0,1034	0,1452	0,0693	0,1308	0,0709
Acide linoléique	<b>0,0290</b>	<b>0,0112</b>	<b>0,0041</b>	0,0117	0,5090	0,4964	0,3164
Acide linoléique	0,0939	0,0144	0,8918	0,4932	0,0167	0,0144	0,0270
Acide oléique	<b>0,0389</b>	<b>0,0160</b>	0,2246	0,0894	0,1146	0,5247	0,4168
Acide stéarique	0,6298	0,0896	0,7869	0,3686	0,9540	0,5879	0,2195
Acide pimarique	1,0000	<b>0,0002</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Acide isopimarique	1,0000	<b>0,0009</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Acide déhydroabiétique	<b>0,0012</b>	<b>0,0002</b>	0,8083	<b>0,0082</b>	0,2316	0,5251	0,2922

<sup>1</sup> La concentration dans ces tributaires est comparée à celle dans le Richelieu en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu.

Caractères gras : valeur de P < 0,05 (sauf BPC : P < 0,10) associée à une hausse de concentration.

Annexe 6 Résultats de l'analyse de la variance des concentrations de substances toxiques aux différentes stations de mesure

Substance	F	Prob F
<b>Métaux</b>		
Aluminium	9,3410	0,0271
Baryum	29,1940	0,0001
Cobalt	3,8830	0,0279
Chrome	2,4980	0,0945
Cuivre	3,0700	0,0551
Fer	2,7330	0,0755
Mercuré	6,5940	0,0049
Magnésium	37,4980	0,0001
Manganèse	10,5110	0,0009
Nickel	0,9730	0,5162
Plomb	5,5010	0,0091
Vanadium	17,1960	0,0001
Zinc	14,4880	0,0002
<b>BPC</b>		
no 181 <sup>1</sup>	1,3704	0,3947
no 31+281 <sup>1</sup>	1,1123	0,4748
no 33 <sup>1</sup>	1,5313	0,3582
no 52	15,0727	0,0289
no 49	11,6266	0,0232
no 44	14,7520	0,0195
no 74	3,0871	0,1806
no 70 <sup>1</sup>	12,4493	0,0302
no 95	2,3890	0,2220
no 101	0,8281	0,5939
no 99	1,0478	0,5051
no 87	1,5003	0,3750
no 110	1,9687	0,2886
no 82	1,5944	0,3504
no 118	1,2809	0,4367
no 105	2,4314	0,2520
no 151	1,4037	0,3889
no 149	1,6802	0,3269
no 153+132	1,0880	0,5002
no 138+158	1,6847	0,3435
no 128	0,5571	0,6786
no 156	6,0735	0,0000
no 169	3,4615	0,1895
no 187	0,5903	0,6732
no 183	1,4418	0,5999
no 171	6,6953	0,1510
no 191	1,0527	0,5195

<sup>1</sup> analyse de la variance faite sur les rangs

Annexe 6 Résultats de l'analyse de la variance des concentrations de substances toxiques aux différentes stations de mesure

Substance	F	Prob F
<b>BPC (suite)</b>		
no 170	10,3144	0,0747
no 199 <sup>1</sup>	3,5171	0,6290
no 194	1,8125	0,3086
no 205	1,5393	0,4510
no 206	1,8726	0,3385
no 209	8,4885	0,1100
BPC totaux	6,3700	0,0113
<b>Dioxines et furannes</b>		
1,2,3,6,7,8-H6CDD	0,5578	0,7121
1,2,3,7,8,9-H6CDD	0,5578	0,7121
1,2,3,4,6,7,8-H7CDD	9,7020	0,2080
OCDD	7,4002	0,0761
2,3,7,8-T4CDF	2,5406	0,3066
1,2,3,4,6,7,8-H7CDF	2,7630	0,3948
OCDF	3,4070	0,4231
<b>HAP</b>		
Naphtalène	5,8650	0,0076
1-méthylnaphtalène	9,8500	0,0012
2-méthylnaphtalène	7,6720	0,0039
Acénaphtylène	2,6850	0,0794
Acénaphène	37,7200	0,0001
Fluorène	30,1260	0,0001
Fluoranthène	83,7450	0,0001
Pyrène	331,7850	0,0001
Chrysène	143,4500	0,0001
Phénanthrène	88,0260	0,0001
Anthracène	22,3140	0,0001
Benzo(a)anthracène	4,6810	0,0158
<b>Phtalates</b>		
Diméthylphtalate	3,1390	0,0550
Diéthylphtalate	25,6000	0,0001
Di-n-batylphtalate	7,1330	0,0042
Batylbenzylphtalate	28,2330	0,0001
Bis(2-éthylhexyl)phtalate <sup>1</sup>	2,8050	0,0715
Di-n-octylphtalate	1,7460	0,2113

<sup>1</sup> analyse de la variance faite sur les rangs

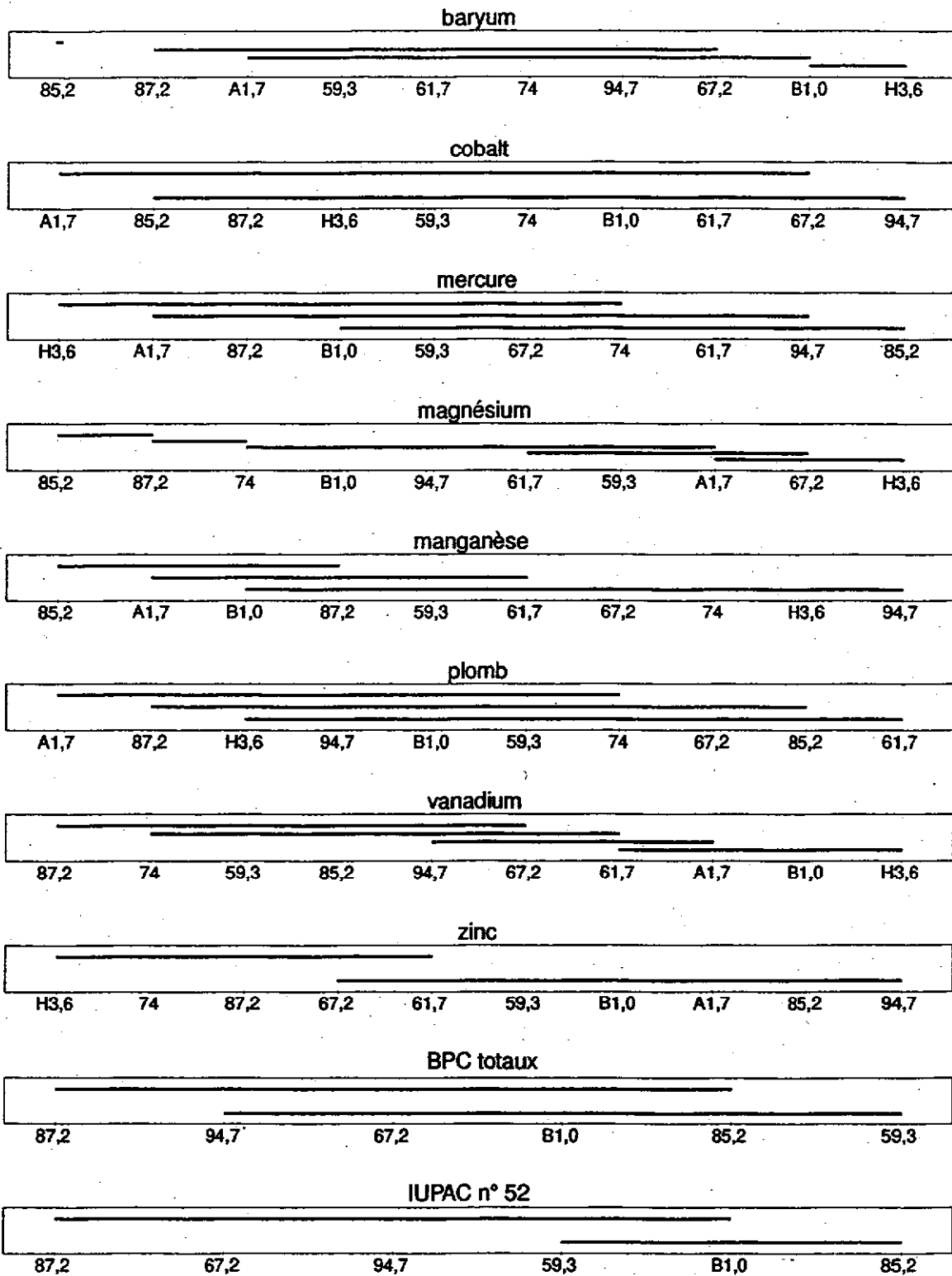
Annexe 6 Résultats de l'analyse de la variance des concentrations de substances toxiques aux différentes stations de mesure

Substance	F	Prob F
<b>Autres C.O.S.V.</b>		
Phénol	1,6050	0,2470
1,3-dichlorobenzène	4,6640	0,0168
1,4-dichlorobenzène	3,3950	0,0422
1,2-dichlorobenzène	22,5540	0,0001
4-méthylphénol	1,3690	0,0001
1,2,4-trichlorobenzène	9,1250	0,0016
Dibenzofurane	6,8310	0,0046
2,4-dinitrotoluène	68,8920	0,0001
2,6-dinitrotoluène	0,9060	0,5593
2-nitrotoluène	768,0000	0,0001
3-nitrotoluène	73,3500	0,0001
4-nitrotoluène	243,1300	0,0001
Azobenzène	0,7610	0,6544
Hexachlorobenzène	2,4430	0,1004
Carbazole	68,2720	0,0001
2-méthylthiobenzothiazole	3,4800	0,0395
Benzophénone	16,3700	0,0002
Métolachlor	34,0500	0,0001
Atrazine	56,1500	0,0001
<b>Acides gras et résiniques</b>		
Acide palmitoléique	15,8309	0,0002
Acide palmitique	5,2882	0,0108
Acide linoléique	9,3383	0,0017
Acide linoléique	9,5017	0,0015
Acide oléique	4,7644	0,0153
Acide stéarique	1,5200	0,2735
Acide pimarique	7,6683	0,0030
Acide isopimarique	5,0487	0,0124
Acide déhydroabiétique	8,9712	0,0017

† analyse de la variance faite sur les rangs

**Annexe 7 Diagrammes de comparaison des concentrations de diverses substances dans les traceurs placés dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires**

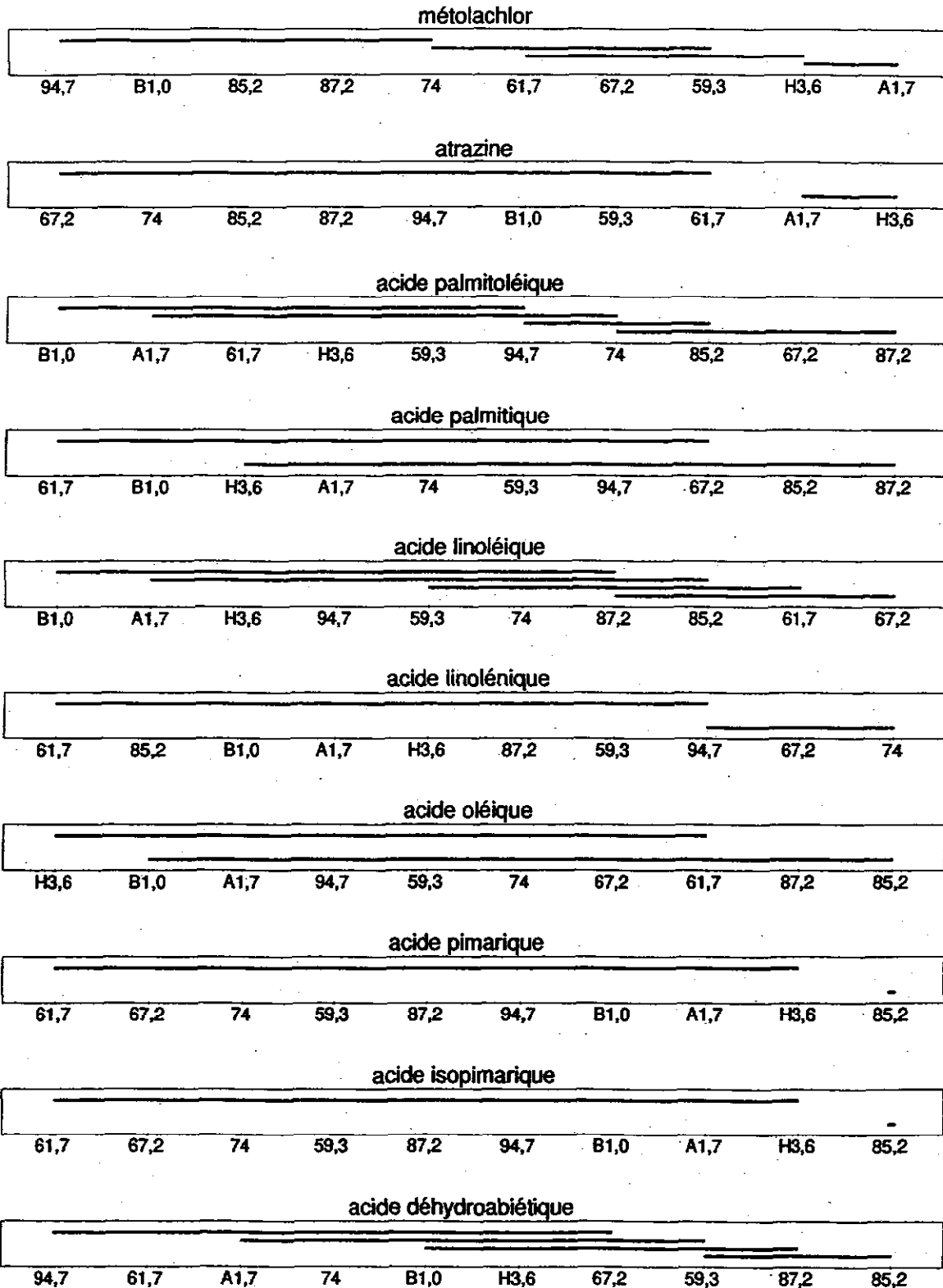
Les concentrations aux stations reliées par une ligne ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )





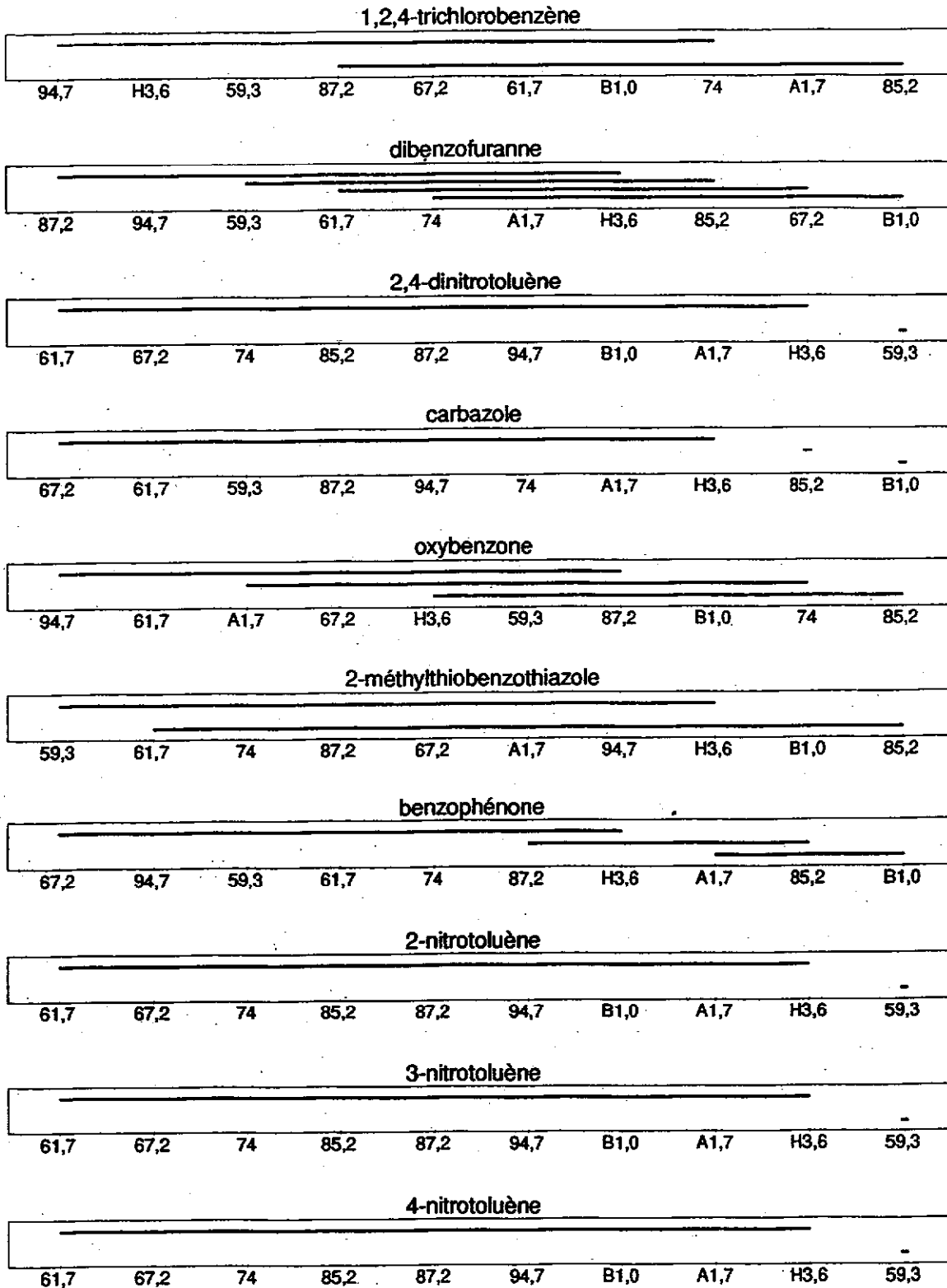
Annexe 7 (suite) Diagrammes de comparaison des concentrations de diverses substances dans les traceurs placés dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

Les concentrations aux stations reliées par une ligne ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )



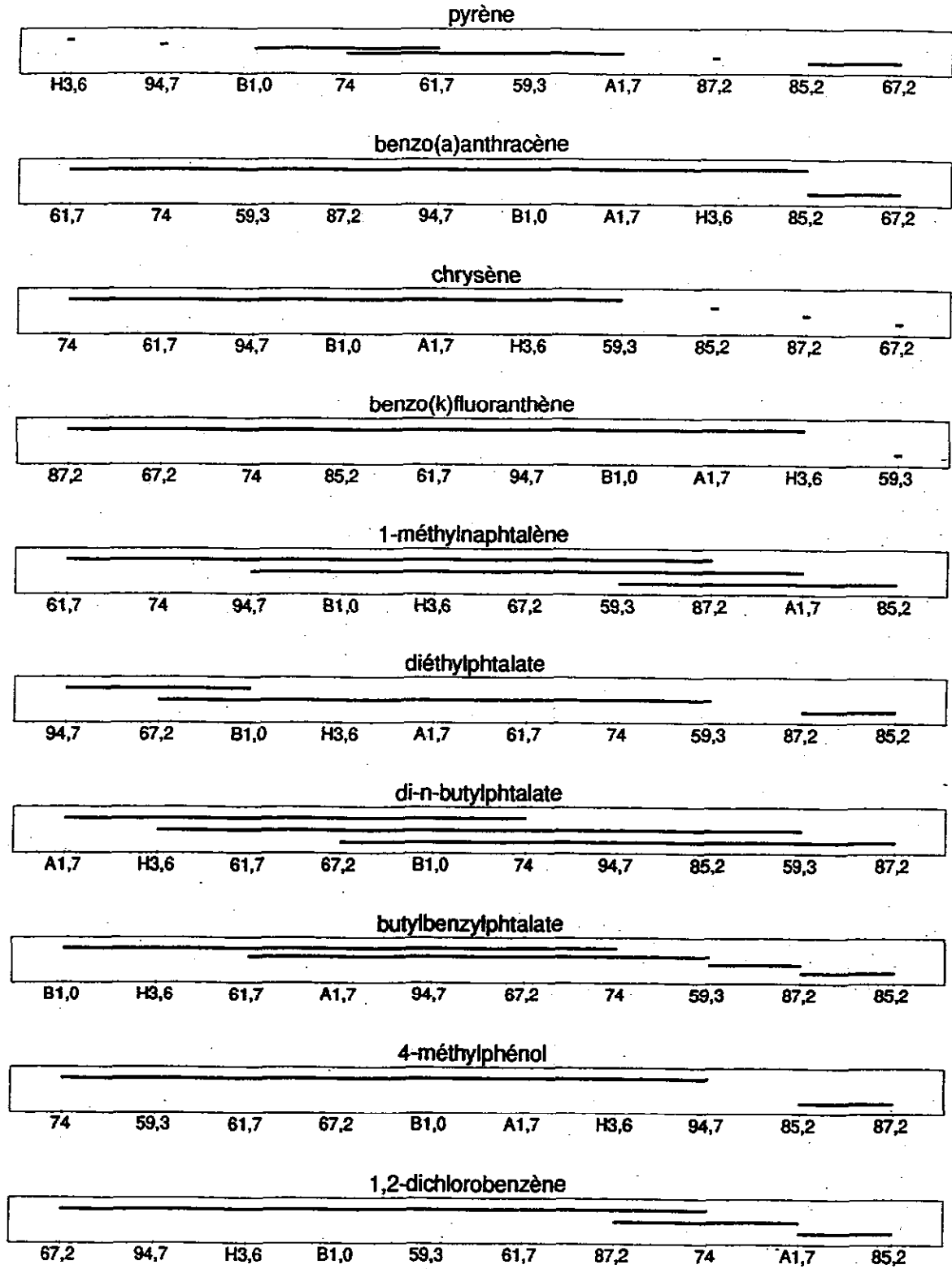
**Annexe 7 (suite) Diagrammes de comparaison des concentrations de diverses substances dans les traceurs placés dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires**

Les concentrations aux stations reliées par une ligne ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )



Annexe 7 (suite) Diagrammes de comparaison des concentrations de diverses substances dans les traceurs placés dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

Les concentrations aux stations reliées par une ligne ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )



Annexe 7 (suite) Diagrammes de comparaison des concentrations de diverses substances dans les traceurs placés dans la rivière Richelieu et certains de ses tributaires

Les concentrations aux stations reliées par une ligne ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey-Kramer ( $\alpha=0,05$ )

