

Record Number: 1470
Author, Monographic: Tessier, A.//Campbell, P. G. C.//Auclair, J. C.//Bisson, M.//Boucher, H.
Author Role:
Title, Monographic: Évaluation de l'impact de rejets miniers sur des organismes biologiques
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1982
Original Publication Date:
Volume Identification:
Extent of Work: 257
Packaging Method: pages, 1 annexe
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 146
Location/URL:
ISBN: 2-89146-144-4
Notes: Rapport annuel 1981-1982
Abstract: Rapport rédigé pour Environnement Canada
40.00\$
Call Number: R000146
Keywords: rapport/ ok/ dl

EVALUATION DE L'IMPACT DE REJETS MINIERS
SUR DES ORGANISMES BIOLOGIQUES

RAPPORT SCIENTIFIQUE NO 146

par

A. Tessier, P.G.C. Campbell, J.C. Auclair, M. Bisson
et H. Boucher

Université du Québec
INRS-Eau
C.P. 7500
Ste-Foy, Québec
G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE NO 146

par

A. Tessier, P.G.C. Campbell, J.C. Auclair, M. Bisson
et H. Boucher

EVALUATION DE L'IMPACT DE REJETS MINIERES
SUR DES ORGANISMES BIOLOGIQUES

Université du Québec
INRS-Eau
C.P. 7500
Ste-Foy, Québec
G1V 4C7

TABLE DES MATIERES

	Page
TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
RESUME - ABSTRACT	xvii
AVANT-PROPOS	xxviii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Importance de la spéciation des métaux traces particu- laires	1
1.2 Les plantes aquatiques supérieures (macrophytes)	3
1.3 Macroinvertébrés benthiques (pélicypodes)	7
2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	12
3. CHOIX DU SITE DE L'ETUDE - HISTORIQUE	13
4. MATERIEL ET METHODES	17
4.1 Campagnes d'échantillonnage	17
4.1.1 Campagne de mai 1981	17
4.1.2 Campagne de juillet 1981	22
4.1.3 Campagne de septembre 1981	24
4.2 Tamisage des sédiments	29
4.3 Attaque chimique des sédiments	31
4.3.1 Attaque avec l'acide nitrique concentré	31
4.3.2 Procédure pour déterminer la spéciation des métaux traces particulières	32
4.4 Dosage des métaux dans les différents extraits des sédiments	35
4.5 Autres mesures effectuées sur les sédiments	35
4.6 Sélection des échantillons de plantes à analyser	36
4.7 Digestion de <u>Nuphar variegatum</u> et dosage des teneurs en métaux traces	37

4.8	Identification et préparation des mollusques	40
4.9	Digestion des organes des mollusques et dosage des teneurs en métaux traces	41
5.	RESULTATS	43
5.1	Résultats analytiques de la campagne préliminaire en mai 1981	43
5.1.1	Concentrations de métaux traces dans les sédi- ments (attaque avec HNO ₃ concentré)	43
5.1.2	Spéciation des métaux traces	49
5.2	Caractéristiques générales des échantillons de carottes de sédiments	55
5.3	Spéciation des métaux traces dans les échantillons de carottes de sédiments	58
5.3.1	Cuivre	58
5.3.2	Plomb	67
5.3.3	Zinc	69
5.3.4	Fer	70
5.4	Caractéristiques granulométriques des sédiments ingérés par les bivalves	70
5.5	Caractéristiques générales des échantillons de sédiments de surface	71
5.6	Spéciation des métaux traces dans les échantillons de sédiments de surface	74
5.6.1	Cuivre	74
5.6.2	Plomb	79
5.6.3	Zinc	80
5.6.4	Fer	80

5.7	Teneurs en métaux traces dans <u>Nuphar variegatum</u>	81
5.7.1	Variabilité spatiale à un site donné	87
5.7.2	Variabilité saisonnière	87
5.7.3	Variabilité spatiale dans la région d'étude - campagne d'échantillonnage de juillet	88
5.8	Teneurs en métaux traces dans <u>Elliptio complanata</u>	89
5.9	Teneurs en métaux traces dans <u>Anodonta grandis</u>	105
6.	TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSION	
6.1	Estimation des associations des métaux traces particu- laires avec les phases des sédiments	126
6.1.1	Fraction 1	130
6.1.2	Fraction 2	132
6.1.3	Fraction 3	134
6.1.4	Fraction 4	136
6.1.5	Fraction 5	138
6.2	Répartition des métaux entre les différentes fractions	138
6.3	Métaux traces dans les bivalves	150
6.3.1	Variabilité spatiale des concentrations de métaux dans les bivalves	150
6.3.2	Répartition des métaux dans les différents organes	155
6.3.3	Relations entre la spéciation des métaux dans les sédiments et leur accumulation dans les bi- valves	161
6.4	Bioaccumulation de métaux dans <u>Nuphar variegatum</u> - dis- cussion des résultats et vérification des relations plantes/sédiments	195
6.4.1	Distribution des métaux dans <u>N. variegatum</u>	195

6.4.2	Relations entre les teneurs de métaux chez <u>N. variegatum</u> et les concentrations de métaux dans les sédiments	215
6.4.3	Synthèse	236
7.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	243
7.1	Bivalves	243
7.2	Plantes aquatiques	245
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	248
	ANNEXE	

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1: Région de l'étude	16
Figure 4.1: Lac Beauchastel - stations d'échantillonnage des sédiments (mai 1981)	18
Figure 4.2: Lac La Bruère - stations d'échantillonnage des sédiments (mai 1981)	19
Figure 4.3: Lac Routhier - stations d'échantillonnage des sédiments (mai 1981)	20
Figure 4.4: Lac Beauchastel - stations d'échantillonnage de juillet et de septembre 1981	25
Figure 4.5: Lac La Bruère - stations d'échantillonnage de juillet et septembre 1981	26
Figure 4.6: Lac Routhier - stations d'échantillonnage de juillet 1981	27
Figure 4.7: Lac Pelletier - station d'échantillonnage de juillet 1981	28
Figure 4.8: Lac Montbeillard - stations d'échantillonnage des sédiments (septembre 1981)	30
Figure 5.1: Distribution des particules en fonction de leur volume dans l'intestin des bivalves	72
Figure 6.1: Relation entre [Cu(F2)] et [Fe(F2)] dans la strate 0-2 cm des carottes de sédiments	128
Figure 6.2: Relation entre [Cu(F3)] et [Pb(F3)] dans la strate 0-2 cm des carottes de sédiments	129
Figure 6.3: Concentrations de cuivre dans la fraction 2 en fonction de la concentration de cuivre dans la fraction 4 pour les groupes de stations G5 et G6	148
Figure 6.4: Concentrations de zinc dans la fraction 2 en fonction de la concentration de zinc dans la fraction 3 pour le groupe de stations G2	149

Figure 6.5:	Relation entre la teneur en cuivre dans <u>Elliptio complanata</u> (reconstituée avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Cu(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	178
Figure 6.6:	Relation entre la teneur en plomb dans les branchies de <u>Elliptio complanata</u> et le rapport $\{[Pb(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	180
Figure 6.7:	Relation entre la teneur en zinc dans <u>Elliptio complanata</u> (reconstituée avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Zn(F4)]/[Fe(F4)]\}$ dans les sédiments tous les organismes à une station)	181
Figure 6.8:	Relation entre la teneur en zinc dans <u>Elliptio complanata</u> (reconstituée avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Zn(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	182
Figure 6.9:	Relation entre les teneurs en cuivre dans <u>Anodonta grandis</u> (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Cu(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	184
Figure 6.10:	Relations entre les teneurs en cuivre dans <u>Anodonta grandis</u> pour la classe d'âge 5-6 ans (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Cu(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	185
Figure 6.11:	Relation entre les teneurs en plomb dans les branchies de <u>Anodonta grandis</u> et le rapport $\{[Pb(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	187
Figure 6.12:	Relation entre les teneurs en plomb dans les branchies de <u>Anodonta grandis</u> pour la classe d'âge 5-6 ans et le rapport $\{[Pb(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	188
Figure 6.13:	Relation entre les teneurs en zinc dans <u>Anodonta grandis</u> (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Zn(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	189
Figure 6.14:	Relation entre les teneurs en zinc dans <u>Anodonta grandis</u> pour la classe d'âge 5-6 ans (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Zn(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments	190
Figure 6.15:	Relation entre les teneurs de cuivre et de manganèse dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> - stations échantillonnées en juillet	203

Figure 6.16:	Relation entre les teneurs de zinc et de cuivre dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> - stations échantillonnées en juillet	205
Figure 6.17:	Relation entre les teneurs de zinc et de cuivre dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> - stations échantillonnées en septembre	206
Figure 6.18:	Relation entre les teneurs de zinc et de manganèse dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> - stations échantillonnées en septembre	208
Figure 6.19:	Schéma simplifié de la bioaccumulation de métaux par <u>Nuphar variegatum</u> à partir des rhizomes	209
Figure 6.20:	Relation entre les teneurs de manganèse dans les rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> et les teneurs de manganèse dans les tiges - stations échantillonnées en juillet	213
Figure 6.21:	Relation entre les teneurs de cuivre dans les rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> et les teneurs de cuivre dans les tiges - stations échantillonnées en juillet	214
Figure 6.22:	Schéma de la bioaccumulation de métaux pour <u>Nuphar variegatum</u> à partir des rhizomes, en tenant compte de la spéciation des métaux dans les sédiments ...	220
Figure 6.23:	Relation entre les teneurs en cuivre des rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> et le rapport des concentrations de cuivre et de fer échangeables ($[Cu(F1)]/[Fe(F1)]$) dans les sédiments superficiels (0-2 cm, < 850 μ m)	226
Figure 6.24:	Relation entre les teneurs en cuivre des tiges de <u>Nuphar variegatum</u> et les concentrations de cuivre liées aux oxydes de fer et de manganèse dans les sédiments superficiels (0-2 cm, < 850 μ m)	229
Figure 6.25:	Relation entre les teneurs en zinc des tiges de <u>Nuphar variegatum</u> et les concentrations de zinc échangeables dans les sédiments superficiels (0-2 cm, < 850 μ m)	230
Figure 6.26:	Relation entre les teneurs en zinc des tiges de <u>Nuphar variegatum</u> et les concentrations de zinc dans la fraction 2 des sédiments superficiels (0-2 cm, < 850 μ m)	231

- Figure 6.27: Relation entre les teneurs en zinc des tiges de Nuphar variegatum et les concentrations de zinc dans la fraction 2 des sédiments superficiels (0-2 cm, <850 μm) après normalisation de ces dernières en fonction de la concentration en soufre réduit 233
- Figure 6.28: Schéma de la bioaccumulation de métaux par Nuphar variegatum, en tenant compte de la spéciation des métaux dans les sédiments et de deux voies possibles d'assimilation (via le rhizome et/ou la tige) 240

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 4.1: Plantes aquatiques présentes (X) à quelques stations de la baie des Garde-Feu (Lac Beauchastel)	23
Tableau 4.2: Teneurs en Cu, Pb et Zn dans les tiges et dans différentes parties des rhizomes de trois spécimens de <u>Nuphar variegatum</u>	38
Tableau 4.3: Vérification de la justesse et de la précision de la méthodologie utilisée pour analyser les plantes	39
Tableau 5.1: Concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments du lac Beauchastel et de la rivière Beauchastel	44
Tableau 5.2: Concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments du lac La Bruère	45
Tableau 5.3: Concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments du lac Routhier et de la rivière Kinojévis	46
Tableau 5.4: Vérification de la reproductibilité de l'échantillonnage de sédiments aux stations BR-03, LR-05 et LR-09	47
Tableau 5.5: Comparaison des teneurs en Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments superficiels et les sédiments plus profonds aux stations LR-09, LR-10 et LR-12	48
Tableau 5.6: Spéciation du cuivre particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981	51
Tableau 5.7: Spéciation du plomb particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981	52
Tableau 5.8: Spéciation du zinc particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981	53
Tableau 5.9: Spéciation du fer particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981	54

Tableau 5.10:	Concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans la tranche 0-2 cm de carottes de sédiments (f < 850 µm)	56
Tableau 5.11:	Concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans la tranche 8-10 cm de carottes de sédiments (f < 850 µm)	57
Tableau 5.12:	Spéciation du cuivre particulaire dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	59
Tableau 5.13:	Spéciation du plomb dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	60
Tableau 5.14:	Spéciation du zinc particulaire dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	61
Tableau 5.15:	Spéciation du fer particulaire dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	62
Tableau 5.16:	Spéciation du cuivre dans la tranche 8-10 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	63
Tableau 5.17:	Spéciation du plomb dans la tranche 8-10 cm de carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	64
Tableau 5.18:	Spéciation du zinc dans la tranche 8-10 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	65
Tableau 5.19:	Spéciation du fer dans la tranche 8-10 cm de carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)	66
Tableau 5.20:	Concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans les sédiments superficiels de fraction granulométrique < 70 µm	73
Tableau 5.21:	Spéciation du cuivre particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique < 70 µm)	75

Tableau 5.22:	Spéciation du plomb particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique < 70 µm)	76
Tableau 5.23:	Spéciation du zinc particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique < 70 µm)	77
Tableau 5.24:	Spéciation du fer particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique < 70 µm)	78
Tableau 5.25A:	Concentrations de métaux (µg/g, poids sec) dans les rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> - échantillons composites	82
Tableau 5.25B:	Concentrations de métaux (µg/g, poids sec) dans les rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> - échantillons individuels	83
Tableau 5.26A:	Concentrations de métaux (µg/g, poids sec) dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> - échantillons composites	84
Tableau 5.26B:	Concentrations de métaux (µg/g, poids sec) dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> - échantillons individuels	85
Tableau 5.27:	Comparaison des teneurs en métaux (µg/g, poids sec) dans les tiges et rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> en juillet et septembre	86
Tableau 5.28:	Concentrations de métaux traces (µg/g, poids sec) dans le pied de <u>Elliptio complanata</u>	90
Tableau 5.29:	Concentrations des métaux traces dans les muscles (µg/g, poids sec) adducteurs de <u>Elliptio complanata</u>	92
Tableau 5.30:	Concentrations de métaux traces dans la masse viscérale (µg/g, poids sec) de <u>Elliptio complanata</u>	94
Tableau 5.31:	Concentrations de métaux traces dans le foie (µg/g, poids sec) de <u>Elliptio complanata</u>	96
Tableau 5.32:	Concentrations de métaux traces dans les branchies (µg/g, poids sec) de <u>Elliptio complanata</u>	98
Tableau 5.33:	Concentrations de métaux traces dans le manteau (µg/g, poids sec) de <u>Elliptio complanata</u>	100
Tableau 5.34:	Concentrations de métaux traces (µg/g, poids sec) reconstituées dans les chairs de <u>Elliptio complanata</u>	102

Tableau 5.35:	Indice de condition, âge, longueur, largeur et épaisseur de la coquille de <u>Elliptio complanata</u>	104
Tableau 5.36:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans le pied de <u>Anodonta grandis</u>	106
Tableau 5.37:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les muscles adducteurs de <u>Anodonta grandis</u>	108
Tableau 5.38:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans la masse viscérale de <u>Anodonta grandis</u>	110
Tableau 5.39:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans le foie de <u>Anodonta grandis</u>	112
Tableau 5.40:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les branchies de <u>Anodonta grandis</u>	114
Tableau 5.41:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans le manteau de <u>Anodonta grandis</u>	116
Tableau 5.42:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les oeufs de <u>Anodonta grandis</u>	118
Tableau 5.43:	Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) reconstituées dans les chairs de <u>Anodonta grandis</u>	120
Tableau 5.44:	Indice de condition, âge, longueur, largeur et épaisseur de la coquille de <u>Anodonta grandis</u> ...	123
Tableau 6.1:	Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 1	131
Tableau 6.2:	Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 2	133
Tableau 6.3:	Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 3	135
Tableau 6.4:	Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 4	137
Tableau 6.5:	Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 5	139
Tableau 6.6:	Matrice de corrélations pour le cuivre dans les différentes fractions	143

Tableau 6.7:	Matrice de corrélations pour le plomb dans les différentes fractions	144
Tableau 6.8:	Matrice de corrélations pour le zinc dans les différentes fractions	145
Tableau 6.9:	Matrice de corrélations pour le fer dans les différentes fractions	146
Tableau 6.10:	Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans chaque organe de <u>Elliptio complanata</u> : classement par ordre croissant des stations selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque organe et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$)	151
Tableau 6.11:	Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans chaque organe de <u>Anodonta grandis</u> : classement par ordre croissant des stations selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque organe et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$)	152
Tableau 6.12:	Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans les différents organes de <u>Elliptio complanata</u> : classement par ordre croissant des organes selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque station et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$)	156
Tableau 6.13:	Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans les différents organes de <u>Anodonta grandis</u> : classement par ordre croissant des organes selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque station et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$)	157
Tableau 6.14:	Matrices de corrélations entre les teneurs en métaux dans les différents organes de <u>Elliptio complanata</u>	159

Tableau 6.15:	Matrices de corrélations entre les teneurs en métaux dans les différents organes de <u>Anodonta grandis</u>	160
Tableau 6.16:	Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le cuivre dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	163
Tableau 6.17:	Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le plomb dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	164
Tableau 6.18:	Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le zinc dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	165
Tableau 6.19:	Matrice de corrélations entre le fer dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le fer dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	166
Tableau 6.20:	Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le rapport (cuivre/fer) dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	167
Tableau 6.21:	Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le rapport (plomb/fer) dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	168
Tableau 6.22:	Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de <u>Elliptio complanata</u> et le rapport (zinc/fer) dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	169
Tableau 6.23:	Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le cuivre dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	170
Tableau 6.24:	Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le plomb dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	171

Tableau 6.25:	Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le zinc dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	172
Tableau 6.26:	Matrice de corrélations entre le fer dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le fer dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	173
Tableau 6.27:	Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le rapport (cuivre/fer) dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	174
Tableau 6.28:	Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le rapport (plomb/fer) dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	175
Tableau 6.29:	Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de <u>Anodonta grandis</u> et le rapport (zinc/fer) dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)	176
Tableau 6.30:	Teneurs de divers métaux dans <u>Nuphar</u> sp.: revue de la littérature et comparaison avec les résultats de la présente étude	196
Tableau 6.31A:	Rapport tige/rhizome pour les concentrations de métaux dans <u>Nuphar variegatum</u> - échantillons composites	197
Tableau 6.31B:	Rapport tige/rhizome pour les concentrations de métaux dans <u>Nuphar variegatum</u> - échantillons individuels	198
Tableau 6.32:	Variation saisonnière des teneurs en métaux traces dans des macrophytes	200
Tableau 6.33:	Corrélations entre métaux dans les tiges ou dans les rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u>	204
Tableau 6.34:	Corrélations entre les teneurs de métaux dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> et les teneurs de métaux dans les rhizomes	212
Tableau 6.35A:	Relations entre les teneurs en métaux de macrophytes immergés et les concentrations de ces mêmes métaux dans les sédiments provenant du même site - revue de la littérature	216

Tableau 6.35B:	Relations entre les teneurs en métaux de macrophytes émergents et les concentrations de ces mêmes métaux dans les sédiments provenant du même site - revue de la littérature	217
Tableau 6.36:	Corrélations entre les teneurs de métaux dans les rhizomes de <u>Nuphar variegatum</u> et les concentrations de métaux dans les sédiments superficiels (< 850 μm)	225
Tableau 6.37:	Corrélations entre les teneurs de métaux dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> et les concentrations de métaux dans les sédiments superficiels (<850 μm)	228
Tableau 6.38:	Corrélations entre les teneurs de métaux dans les tiges de <u>Nuphar variegatum</u> et les concentrations de métaux dans les sédiments superficiels (<850 μm)	234
Tableau 6.39:	Bioaccumulation du cuivre par <u>Nuphar variegatum</u> - synthèse des résultats	237
Tableau 6.40:	Bioaccumulation du zinc par <u>Nuphar variegatum</u> - synthèse des résultats	238
Tableau 6.41:	Bioaccumulation du fer par <u>Nuphar variegatum</u> - synthèse des résultats	239

RESUME

L'objectif principal de l'étude était d'identifier des relations entre les teneurs en métaux traces dans des spécimens biologiques habitant les sédiments et la spéciation de ces métaux dans les sédiments provenant du même site.

Pour rencontrer l'objectif, nous avons recherché un site (section 3) qui, idéalement, devait satisfaire à certaines exigences: i) teneurs en métaux traces dans les sédiments et les organismes biologiques plus élevées que le seuil de sensibilité; ii) gradient de concentration des métaux traces dans les sédiments; iii) minéralogie générale des sédiments semblable pour l'ensemble des stations; iv) présence d'un ou de plusieurs types d'organismes biologiques benthiques à toutes les stations. Après consultation de la littérature pertinente et après discussion avec plusieurs scientifiques impliqués dans le domaine de l'environnement au Québec, notre choix s'est arrêté sur la région minière de Rouyn-Noranda.

Trois campagnes d'échantillonnage ont eu lieu, soit en mai, juillet et septembre (section 4.1). La campagne de mai a revêtu un caractère préliminaire dans le sens où on s'en est servi pour planifier et organiser les deux autres campagnes. Elle avait pour buts: i) de rechercher un gradient de concentration de métaux traces dans les sédiments; ii) de rechercher des informations concernant les organismes benthiques et les plantes présents; iii) de régler les derniers aspects logistiques avant le début des deux autres campagnes. Dans ce contexte, des échantillons de sédiments ont été prélevés à 46 stations distribuées dans les lacs^e Beauchastel, la Bruère et Routhier; dans ces échantillons, on a mesuré les concentrations en métaux traces extraits à chaud par HNO₃ concentré. Aux diverses stations, on a examiné les sédiments dans le but d'y observer la présence d'organismes benthiques ou de résidus de plantes; de plus, à plusieurs de ces stations un plongeur a récolté des pélécy-podes. Les mesures effectuées, de même que les observations relevées, ont permis de planifier des deux autres campagnes, notamment de sélectionner les stations d'échantillonnage.

Pour la campagne de juillet, l'accent a été mis sur le prélèvement de plantes aquatiques. Après identification des plantes aquatiques présentes à plusieurs stations, il s'est avéré que Nuphar variegatum était la plante la plus omniprésente; cette plante a donc été choisie pour l'étude et sa présence devenait essentielle pour le choix d'une station. Pour la campagne de septembre, l'accent a surtout porté sur le prélèvement des bivalves Elliptio complanata et Anodonta grandis.

Lors des campagnes de juillet et septembre, deux façons de procéder ont été adoptées, selon qu'on s'intéressait aux plantes ou aux mollusques. A chaque station relative aux plantes, cinq spécimens de N. variegatum étaient prélevés avec leur rhizome; une carotte de sédiment était également prélevée près de chacun des rhizomes. Les strates 0-2 cm et 8-10 cm de chacune des carottes étaient conservées. A chaque station relative aux mollusques, ces derniers étaient prélevés dans une surface de rayon d'environ 20 mètres. Les sédiments étaient prélevés à l'aide d'une benne (2 à 7 échantillons au besoin) à l'intérieur de cette surface. Seule la couche superficielle de ces sédiments était conservée.

Les méthodes de traitement et d'analyse des différents échantillons prélevés ont différé quelque peu, selon qu'ils étaient reliés aux plantes ou aux mollusques (sections 4.2 à 4.9). Ainsi, les échantillons de sédiments reliés aux plantes (strates 0-2 cm et 8-10 cm des carottes) ont été tamisés par voie humide et la fraction granulométrique <850 μm a été retenue pour y déterminer la spéciation de Cu, Pb, Zn, Fe; par ailleurs, pour les échantillons de sédiments reliés aux mollusques (sédiments superficiels), la fraction granulométrique <70 μm (qui est ingérée par les bivalves) était conservée pour y déterminer la spéciation des mêmes métaux. La méthode utilisée pour déterminer la spéciation des métaux traces particulières (M) faisait appel à des extractions successives qui permettent de distinguer les métaux: i) échangeables, M(F1); ii) associés aux carbonates ou adsorbés spécifiquement, M(F2); iii) associés aux oxydes de fer et de manganèse, M(F3); iv) associés à la matière organique ou aux sulfures, M(F4); résiduels, M(F5). Les métaux extraits étaient dosés par spectrophotométrie d'ab-

sorption atomique à la flamme. Les spécimens de N. variegatum étaient séparés en deux parties, tiges et rhizomes, qui étaient séchées et broyées. Pour une station donnée, selon le cas, on mélangeait ensemble chacune des parties des cinq spécimens récoltés pour former des échantillons composés ou, encore, on les conservait telles quelles pour les analyser individuellement. Les bivalves étaient disséqués en différents organes: pied, muscle, masse viscérale, foie, branchies, manteau et oeufs, après avoir enlevé le tube digestif qui contenait des sédiments. Chacun des organes (incluant le tube digestif) était séché et pesé avant analyse. La coquille, après l'avoir mesurée et pesée, servait à déterminer l'âge de l'organisme. Tous les échantillons biologiques (tiges et rhizomes des plantes; organes (sauf le tube digestif) des bivalves) étaient digérés et on y déterminait les teneurs en Cu, Pb, Zn, Fe et Mn par spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme.

Plusieurs résultats intéressants concernant les bivalves se dégagent de ce travail (section 6.3). Des relations importantes sont mises en évidence entre les teneurs des métaux traces dans les bivalves (ou dans leurs organes) et les concentrations de ce métal dans différentes fractions géochimiques des sédiments, notamment dans la fraction 3 (métaux associés aux oxydes de fer et de manganèse). L'identification de ces relations $[M(\text{bivalves})] - [M(\text{sédiments})]$ constitue une étape importante dans le processus d'évaluation de la fraction des métaux traces particulaires qui est disponible aux organismes biologiques; les résultats de cette étude renforcent l'idée que seulement une partie des métaux traces particulaires est accessible aux organismes benthiques. De plus, ces résultats laissent entrevoir la possibilité d'utiliser des réactifs chimiques (par exemple la combinaison chlorure d'hydroxylamine - acide acétique) pour extraire des sédiments la fraction des métaux traces qui pourrait être accessible aux organismes biologiques. Les résultats présentent également de l'intérêt dans l'optique de l'instauration d'un réseau de "monitoring" des métaux traces en se servant de bivalves pour estimer les concentrations de métaux disponibles aux organismes biologiques. Pour envisager un tel réseau, il serait cependant nécessaire de bien connaître les relations $[M(\text{bivalves})] - [M(\text{sédiment et/ou eau})]$ et d'évaluer les facteurs qui influencent ces relations.

Les résultats des teneurs en métaux dans les bivalves montrent, à chaque station, des écarts types importants qui ne sont pas dus uniquement à la variabilité analytique. On a en effet mis en évidence des variations non négligeables de teneurs en métaux traces en fonction du sexe et de l'âge pour Anodonta grandis. Etant donné le nombre relativement faible d'individus analysés à chaque station, les données actuelles ne nous permettent pas de quantifier ces variations. Il n'en demeure pas moins qu'il serait essentiel de les quantifier, dans l'éventualité de l'instauration d'un réseau de "monitoring" si on voulait générer des résultats interprétables.

Les coefficients de corrélations obtenus entre [M(bivalves)] et [M(sédiments)] mettent en évidence le rôle protecteur que joue le fer présent dans les sédiments (probablement les oxydes de fer). En effet, les meilleures relations sont généralement observées lorsqu'on divise les concentrations du métal dans les sédiments par celles du fer. Ce comportement peut s'expliquer de plusieurs façons. Si l'ingestion des solides est une source importante de métaux traces pour le bivalve, on peut penser à deux types de compétition dans le système digestif de l'animal: i) compétition, entre Fe et le métal libérés simultanément des sédiments, pour les sites de réaction dans le système digestif; ii) compétition entre les oxydes de fer (non digérés dans le tractus) et les sites de réaction dans le tractus pour le métal libéré des sédiments. Ces résultats peuvent également s'expliquer, même dans l'éventualité où les bivalves captent les métaux à partir de la solution, si on invoque un modèle où il y aurait équilibre entre différentes phases des sédiments et l'eau ambiante et où la concentration de métal en solution serait inversement proportionnelle à la concentration de substrats solides qui peuvent retenir le métal (en l'occurrence ici les oxydes de fer).

En ce qui concerne les résultats obtenus avec la plante considérée dans cette étude, Nuphar variegatum, peu de relations sont observées entre les teneurs en métaux traces dans les tiges ou les rhizomes et les concentrations totales de ces métaux dans les sédiments. Par ailleurs, davantage de corrélations se manifestent entre les concentra-

tions de métaux dans la plante et celles dans différentes fractions géochimiques des sédiments (F1 → F5). Cette observation suggère que seulement une partie des métaux dans les sédiments est disponible à N. variegatum et démontre l'intérêt de déterminer la spéciation des métaux traces dans les sédiments.

De l'analyse des relations [M(rhizome)] - [M(tige)] et [M(sédiments)] - [M(rhizome ou tige)], il semble qu'une partie appréciable du contenu en cuivre de N. variegatum provient des sédiments; la concentration de cuivre dans la fraction 2 constitue le meilleur indice de la biodisponibilité du cuivre dans les sédiments. Par ailleurs, le contenu de N. variegatum en zinc semble provenir essentiellement de la colonne d'eau; de nombreuses corrélations sont observées entre le zinc dans différentes fractions géochimiques des sédiments et le zinc dans les tiges de la plante, mais elles semblent traduire l'influence commune du zinc en solution dans la colonne d'eau, plutôt qu'une relation de cause à effet. Pour sa part, le contenu en fer des rhizomes de N. variegatum semble partiellement tiré des sédiments; la concentration de fer dans la fraction 3 (normalisée par la teneur en soufre du sédiment) semble le meilleur indice de la biodisponibilité du fer dans les sédiments. Le fer dans les tiges de la plante semble cependant provenir plutôt de la colonne d'eau. D'après l'ensemble de ces résultats, il ressort que N. variegatum pourrait servir comme indicateur de la biodisponibilité du cuivre dans les sédiments. Pour les autres métaux étudiés (Fe, Zn), il semble que l'accumulation directe à partir de la colonne d'eau vient masquer des relations potentielles entre les concentrations de ces métaux dans les sédiments et celles dans les plantes.

Dans l'optique de l'intégration de plantes aquatiques supérieures dans un réseau de surveillance des métaux traces dans le milieu aquatique, il serait souhaitable de prélever toutes les plantes à la même période de l'année (pendant le même stade de croissance, avant le début de la sénescence) et de recueillir plusieurs spécimens à chaque site, en vue de préparer un échantillon composite pour minimiser l'effet de

la variation inter-plante à chaque station. Les résultats de cette étude permettent également de faire quelques suggestions concernant les types de plantes aquatiques à prélever et les parties de plantes à analyser dans le contexte d'un réseau de surveillance.

ABSTRACT

The main objective of this study was to examine relationships between trace metal partitioning in the sediments and trace metal accumulation in benthic organisms.

To meet the main objective, we sought a site which ideally would satisfy the following requirements: i) trace metal concentrations above the detection limits in both sediments and organisms; ii) a gradient in the trace metal levels in the sediments; iii) similar mineralogy at all the stations sampled; iv) presence of common benthic organisms at each station. After consultation of the pertinent literature and discussion with many scientists involved in environmental research in Quebec, the mining area of Rouyn-Noranda was selected.

Sampling was performed in May, July and September. The May campaign was of preliminary character and served to plan the sampling of the two following campaigns; its goals were i) to search for a trace metal concentration gradient in the sediments; ii) to obtain information concerning plants and benthic organisms; iii) to settle logistic aspects of the next two sampling campaigns. In this context, sediment samples were taken at 46 stations distributed in lakes Beauchastel, la Bruère and Routhier; trace metal concentrations were measured in hot concentrated HNO_3 extracts of these samples. At each station, the sediments were examined for the presence of benthic organisms or plant residues; at some stations, a diver obtained pelecypods for identification. The measurements and field observations permitted improved planning of the subsequent campaigns, especially with regard to the selection of appropriate sampling stations.

During the July campaign, emphasis was placed on the sampling of aquatic plants. After identifying at many stations the aquatic plants that were present, it was found that Nuphar variegatum was almost omnipresent; this plant was thus chosen for the study and its presence conditioned the selection of a sampling station. For the September sampling campaign, the emphasis was put on the sampling of the bivalves Elliptio complanata and Anodonta grandis.

During the July and September campaigns, two slightly different field procedures were adopted, depending on whether the sampling station was a "plant" station or a "mollusc" station. At each "plant" station, five specimens of N. variegatum were collected with their rhizomes and a sediment core was taken close to each rhizome. The 0-2 cm and 8-10 cm layers of each core were retained for chemical analysis. At each "mollusc" station, the pelecypods were collected by a diver within an area of about 20 meters in radius. The sediments were sampled with an Ekman dredge (2 to 7 samples) within the same area; only the surficial layer was retained.

The procedures for the processing and analysis of the samples were also slightly different depending on whether they pertain to a "plant" or a "mollusc" station. The sediment samples related to "plant" stations were wet sieved and the <850 μm granulometric fraction was retained for the Cu, Pb, Zn and Fe partitioning, whilst the sediment samples related to "mollusc" stations were also wet sieved, but the <70 μm granulometric fraction (which is ingested by the bivalvs) was retained for the determination of trace metal partitioning. The partitioning of trace metals was obtained with a sequential extraction procedure; the following trace metal fractions were obtained: i) exchangeable, M(F1); ii) associated with carbonates and/or specifically adsorbed, M(F2); iii) associated with iron and manganese oxides, M(F3); iv) associated with organic matter and/or sulfides, M(F4); v) residual, M(F5). The trace metal concentrations were measured in the extracts by flame atomic absorption spectrophotometry. The specimens of N. variegatum were separated into stem and rhizome, dried and ground separately. For a given station, the trace metal analyses were performed on each specimen or on a composite sample of the five specimens. The bivalves were separated into: foot, muscles, visceral mass, liver, gills, mantle and eggs, after removing the digestive tract which was contaminated with sediments. Each organ (including the digestive tract) was dried and weighed before the analysis. The shells were measured and weighed, and served to determine the age of the organisms. All the biological samples were digested and the concentrations of Cu, Pb, Zn, Fe and Mn were determined by flame atomic absorption spectrophotometry.

Important relationships between trace metal levels in the bivalves (or in their organs) and the concentrations of these metals in various geochemical fractions of the sediments (especially in fraction 3, i.e. associated with Fe and Mn-oxides) were found. The finding of such relationships $[M(\text{bivalves})] - [M(\text{sediments})]$ is an important step in the process of evaluating the fraction of particulate trace metal which is available to aquatic organisms; the results of this study reinforce the suggestion that only a part of the total particulate trace metal is available to aquatic organisms. The results suggest that some chemical reactants (e.g. a combination of hydroxylamine hydrochloride and acetic acid) could be used to extract from the sediments the fraction of trace metals that could be available to aquatic organisms. The results may also be of interest for the purpose of a trace metal monitoring network where bivalves would be used to estimate the trace metal levels available to aquatic organisms; it would then be necessary to determine the relationships $[M(\text{bivalves})] - [M(\text{sediments and/or water})]$ and the factors that influence these relationships.

The observed trace metal levels in the bivalve specimens at a given station show standard errors that are higher than the analytical variability; variation in trace metal level with age or sex of individuals are demonstrated for A. grandis but the number of individuals analysed at each station was insufficient to quantify these variations. However, it would be necessary to quantify these relationships if interpretable results are to be generated in a monitoring network.

The linear correlation coefficients obtained for the relationships $[M(\text{bivalves})] - [M(\text{sediments})]$ demonstrated the protective role of iron in the sediments (probably the Fe-oxides). The best correlation coefficients are indeed obtained when the trace metal concentration in the sediment is divided by that of iron. Explanations for this behavior are given. If the ingestion of solid material is the major source of trace metals for the bivalve, two types of competition are possible: i) competition, between Fe and the trace metal liberated simultaneously from the sediments, for the reactive sites in the digestive tract; ii) competition between Fe-oxides (undigested in the tract) and the react-

ive sites in the tract for the trace metal liberated from the sediments. The same result would also be explained if the major source of trace metals for the bivalve is the soluble phase if equilibrium between water and various phases of the sediments is assumed; the trace metal concentration in solution could then conceivably be inversely proportional to the concentration of solid substrates which retain the metal (in this case Fe-oxides).

For the aquatic plant N. variegatum, few relationships were found between trace metal levels in the stem or in the rhizome and the total metal concentrations in the sediments. On the other hand, some correlations are observed between trace metal concentrations in the plants and those in various geochemical fractions of the sediments. These observations suggest that only a fraction of the metal content of the sediments is available to N. variegatum and demonstrate the importance of measuring trace metal partitioning in the sediments.

Examination of the relationships $[M(\text{rhizomes})] - [M(\text{stems})]$ and $[M(\text{sediments})] - [M(\text{rhizomes/or stems})]$ suggests that an important part of the copper content in N. variegatum comes from the sediments; the copper concentration in the second leachate ($[M(F2)]$) seems to be the best indicator of the available copper towards the plant. On the other hand, the zinc content in N. variegatum seems to originate essentially from the water column. Indeed, correlations between rhizome and sediment were non significant, while many correlations were observed between zinc concentrations in various geochemical fractions and zinc levels in the stems. Thus the latter seem to represent the common influence of zinc in solution in the water column, rather than a cause-effect relationship. The iron content in the rhizome of N. variegatum seems to originate partially from the sediments; the iron concentration in the third leachate (normalized with the sulphur content in the sediment) seems to be the best indicator of the iron availability in the sediments. Iron in the stem seems however to originate from the water column. Our results suggest that N. variegatum could be used as an indicator of particulate copper availability to aquatic plants. For the other metals studied (Fe, Zn), accumulation from the water column,

could mask potential relationships between trace metal concentrations in the sediments and those in the plant.

In the context of a trace metal monitoring network involving aquatic plants, it would be desirable to collect all the specimens at the same period of the year (during the same period of growth, before senescence), and to collect numerous specimens to be mixed at each station so as to minimize the inter-specimen variation. Based on the results obtained in this study, some suggestions are made concerning the type of aquatic plants to collect and the parts to analyse in the context of a monitoring network.

AVANT-PROPOS

Cette étude a été réalisée suite à une proposition spontanée adressée au ministère des Approvisionnements et Services du Canada, après avoir discuté de son intérêt avec des scientifiques d'Environnement Canada, notamment monsieur Gaétan Duchesneau. Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la participation de plusieurs personnes qui nous ont aidés à plusieurs niveaux. Nous tenons à remercier plus particulièrement:

- . Monsieur Gaétan Duchesneau d'Environnement Canada, du support qu'il nous a accordé dans la soumission du projet;
- . Monsieur Normand Bermingham d'Environnement Canada, des commentaires constructifs qu'il a formulés tout au long du travail et de l'excellent travail qu'il a effectué comme conseiller scientifique;
- . Monsieur Meno Speyer, du Centre de recherche Noranda Mines pour ses conseils judicieux sur les sites à échantillonner, les voies d'accès, les organismes biologiques présents, etc. (nous tenons à souligner la coopération dont ont fait preuve les scientifiques de Noranda Mines en nous donnant accès à leurs résultats et en facilitant notre tâche);
- . Dr. Daniel Cossa, de Pêches et Océan Canada, qui nous a conseillés sur l'analyse des pélécy-podes;
- . Monsieur Louis Villemure du ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche du Québec, pour nous avoir donné accès à des laboratoires et entrepôts du ministère à Rouyn-Noranda et également, pour nous avoir prodigué de nombreux conseils sur les aspects logistiques du travail de terrain;

- . Mesdames Claudette Dupont, Renée Martial et HÉLÈNE Weber du ministère de l'Environnement du Québec et monsieur H. Sloterdijk d'Environnement Canada dont les commentaires nous ont aidés à choisir le site de l'étude;
- . Dr. Andrew Forester, de l'Université de Toronto, spécialiste des mollusques d'eau douce, qui nous a accompagnés lors de la campagne d'échantillonnage de mai et qui nous a conseillés sur l'échantillonnage des mollusques;
- . Messieurs Jean Deshayes et Doug Sherman qui nous ont accompagnés lors des campagnes d'échantillonnage de juillet et septembre pour prélever respectivement les plantes aquatiques et les mollusques;
- . Les techniciens de l'INRS-Eau, notamment madame Lise Hamel, pour leur travail consciencieux.

Enfin, nous tenons à souligner les contributions de monsieur André Parent qui a tracé les nombreuses figures et de madame Johanne Parrot qui a patiemment dactylographié le texte.

1. INTRODUCTION

1.1 Importance de la spéciation des métaux traces particulières

Les métaux traces sont introduits dans les eaux de surface par dissolution/ altération des minéraux d'un bassin versant ou par l'activité humaine. Au cours des dernières années, le flux de plusieurs métaux traces d'origine anthropique a augmenté dans l'environnement aquatique (Forstner et Wittman, 1981). L'accumulation résultante de certains métaux dans la chaîne alimentaire, leur toxicité envers des organismes aquatiques et leur danger potentiel dans les eaux de consommation ont amené à la fois les scientifiques et les autorités gouvernementales à s'intéresser à ces problèmes.

Dans le contexte de la contamination du milieu aquatique par les métaux traces, des domaines d'intérêt spécifiques au Québec comprennent les activités minières et de raffinage des métaux. Les opérations minières sont en effet nombreuses, notamment dans le nord-ouest québécois où on exploite entre autres, des mines de cuivre, de nickel, de plomb et de zinc. Une partie importante des métaux traces provenant de diverses sources (unités de traitement du minerai, parc à déchets, etc.) se retrouve finalement sous forme particulaire et est entraînée plus ou moins en aval des points de rejets, en fonction de la granulométrie et de caractéristiques hydrologiques du cours d'eau (ex. crues).

L'évaluation de la disponibilité biologique des métaux traces particulières revêt une grande importance, étant donné qu'une telle évaluation aura une influence sur le type et les niveaux de traitement à exiger des industries et impliquera ainsi des montants d'argent importants. On considère ici comme bio-disponibles, les formes particulières d'un métal qui mènent à une accumulation du métal dans des organismes aquatiques. Certaines formes de métaux traces particulières peuvent passer en solution (p.e. lorsque les conditions environnementales sont changées: pH, E_H) et, subséquemment, être captées par des organismes. Les métaux traces particulières peuvent également être

ingérés directement, c'est-à-dire sans solubilisation préalable, et ensuite être assimilés à partir du tractus intestinal de l'organisme. Une fois introduit au niveau cellulaire, que ce soit par l'une ou l'autre de ces voies, le métal peut s'accumuler dans l'organisme.

Pour évaluer les effets nuisibles de rejets de métaux traces, les instances gouvernementales disposent actuellement de peu de moyens, sinon de la mesure des concentrations totales de métaux traces, M_T , dans les sédiments. L'emploi de M_T comme critère pour évaluer les effets potentiels des métaux traces dans les sédiments implique que toutes les formes d'un métal donné produisent le même effet sur l'environnement; il s'agit là d'une hypothèse difficile à soutenir. En effet, les métaux traces peuvent être présents dans les sédiments sous des formes qui les rendent plus ou moins disponibles aux organismes biologiques.

Les métaux traces introduits dans le milieu aquatique se distribuent entre les sédiments (formes particulières) et l'eau (formes dissoutes). Dans les sédiments, les métaux traces se répartissent selon différentes formes chimiques, p.e. associés à la matière organique, à des sulfures, des carbonates, des oxydes de fer et de manganèse (Forstner et Wittman, 1981; Oakley et al., 1981, Tessier et al., 1980). Des méthodes d'extractions "sélectives" des sédiments, permettant de déterminer la spéciation des métaux traces particulières, c'est-à-dire leur répartition entre différentes formes ou phases du sédiment, ont été développées récemment (Gibbs, 1977; Gupta et Chen, 1975; Tessier et al., 1979) et utilisées avec profit (Gibbs, 1977; Tessier et al., 1980). Quoique ces méthodes demeurent jusqu'à un certain point définies opérationnellement, leur utilisation présente un avantage certain sur la détermination de la concentration totale des métaux traces dans les sédiments puisqu'elle permet un certain pouvoir de prédiction sur les concentrations de métaux qui seront solubilisées dans des conditions environnementales particulières.

Quoique l'existence de différentes formes physico-chimiques des métaux traces ait été supposée depuis assez longtemps, la plupart des chercheurs se sont contentés d'essayer de relier les concentrations totales des métaux traces particulières à leurs effets sur les organismes aquatiques; ces diverses tentatives ont été couronnées de peu de succès (Bryan et Hummerstone, 1978; Luoma et Bryan, 1978, 1979). Par ailleurs, les relations entre la spéciation des métaux traces dans les sédiments et leur disponibilité biologique demeurent, pour le moment, plutôt spéculatives (Gibbs, 1977; Gupta et Chen, 1975). Un pas important sera franchi lorsqu'on aura identifié expérimentalement les formes de métaux traces particulières qui sont disponibles aux organismes biologiques.

Ce qui précède montre l'importance d'identifier les formes de métaux traces particulières qui peuvent être disponibles aux organismes biologiques si on veut espérer évaluer: i) la toxicité actuelle d'un milieu aquatique; ii) la toxicité qui peut être induite dans un milieu aquatique suite à des changements apportés par l'homme. Ces informations permettraient en effet de sélectionner les réactifs nécessaires pour déterminer "sélectivement" les formes de métaux traces particulières bio-disponibles.

1.2 Les plantes aquatiques supérieures (macrophytes)

Depuis environ 15 ans, un nombre croissant de chercheurs s'intéressent aux relations entre les macrophytes et les métaux traces, et ceci pour deux raisons principales: (1) le rôle possible des macrophytes dans le cycle biogéochimique de certains métaux, en mobilisant les métaux présents dans les sédiments (Lee et al., 1976; Welsh et Denny, 1976; McIntosh et al., 1978; Gallagher et Wolf, 1980; Larsen et Schierup, 1981); et (2) l'emploi possible de ces plantes comme bio-indicateurs de la présence dans leur milieu de métaux traces "disponibles" (Adams et al., 1973, Dietz, 1973; Hutchinson et al., 1975; Ray et White, 1976 et 1979; Franzin et McFarlane, 1980; Aulio, 1980). Ce double intérêt découle de l'observation générale que les concentrations

de plusieurs métaux traces chez les macrophytes sont souvent beaucoup plus grandes que celles dans les eaux qui les entourent; à titre d'exemple, Dietz (1973) rapporte des facteurs de concentration pouvant atteindre 13200 (Cu), 28200 (Zn) et 8100 (Pb) pour les parties vertes de plantes submergées récoltées à différents sites dans le bassin versant de la rivière Rhur en Allemagne. Sur ce point, notons immédiatement que plusieurs études montrent que la distribution d'un métal dans une plante donnée n'est pas homogène (Hutchinson et al., 1975; Harding et Whitton, 1978; Mudroch et Capobianco, 1978; Welsh & Denny, 1980; Aulio, 1980), les parties en contact intime avec les sédiments (racines, rhizomes) et les organes reproductifs ayant souvent des concentrations plus élevées que celles observées dans les tiges et les feuilles se trouvant dans la colonne d'eau.

L'assimilation et la bioaccumulation des métaux traces dans les parties vertes des macrophytes peut se faire selon deux voies; la première implique une assimilation directement à partir de l'eau alors que la seconde présuppose une assimilation au niveau des sédiments et une translocation subséquente à partir des racines vers les tiges et les feuilles. Cette même dualité de mécanismes existe pour d'autres solutés chez les macrophytes (Denny, 1980), les deux voies pouvant se manifester dans la même espèce. A partir d'une revue de la littérature, on a pu identifier plusieurs facteurs qui influent sur l'une ou l'autre de ces deux voies, et qui peuvent alors influencer la bio-accumulation des métaux traces par les macrophytes. Pour les fins de ce rapport, il convient de les considérer sous les deux rubriques suivantes: "conditions environnementales" et "variables biologiques".

Conditions environnementales

- . l'identité même du métal (Denny, 1980);
- . la concentration du métal dans l'eau (Dietz, 1973; Hutchinson et al., 1975);

- . la concentration du métal dans les sédiments (Harding et Whitton, 1978; Mudroch et Capobianco, 1978; Welsh et Denny, 1980; Aulio, 1980);
- . la concentration du calcium dans l'eau (Kinkade et Erdman, 1975; Franzin et McFarlane, 1980);
- . les concentrations du fer et du phosphore dans les racines (Lee et al., 1976; Vorob'yev et Afanas'yeva, 1973);
- . le gradient de concentration entre les sédiments et l'eau susjacente (Denny, 1980).

Variables biologiques

- . l'anatomie de la plante (p.e. système vasculaire; système racinaire) (Welsh et Denny, 1979);
- . le rapport surface/volume de la plante (Denny, 1980; Franzin et McFarlane, 1980);
- . la physiologie de la plante (p.e. précipitation de carbonates sur les feuilles) (Cooley et al., 1979; Mudroch, 1980);
- . le développement de la plante, le cycle végétatif annuel (Mayes et al., 1977; Mudroch et Capobianco, 1978).

A partir de cette compilation, on peut dégager des critères de sélection pour guider le choix de plantes à employer comme bio-indicateurs de métaux traces particulières (cf. Ray et White, 1976 et 1979). Idéalement, il nous faudrait une espèce ayant les attributs suivants:

- (1) omniprésence et abondance (représentative du site, de la région d'étude);

- (2) tolérance pour les métaux traces;
- (3) caractéristiques anatomiques facilitant l'identification sur le terrain et la collecte des spécimens;
- (4) facteur de concentration élevé; grande capacité de bio-accumulation;
- (5) système de tiges/feuilles peu ramifié, afin de minimiser le rapport surface/volume et réduire ainsi l'assimilation de solutés (métaux) à partir de l'eau;
- (6) système racinaire et vasculaire développé; capacité d'assimiler des solutés (métaux) à partir des sédiments et de les transporter vers les parties supérieures de la plante.

De tous ces critères, c'est probablement le dernier qui est le plus important pour la présente étude; malheureusement, il s'agit également d'une propriété peu connue chez les macrophytes. En effet, très peu d'études expérimentales ont été réalisées pour mettre en évidence l'assimilation des métaux traces par les racines et la translocation de ces métaux vers la tige et le feuillage. D'après notre revue de la littérature (voir aussi Denny, 1980), les seules espèces submergées où on a démontré la translocation acropète des métaux sont les suivantes: Elodea canadensis (Hg - Mortimer et Kudo, 1975; Cd, Pb - Mayes et al., 1977); Myriophyllum exalbescens (Fe, Ca - DeMarte et Hartman, 1974); Myriophyllum heterophyllum (Cu, Zn - Cushing et Thomas, 1980); Vallisneria spiralis (Fe - Gentner, 1977); Potamogeton crispus et P. pectiratus (Cu, Zn mais non Pb - Welsh et Denny, 1979 et 1980); Potamogeton richardsonii (Zn mais non Cu - Cushing et Thomas, 1980). Parmi les plantes émergentes trouvées dans les marécages d'eaux douces, signalons l'espèce Cyperus esculentus pour laquelle on a démontré la translocation de certains métaux dans des spécimens cultivés au laboratoire en culture hydroponique (Cd, Ni, Zn mais non Cr, Pb - Lee et al., 1976). Devant ce manque de renseignements relativement au dernier

critère de sélection, et malgré l'importance capitale de ce critère, le choix définitif d'une plante comme bio-indicateur des métaux traces particulières devra malheureusement s'inspirer surtout des critères 1 à 5 (voir les sections 4.1 et 4.6).

1.3 Macroinvertébrés benthiques (pélécypodes)

Quelques travaux récents de laboratoire (Luoma et Jenne, 1976, 1977) laissent entrevoir la possibilité d'identifier "in situ" des formes de métaux traces particulières qui sont disponibles aux organismes biologiques benthiques. Lors de ces expériences, les organismes (Macoma balthica) étaient mis en présence de phases solides choisies (oxydes de fer ou de manganèse, carbonates, débris organiques) dans lesquelles des radioisotopes de métaux traces (Ag, Cd, Co, Zn) avaient été incorporés; le dispositif expérimental comprenait une membrane à dialyse pour isoler certains organismes des phases solides, ce qui permettait de distinguer la bio-accumulation des métaux traces directement de la solution de celle par ingestion des solides. Ces travaux de Luoma et Jenne montrent, entre autres: i) que les deux voies pour la bio-accumulation (directement de la solution; ingestion des solides) peuvent être importantes; ii) que, pour un métal donné, la bio-disponibilité varie d'une forme particulière à l'autre; iii) que, pour une forme particulière donnée, la bio-disponibilité varie d'un métal à l'autre.

Par ailleurs, il existe quelques évidences "in situ" de relations entre la bio-accumulation d'un métal et certaines formes de ce métal dans les sédiments. Luoma et Bryan (1978) ont trouvé une excellente corrélation ($r = 0.99$; $N = 37$) entre les teneurs de Pb dans Scrobicularia plana et le rapport $[Pb]/[Fe]$ dans les extraits de sédiments obtenus avec HCl 1N; les échantillons provenaient de 17 estuaires. D'autres corrélations, quoique beaucoup plus faibles ont également été trouvées (Luoma et Bryan, 1981) entre: Cd dans S. plana et Cd dans les sédiments extraits avec HCl 1N ($r = 0.54$; $N = 50$); Co dans

S. plana et Co dans les sédiments extraits avec HCl 1N, avec de l'acétate d'ammonium 1N ou avec de l'oxalate d'ammonium 0.4N ($r = 0.55 - 0.57$; $N = 50$). Les mêmes auteurs (Luoma et Bryan, 1979) ont trouvé une corrélation entre les teneurs en Zn dans S. plana et Zn dans les sédiments extraits avec l'acétate d'ammonium 1N ($r = 0.62$; $N = 40$) de même qu'avec HNO_3 concentré ou HCl 1N ($r = 0.48$; $N = 40$).

Bivalves comme espèces indicatrices. L'utilisation des mollusques bivalves comme indicateurs biologiques de la pollution par les métaux traces a fait l'objet de nombreux travaux en milieu marin; Phillips (1977) en a fait une revue critique. Considérant ces divers travaux, on peut dégager certains points qui militent en faveur de l'utilisation de ces organismes pour vérifier des relations entre la spéciation des métaux traces et la bio-accumulation:

- . les bivalves sont reconnus pour accumuler une grande variété de substances toxiques, notamment de métaux traces, sans pour autant subir de dommages apparents (Wright, 1978; Phillips, 1977; Pringle et al., 1968; Fowler et al., 1978; Bryan, 1971; Romeril, 1971a; Brooks et Rumsby, 1965; George et Coombs, 1977; Kumaraguru et Ramamoorthi, 1979; Schulz-Baldes, 1974; Frazier, 1979; Jones et Walker, 1979; Forester, 1980);
- . ce sont des organismes filtreurs (filter-feeders); ils obtiennent donc les métaux traces de l'eau et de l'ingestion de nourriture et de particules inorganiques (Phillips, 1977; Schulz-Baldes, 1974; Bryan, 1971; Wright 1978);
- . ils sont sédentaires, ou du moins possèdent une motilité limitée; ils représentent donc une intégration dans le temps en un lieu assez restreint (Forester, 1980; Meglitch, 1972; Phillips, 1977; Wright, 1978);
- . ils sont relativement abondants dans un espace limité et facilement identifiables;

- . ils ont une vie assez longue (5-10 ans), ce qui permet l'échantillonnage de plusieurs classes d'âge si désiré; de plus, les lignes de croissance sur la coquille permettent de déterminer l'âge assez facilement (Forester, 1980, Meglitch, 1972; Crowley, 1957);
- . d'un point de vue pratique, ils sont faciles à échantillonner, à transporter et à conserver avant analyse; ils fournissent suffisamment de matériel (tissus) pour les analyses; le contenu des tissus est généralement assez élevé en métaux traces pour qu'on n'ait pas besoin de pré-concentration avant l'analyse.

Par ailleurs, l'utilisation d'organismes biologiques introduit nécessairement des variables biologiques. La littérature sur les bivalves d'eau douce étant très limitée, on se sert ici surtout des travaux sur les bivalves marins pour identifier certains des paramètres biologiques qui peuvent introduire une variabilité biologique dans l'accumulation des métaux traces. Les effets de l'âge, du poids et de la dimension des bivalves sur leur bioaccumulation de métaux traces ont été étudiés par quelques chercheurs; d'après Phillips (1977), ils sont probablement tous reliés. De façon générale, on trouve des effets significatifs mais qui varient d'une espèce à l'autre et d'un métal trace à l'autre. Ainsi, on a identifié des augmentations de concentrations en métaux traces:

- . avec l'âge pour Cu, Zn et Fe dans Mercenaria mercenaria (Romeril, 1971b), pour Hg dans Mytilus edulis (De Wolf, 1975);
- . avec l'inverse de la dimension pour Cu et Fe dans M. mercenaria (Romeril, 1974), pour Pb dans M. edulis (Schulz-Baldes, 1974), pour Cd, Cu, Pb, Zn dans M. edulis (Phillips, 1976), pour Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn dans M. edulis (Cossa et al., 1980);

. avec l'inverse du poids pour Cd dans M. edulis (Cossa et al., 1979), pour Cu, Pb, Zn dans M. edulis (Boyden, 1974).

Des variations saisonnières de concentrations en métaux traces ont été rapportées pour divers bivalves: Cd, Cu, Zn, Fe et Mn dans Crassostrea gigas (Pringle et al., 1968); Cu, Zn et Fe dans Mercenaria mercenaria (Romeril, 1974; 1979; Ag et Cu dans Macoma balthica (Strong et Luoma, 1981); Cd dans Mytilus edulis (Cossa et al., 1980); Cd dans l'huître américaine (Frazier, 1979); Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb dans Pecten maximus et Chlamys opercularis (Bryan, 1973). Comme explications, on suggère que c'est relié à la disponibilité en nourriture (phytoplankton), à des variations dans les apports de métaux traces ou au cycle de la reproduction.

Des différences de concentrations entre les sexes sont également rapportées pour Zn, Mn, Cu, Pb dans Choromytilus meridionalis (Watling et Watling, 1976). Par ailleurs, Lowe et Moore (1979) rapportent que Fe et Zn se distribuent différemment au niveau cellulaire, selon le sexe de l'animal. Plusieurs travaux montrent des variations de teneurs en métaux traces selon les espèces (Frazier, 1979; Pringle et al., 1968; Darracott et Watling, 1975; Thomson, 1979; Jackim et al., 1977; Kumaraguru et Ramamoorthi, 1979; Segar et al., 1971; Leatherland et Burton, 1974; Brooks et Rumsby, 1965); ces variations peuvent avoir plusieurs causes, par exemple, différents habitats locaux, type d'alimentation, métabolisme. D'autres facteurs, tels la température de l'eau (Phillips, 1976), la profondeur de l'échantillon dans le sédiment (Nielsen, 1974; Phillips, 1976) et la présence de plusieurs métaux (Phillips, 1976; Romeril 1971a) peuvent également jouer un rôle sur l'accumulation d'un métal dans les bivalves.

Après avoir discuté ci-dessus des facteurs qui peuvent influencer l'accumulation d'un métal chez les bivalves, mentionnons que plusieurs études montrent que la distribution d'un métal n'est pas homogène dans l'organisme (Brooks et Rumsby, 1965; Segar et al., 1971; Fowler et al., 1978; Pringle et al., 1968; Frazier, 1979; Bryan, 1973; Romeril,

1979; George et al., 1978; Bryan et Uysal, 1978; Janssen et Scholz, 1979; Romeril, 1971a; George et Pirie, 1980; Schulz-Baldes, 1974; Smith et al., 1975; Jones et Walker, 1979; Manly et George, 1977); l'ordre d'accumulation décroissante des organes dépend des métaux et des espèces biologiques. La séparation des bivalves en différentes parties peut s'avérer intéressante et permettre une analyse des relations entre la spéciation des métaux et leur accumulation dans divers organes.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif principal de l'étude est d'identifier des relations entre les teneurs en métaux traces dans des spécimens biologiques habitant les sédiments et la spéciation de ces métaux dans les sédiments provenant du même site. Des objectifs secondaires sont: i) d'évaluer les possibilités d'utiliser certains organismes aquatiques comme indicateurs biologiques de la pollution par les métaux traces; ii) d'obtenir des informations concernant le comportement des métaux traces dans une région d'activités minières.

3. CHOIX DU SITE DE L'ETUDE - HISTORIQUE

Pour rencontrer les objectifs visés, nous avons recherché un site qui, idéalement, devait rencontrer les conditions suivantes:

- i) teneurs en métaux traces plus élevées que le seuil de détection, aussi bien pour les différentes fractions dans les sédiments que pour les organismes biologiques;
- ii) gradient de concentrations totales des métaux traces dans les sédiments pour permettre de choisir plusieurs stations de prélèvement pour lesquelles les concentrations seraient variables;
- iii) minéralogie générale des sédiments semblable (même minéraux majeurs) pour l'ensemble des stations;
- iv) présence d'un ou de plusieurs types d'organismes biologiques benthiques communs à toutes les stations;
- v) accessible à des coûts non prohibitifs.

D'après les renseignements disponibles, la région de Rouyn-Noranda nous semblait offrir d'intéressantes possibilités pour l'étude proposée. Avec l'accord du délégué scientifique, monsieur Norman Bermingham, nous avons donc arrêté notre choix sur cette région. Dans un premier temps, il nous est paru nécessaire de faire une analyse détaillée des données présentées dans le rapport intitulé "Etude écologique de la région de Rouyn-Noranda" publié par l'ancien bureau d'étude sur les substances toxiques du Québec (BEST, 1979). De plus, nous avons pris contact avec des scientifiques qui ont effectué des travaux dans cette région, à savoir:

Madame Claudette Dupont
Ministère de l'Environnement du Québec
Québec

Madame Renée Martial
Ministère de l'Environnement du Québec
Bureau régional de Rouyn-Noranda

Monsieur Harm Sloterdijk
Environnement Canada
Longueuil

Monsieur Meno Speyer
Centre de recherche
Noranda Mines Ltd
Pointe Claire

Madame Héléne Weber
Ministère de l'Environnement du Québec
Québec

Monsieur Louis Villemure
Ministère des Loisirs, Chasse et Pêche du Québec
Bureau régional de Rouyn-Noranda

La lecture du rapport du BEST (1979) nous a permis d'obtenir des renseignements généraux concernant les niveaux de métaux traces dans les sédiments. Malheureusement, on y trouve peu de renseignements relatifs à la présence ou à l'absence de plantes aquatiques et aucune donnée concernant les organismes benthiques. Pour tenter de combler ces lacunes, nous avons rendu visite en avril 1981 à M. M. Speyer (Montréal), ainsi qu'à Mme R. Martial et M. L. Villemure (Rouyn-Noranda). La rencontre avec M. M. Speyer s'est révélée particulièrement intéressante. Le Centre de recherche Noranda procède depuis déjà un certain nombre d'années à des études des lacs environnant la région minière de Rouyn-Noranda. M. Speyer nous a fait part des résultats obtenus par son organisme et nous a fait de nombreuses suggestions concernant notamment les sites à choisir, l'accès à ces sites et la présence d'organismes benthiques. La visite à Rouyn-Noranda, notamment avec M. L.

Villemure, nous a permis de régler nombre d'aspects d'ordre logistique. Entre autres, mentionnons que le ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche nous a aimablement donné accès à un laboratoire, à une chambre froide et à un entrepôt pour ranger le matériel de terrain.

Suite aux différentes tractations décrites brièvement ci-dessus, le choix des lacs à échantillonner a été arrêté (voir Figure 3.1).

Parallèlement aux activités décrites ci-dessus, nous avons pris contact avec le professeur P. Stokes et le docteur A. Forester, tous deux de l'Université de Toronto, qui travaillent dans ce domaine. Le Dr. Forester, spécialiste des mollusques d'eau douce, s'est montré intéressé à collaborer avec nous pour la cueillette des mollusques. D'autre part, des démarches ont été entreprises pour trouver un spécialiste des plantes aquatiques (M. J. Deshayes) pour nous accompagner sur le terrain.

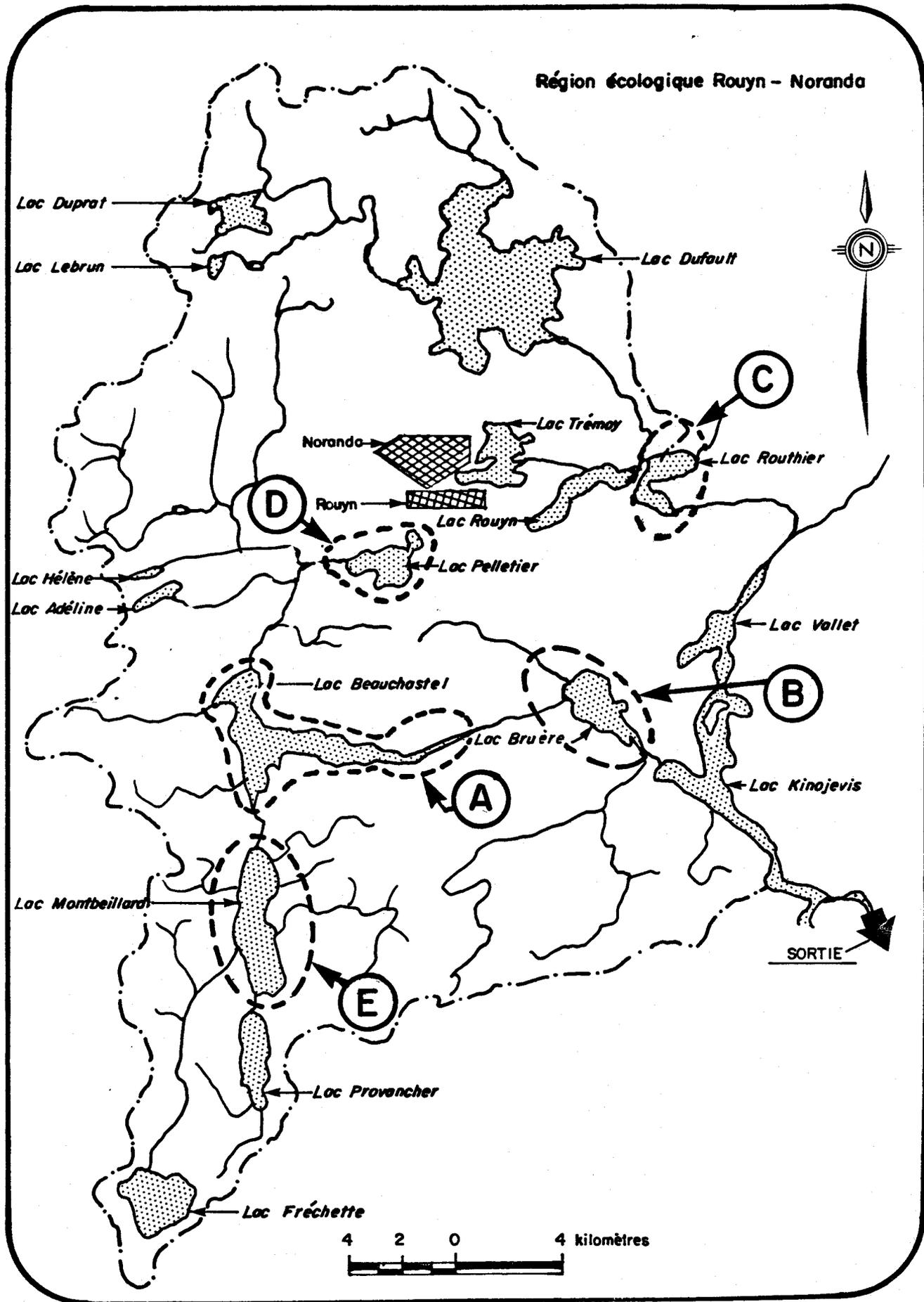


Figure 3.1. Région de l'étude.

4. MATERIEL ET METHODES

Dans cette section, on décrit les différentes campagnes d'échantillonnage, le traitement des échantillons sur le terrain, l'entreposage des échantillons, les traitements en laboratoire et l'analyse.

4.1 Campagnes d'échantillonnage

4.1.1 Campagne de mai 1981

Cette campagne avait pour buts: i) de rechercher un gradient de concentrations de métaux traces dans les sédiments; ii) de rechercher des informations concernant les organismes benthiques et les plantes présents; iii) de régler les derniers aspects logistiques avant le début des campagnes intensives prévues pour l'été. Il s'agissait donc d'une campagne préliminaire qui devait nous permettre de choisir l'emplacement des stations futures, ainsi que les organismes biologiques à échantillonner.

Entre le 18 et le 22 mai, environ 60 échantillons de sédiments ont été prélevés à 46 stations distribuées dans le lac Beauchastel et son exutoire (Figure 4.1), le lac La Bruère (Figure 4.2) et le lac Routhier (Figure 4.3). Une description de la localisation des stations, accompagnée d'observations de terrain, est donnée dans le Tableau A.1, en annexe. La localisation de chaque station était faite en se référant à des traits particuliers du plan d'eau ou du rivage (p.e. embouchures de tributaires; baies; affleurements rocheux; chalets; quais).

A chaque station, l'échantillon de sédiments était prélevé avec une benne Ekman (30.5 cm x 30.5 cm). Après avoir laissé s'écouler lentement l'eau contenue dans l'échantillonneur (pour minimiser l'altération de la couche superficielle du sédiment) la benne était transférée dans le bateau. Un sous-échantillon de sédiments superficiels était ensuite prélevé (environ 2 cm) à l'aide d'une cueillère de plastique, en évitant de prendre des sédiments près des parois de la benne.

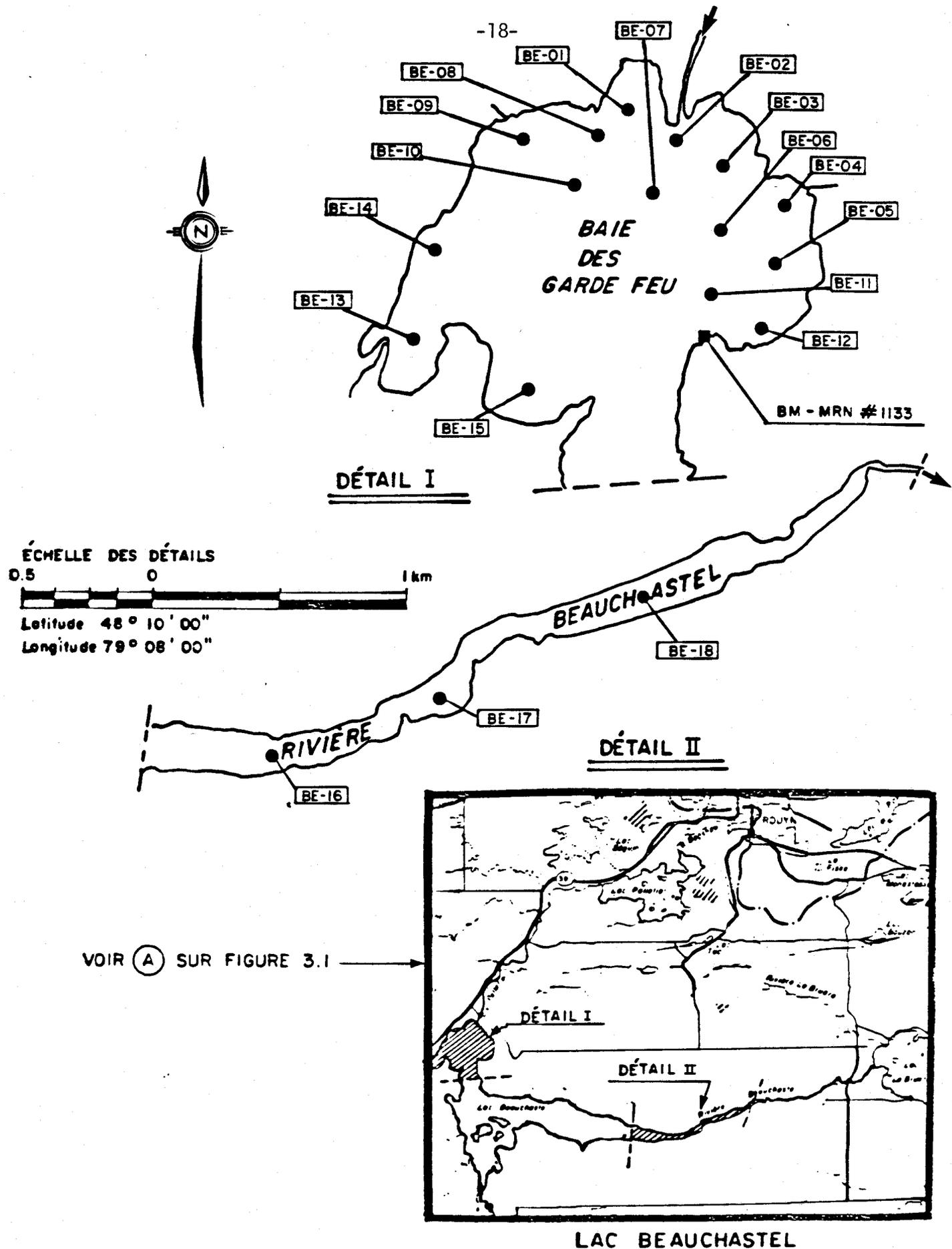


Figure 4.1. Lac Beauchastel - stations d'échantillonnage des sédiments (mai 1981)

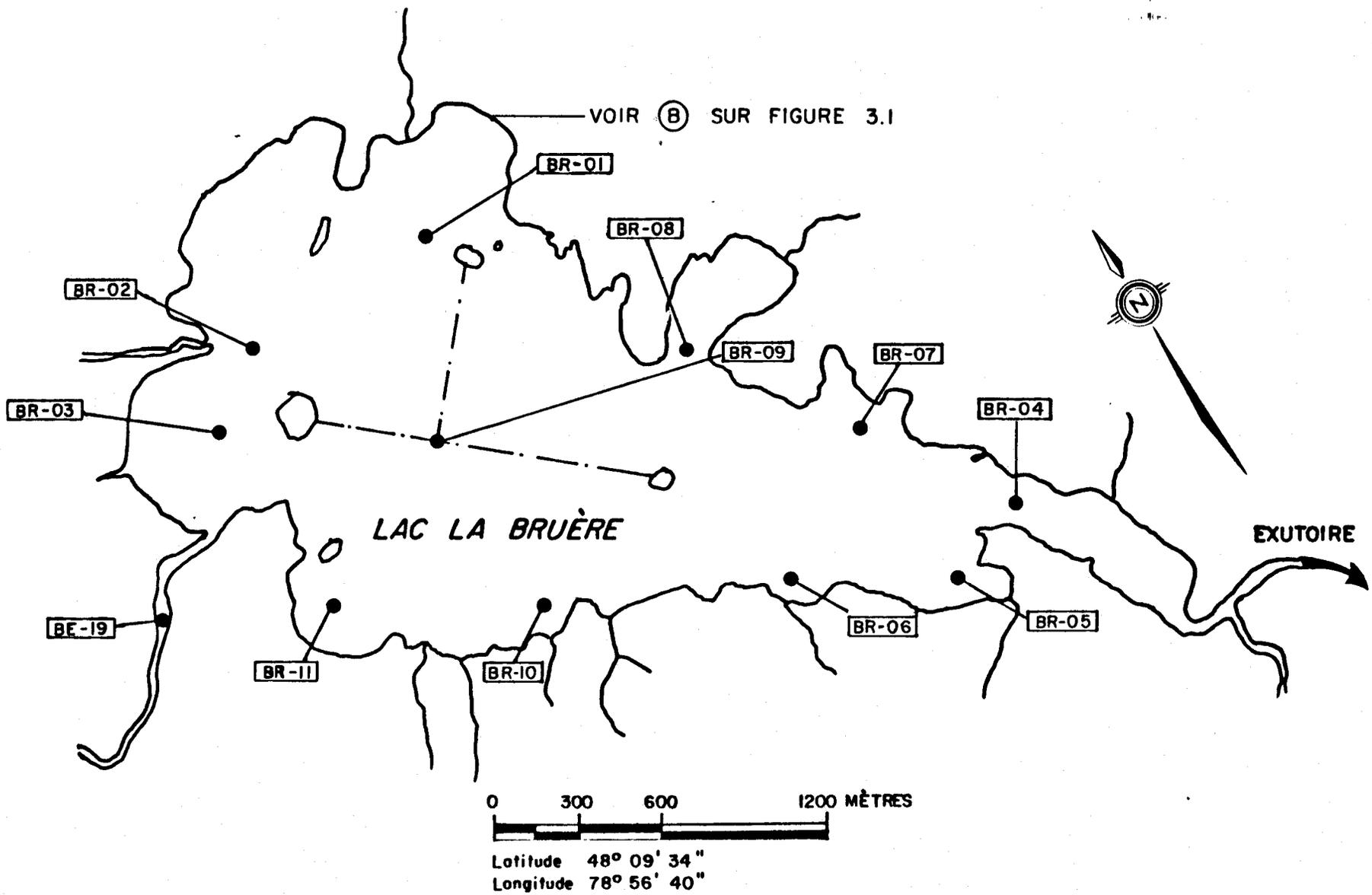


Figure 4.2 . Lac La Bruère - stations d'échantillonnage des sédiments (mai 1981) .

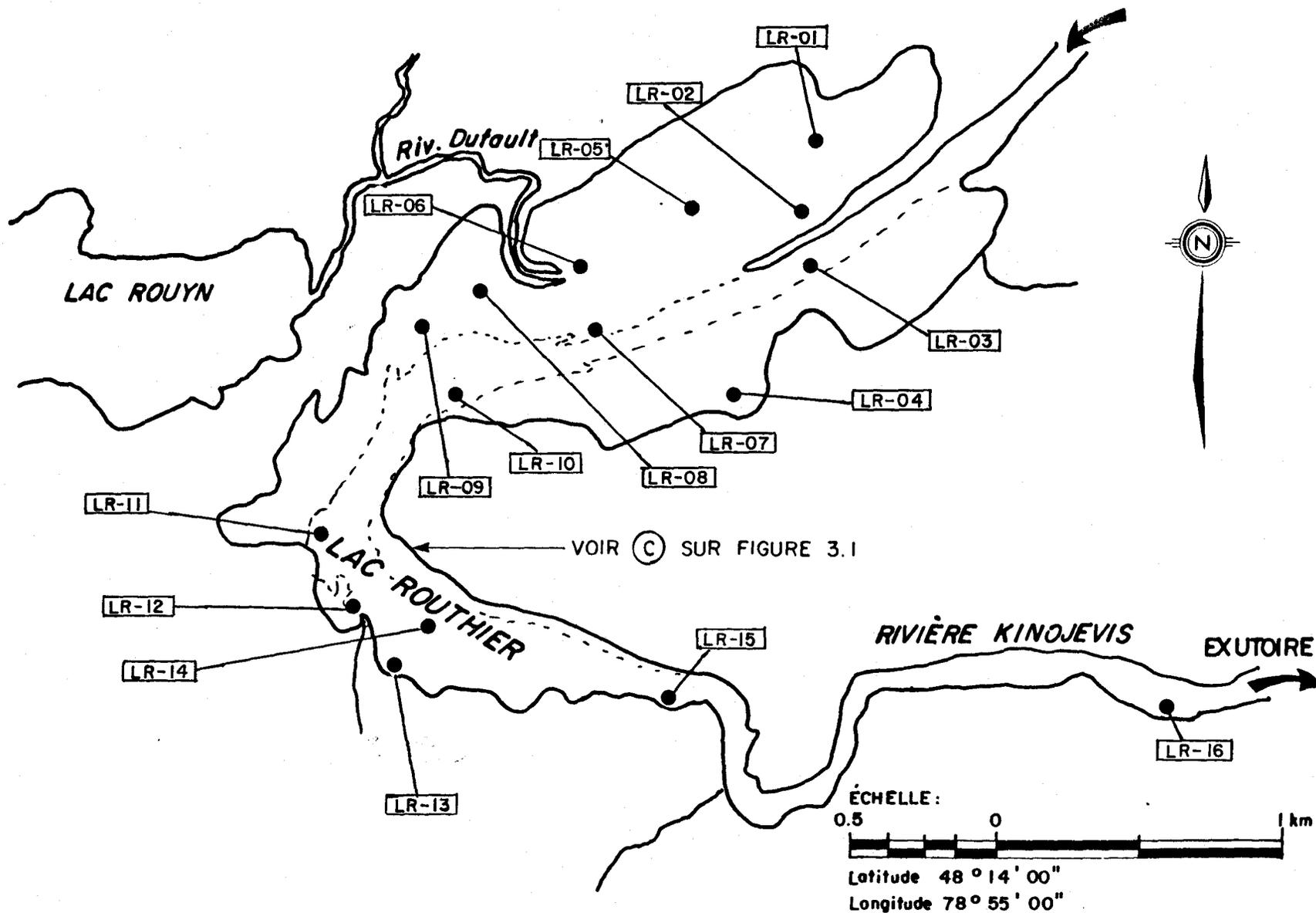


Figure 4.3 . Lac Routhier - stations d'échantillonnage des sédiments (mai 1981) .

Chaque sous-échantillon était placé dans un sac de polyéthylène (Whirlpak); après expulsion de l'air, le sac était scellé et mis dans une glacière en présence de glace fondante. A trois stations (BR-03, LR-05 et LR-09), 5 échantillons individuels ont été prélevés dans un rayon d'environ 4 m afin d'évaluer la variabilité spatiale des concentrations de métaux traces à un site donné. Mentionnons également que des échantillons de sédiments à 8-10 cm de la surface ont été prélevés à trois stations (LR-09, LR-10 et LR-12). Tous les échantillons de sédiments ont été conservés à environ 0°C dans l'obscurité jusqu'au moment de l'analyse.

Au cours de cette campagne d'échantillonnage, la présence ou l'absence de plantes, d'annélides et de pélécy-podes dans la benne a été notée; ces observations apparaissent dans le Tableau A.1 (annexe). Quelques échantillons de plantes et de pélécy-podes ont également été prélevés pour identification taxonomique. De plus, mentionnons que le Dr. A. Forester s'était joint à l'équipe pour cet échantillonnage; il a pu effectuer quelques plongées malgré les conditions particulièrement difficiles.

Plusieurs observations ont été relevées lors de cet échantillonnage, observations qui se sont avérées très utiles pour bien planifier les campagnes suivantes. Ainsi, on a noté des populations importantes de pélécy-podes dans les lacs Beauchastel et La Bruère, mais aucune dans le lac Routhier. Par contre, dans ce dernier lac, on trouvait beaucoup de macrophytes, ou du moins de plantes partiellement décomposées, ainsi que des systèmes de racines très développés. La population d'annélides semblait très faible dans tous les lacs visités et un tamisage (tamis de 0.5 mm) ne permettait pas de récolter d'organismes vivants. Dans tous les plans d'eau visités, la turbidité était très élevée, de sorte que le fond des lacs n'était jamais visible de l'embarcation; la présence d'un plongeur expérimenté s'avérait donc indispensable pour la récolte de pélécy-podes.

4.1.2 Campagne de juillet 1981

La deuxième campagne d'échantillonnage a été réalisée du 27 au 31 juillet 1981. Pour l'occasion, nous nous étions adjoints un spécialiste des plantes aquatiques (M. J. Deshayé) et un plongeur expérimenté dans la cueillette de mollusques (M. D. Sherman). Mentionnons que l'assistance de ces deux personnes s'est avérée essentielle à la réalisation de cette campagne. Celle-ci a débuté par l'identification des plantes aquatiques présentes dans la baie des Garde-Feu (lac Beauchastel). Le but de cette dernière opération était de nous permettre de choisir les plantes à échantillonner, tout en étant relativement sûrs de les retrouver à plusieurs stations. Le tableau 4.1 donne les espèces présentes à quelques stations de la baie des Garde-Feu. A l'aide de cet inventaire, et après avoir constaté dans un deuxième temps que plusieurs de ces plantes se retrouvaient également dans le lac La Bruère, le choix des plantes à échantillonner a été arrêté sur Eleocharis smallii, Glyceria borealis, Nuphar variegatum, Potamogeton richardsonii et Spharganium americanum (?).

D'un commun accord avec le délégué scientifique (M. Norman Birmingham), il avait été convenu de mettre l'accent, lors de cette deuxième campagne, sur le prélèvement de plantes aquatiques. Pour cette raison, le choix des stations a été fortement influencé par la présence ou l'absence de plantes; les deux seules stations qui font exception sont BE-11 et BE-15 où on n'a prélevé que des bivalves. Pour ces deux stations, le plongeur récoltait les bivalves à l'intérieur d'un rayon d'environ 15 mètres de l'embarcation; les sédiments étaient prélevés avec une benne Ekman à partir de l'embarcation et un sous-échantillon de sédiments superficiels (environ 2 cm) était prélevé avec une cueillère en plastique, comme ce fut le cas lors de la campagne de mai. Pour les autres stations, la procédure suivante a été adoptée. La station était située dans un herbier où la présence de Nuphar variegatum était essentielle. Cinq spécimens de N. variegatum étaient prélevés avec leur rhizome; une carotte de sédiment (environ 15-20 cm) était également prélevée près de chacun des rhizomes. Les strates 0-2

Tableau 4.1 : Plantes aquatiques présentes (X) à quelques stations de la baie des Garde-Feu (Lac Beauchastel).

Plante	Station			
	BE-01	BE-03	BE-09	BE-14
<u>Carex lenticularis</u>	X	X		X
<u>Eleocharis acicularis</u>	X	X	X	X
+ <u>Eleocharis smallii</u>	X	X	X	X
<u>Equisetum arvensae</u>			X	
<u>Equisetum fluviatile</u>	X	X		X
+ <u>Glyceria borealis</u>	X	X	X	X
<u>Myriophyllum exalbescens</u>			X	X
+ <u>Nuphar variegatum</u>	X	X	X	X
<u>Potamogeton illinoensis</u>	X	X		X
<u>Potamogeton sp.</u>	X	X		X
+ <u>Potamogeton richardsonii</u>	X	X	X	X
<u>Ranunculus trichophyllus</u>	X		X	X
<u>Sagittaria latifolia</u>	X	X	X	X
<u>Sium suave</u>	X	X	X	
+ <u>Spharganium americanum ?</u>	X	X		X
<u>Valisneria americana</u>	X	X	X	X

+ Espèces sélectionnées pour être échantillonnées

cm et 8-10 cm de chacune des carottes étaient conservées dans des sacs individuels de polyéthylène. Les spécimens de N. variegatum étaient nettoyés soigneusement sur place à l'aide d'une brosse et entreposés dans des sacs individuels de polyéthylène. On recherchait ensuite, dans un rayon d'environ 15 mètres, les quatre autres espèces de plantes (Eleocharis smallii, Glyceria borealis, Potamogeton richardsonii, Spharganium americanum?) et les bivalves d'eau douce; chacune des espèces recueillies était ensuite nettoyée sur place et entreposée dans un sac en polyéthylène. Dans le cas des plantes, on s'efforçait de garder intact le système de racines et les rhizomes. Pendant une journée d'échantillonnage, les sédiments et les espèces animales étaient conservés au frais dans une glacière, alors que les plantes étaient conservées à la température ambiante, mais dans des sacs fermés hermétiquement pour éviter la déshydratation. A la fin de la journée, tout le matériel échantillonné était placé dans une glacière à 4° C.

Dans le Tableau A.2, en Annexe, on trouvera une description des stations échantillonnées, accompagnée d'observations de terrain. La localisation des stations (voir les Figures 4.4 à 4.7) a été faite en se référant à des traits particuliers du plan d'eau ou du rivage et, dans certains cas, en se servant d'un sextant.

4.1.3 Campagne de septembre 1981

D'un commun accord avec le délégué scientifique (M. Normand Birmingham), il avait été convenu de mettre l'accent de cette campagne sur le prélèvement de mollusques; pour cette raison, on a donc visité à nouveau toutes les stations de la campagne de juillet où on avait noté la présence de mollusques (on éliminait ainsi les stations du lac Routhier où on n'avait trouvé aucun mollusque; voir Tableau A.2 en Annexe). De plus, dans le but d'augmenter le gradient de concentration de métaux traces dans les sédiments, il avait été décidé d'établir de nouvelles stations dans le lac Montbeillard où les teneurs en métaux traces sont faibles, et d'y prélever des mollusques. Finalement, il avait été convenu de prélever des plantes aquatiques à un nombre limité

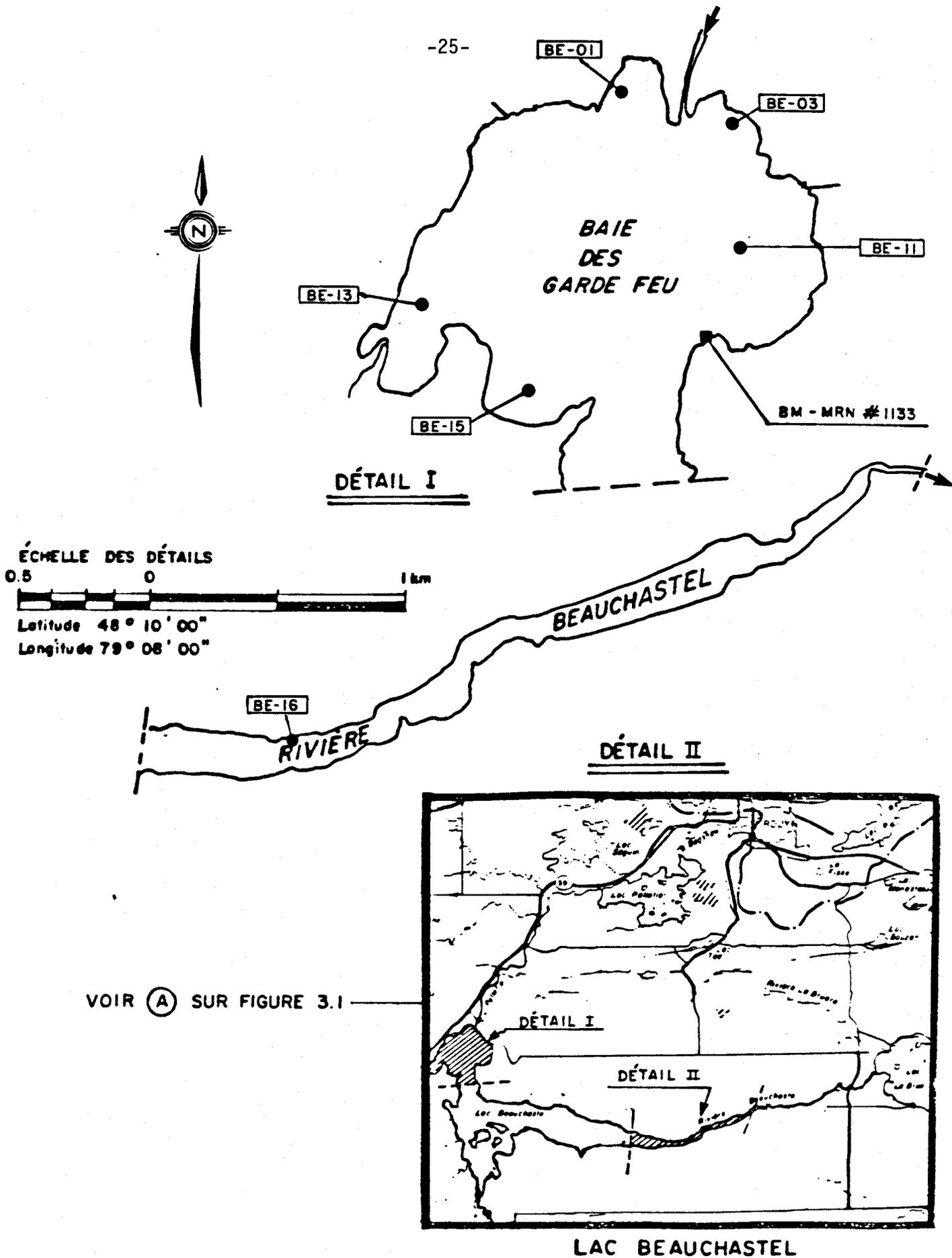


Figure 4.4. Lac Beauchastel - stations d'échantillonnage de juillet et de septembre 1981 .

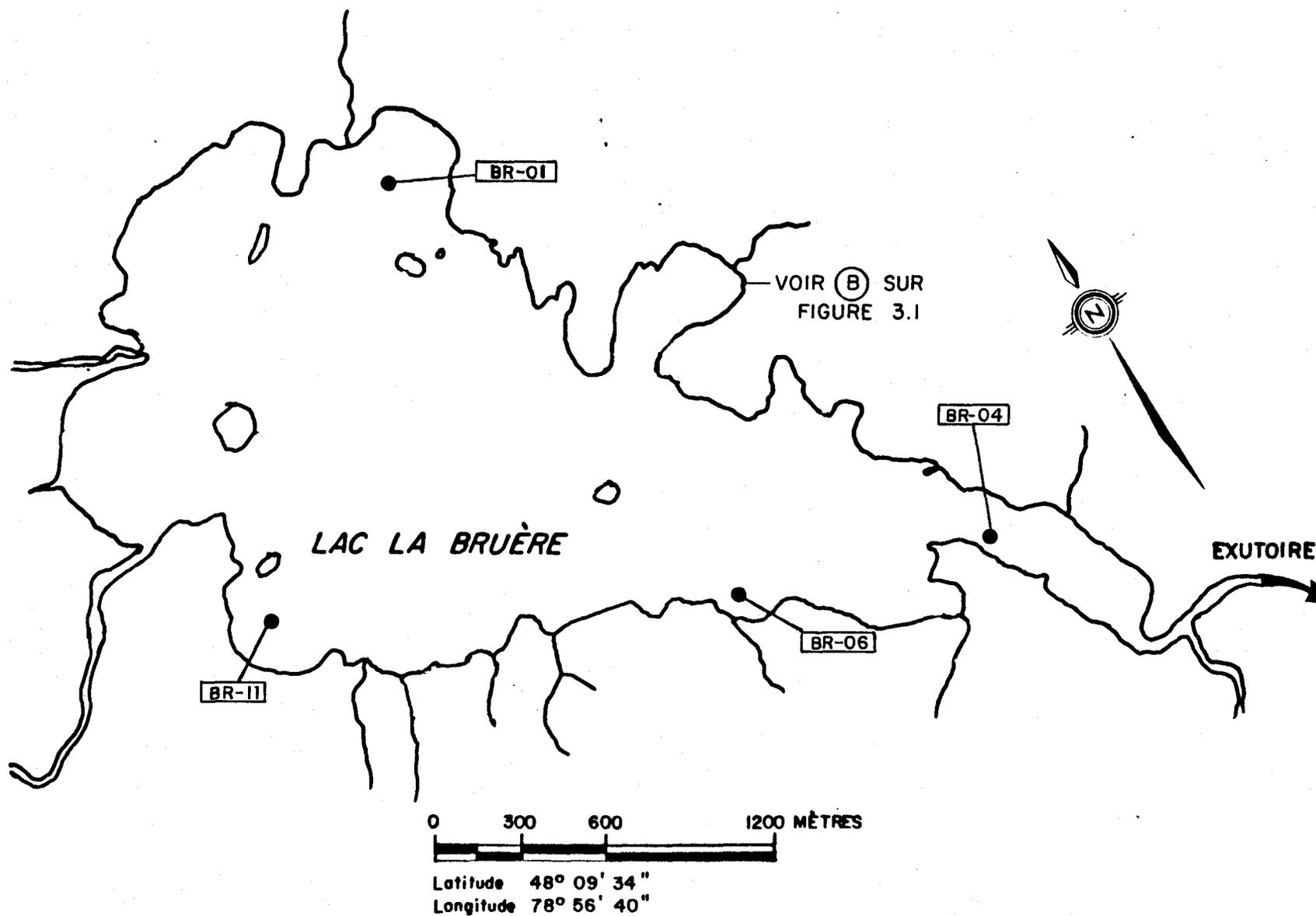


Figure 4.5 . Lac La Bruère - stations d'échantillonnage de juillet et septembre 1981 .

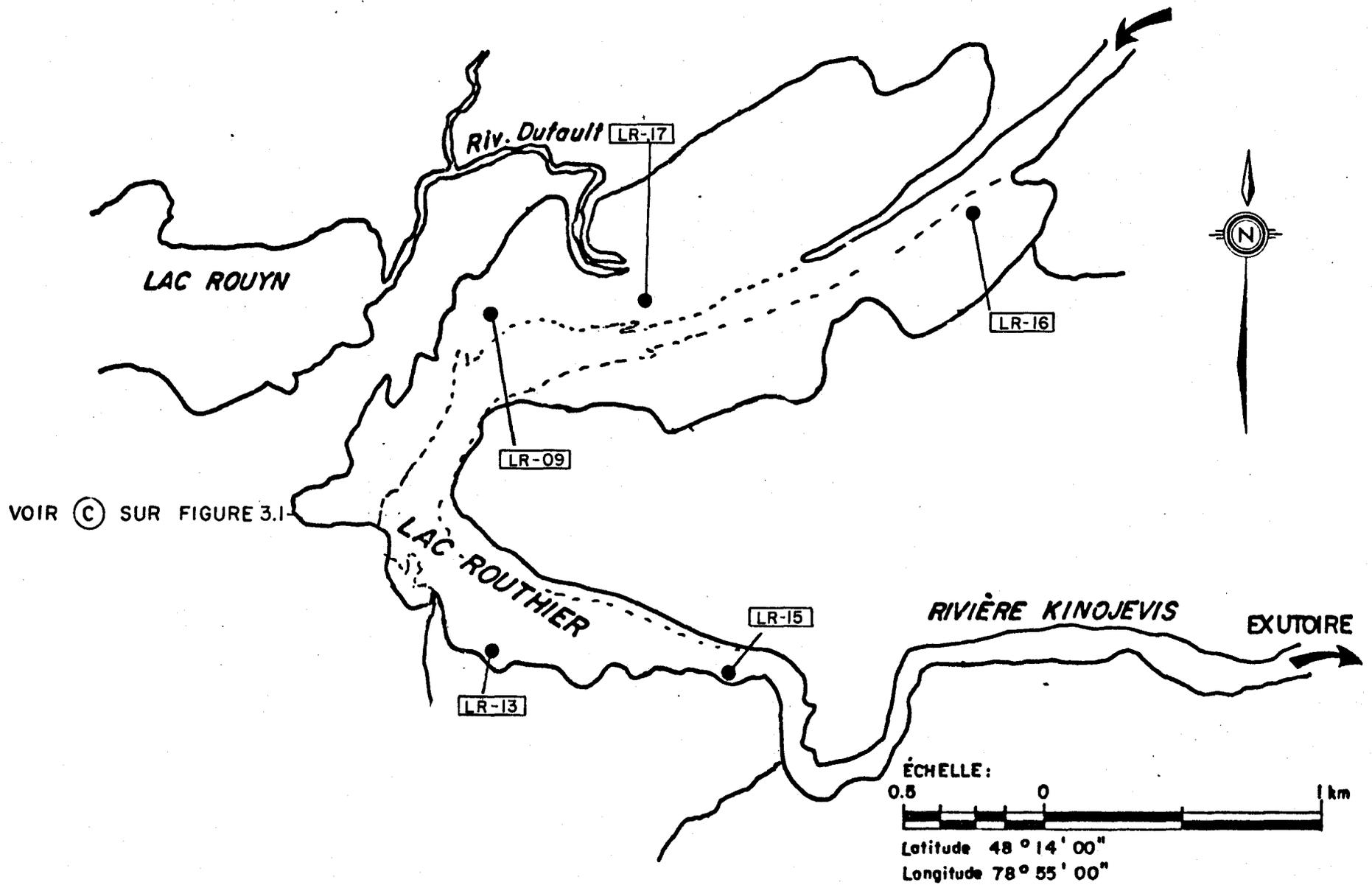


Figure 4.6 . Lac Routhier - stations d'échantillonnage de juillet 1981 .

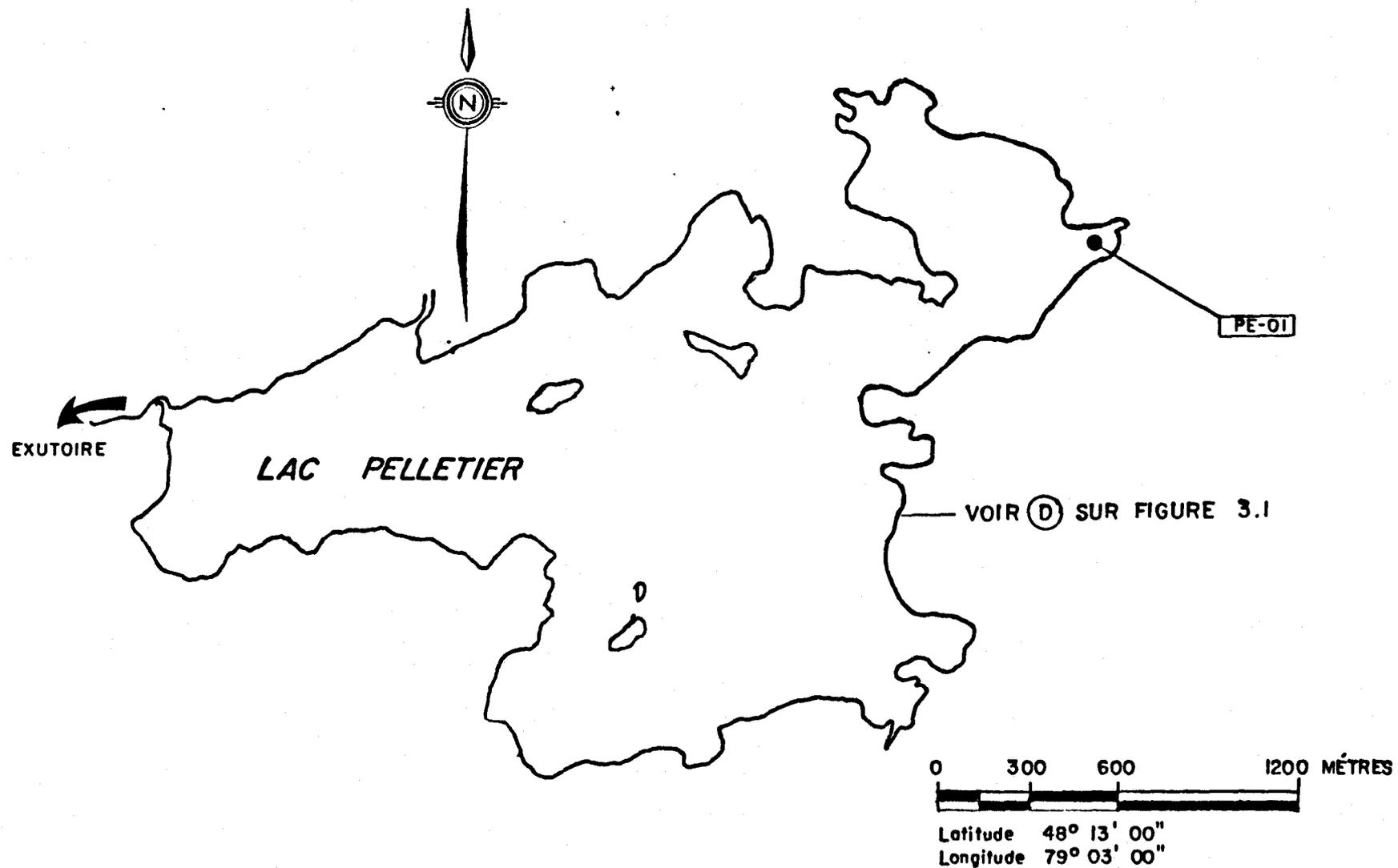


Figure 4.7. Lac Pelletier – station d'échantillonnage de juillet 1981.

de stations dans les lacs Montbeillard, Beauchastel et La Bruère; dans le cas des deux derniers lacs, le but était de comparer les teneurs en métaux traces à différentes périodes de l'année. Comme lors de la campagne précédente, nous étions accompagnés de MM. J. Deshayé (spécialiste des plantes aquatiques) et D. Sherman (plongeur).

Pour toutes les stations, le plongeur récoltait les bivalves sur une surface de rayon d'environ 20 mètres. Quelques échantillons de sédiments (de 2 à 7 selon les besoins) étaient prélevés à l'intérieur de cette surface à l'aide d'une benne Ekman et des sous-échantillons de sédiments superficiels (environ 2 cm d'épaisseur) étaient prélevés avec une cueillère de plastique, comme ce fut le cas en juillet et en mai.

Pour les stations MO-01, MO-02, BE-01 et BR-11, la même procédure qu'en juillet était adoptée pour prélever des plantes. La station était située dans un herbier où la présence de Nuphar variegatum était essentielle et cinq spécimens de N. variegatum étaient prélevés avec leur rhizome. Aux nouvelles stations MO-01 et MO-02, une carotte de sédiment était également prélevée près de chacun des rhizomes. Les strates 0-2 cm et 8-10 cm de chacune des carottes étaient conservées dans des sacs individuels de polyéthylène. Ensuite, à chacune de ces deux stations, on recherchait, dans un rayon d'environ 15 mètres, les quatre autres espèces de plantes (Eleocharis smalii, Glyceria borealis, Potamogeton richardsonii, Spharaganium americanum?). Les opérations de nettoyage et de conservation des spécimens étaient les mêmes qu'en juillet.

La localisation des stations est présentée sur les Figures 4.4, 4.5, et 4.8; une description des stations, ainsi que les observations de terrain, sont présentées dans le Tableau A.3, en Annexe.

4.2 Tamissage des sédiments

Tous les échantillons de sédiments recueillis lors de la campagne préliminaire de mai 1981 ont été tamisés par voie humide successivement

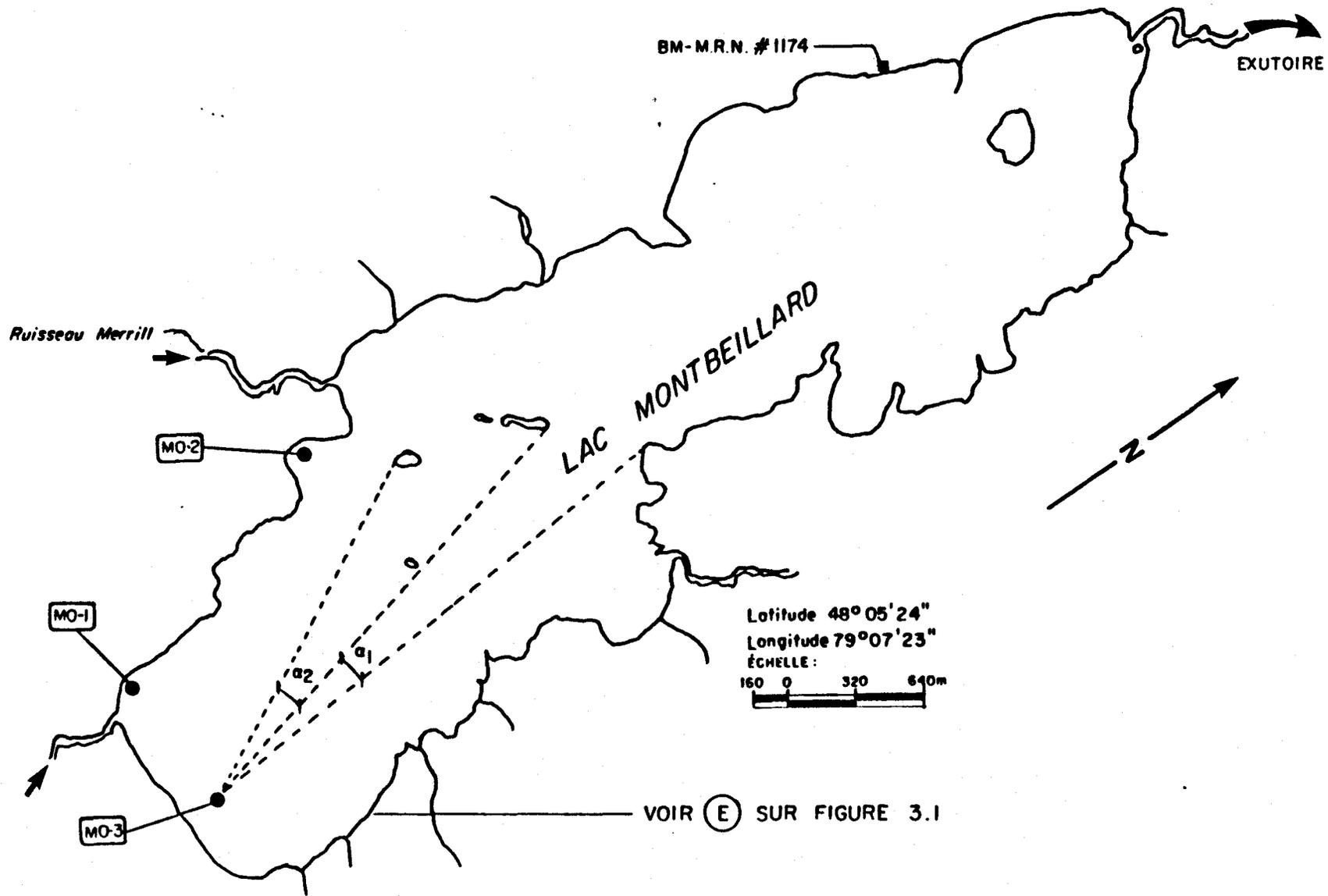


Figure 4.8 Lac Montbeillard-stations d'échantillonnage des sédiments (septembre, 1981).

sur des tamis de Nylon de 850 et 177 micromètres (μm); seize, choisis parmi ceux-ci pour y effectuer les mesures de spéciation, ont été tamisés sur des tamis de 70 μm . Les fractions granulométriques $f < 177 \mu\text{m}$ et $f < 70 \mu\text{m}$ ont été conservées pour analyse, après centrifugation.

Les échantillons de sédiments (carottes, tranches 0-2 cm et 8-10 cm) obtenus lors de la campagne de juillet 1981 ont été tamisés par voie humide sur un tamis de Nylon de 850 μm . La fraction granulométrique $f < 850$ a été conservée pour analyse, après centrifugation. Le but du tamisage était d'enlever les débris grossiers.

Pour les échantillons obtenus lors de la campagne de septembre 1981, on a adopté deux procédures. Pour les carottes de sédiments (tranches 0-2 cm et 8-10 cm), qui n'étaient prélevées qu'aux stations M0-01 et M0-02, on a utilisé un tamis de 850 μm et la fraction granulométrique $f < 850 \mu\text{m}$ était conservée pour analyse. Pour tous les autres échantillons (échantillons de surface, prélevés avec la benne Ekmann), on a utilisé successivement des tamis de 850 et 70 μm ; la fraction granulométrique $f < 70 \mu\text{m}$ était conservée pour analyse. La raison pour cette procédure différente vient du fait que les bivalves ne peuvent ingérer que des particules fines. Après avoir consulté plusieurs biologistes, on a finalement choisi la fraction $f < 70 \mu\text{m}$ comme représentative des dimensions des particules ingérées (voir la section 5.5).

4.3 Attaque chimique des sédiments

4.3.1 Attaque avec l'acide nitrique concentré

L'échantillon séché à 105°C pendant la nuit était introduit (1g, poids sec) dans un bécher en Teflon et chauffé à reflux pendant 3 heures en présence d'acide nitrique (10 ml, acide concentré ultra-pur). Le contenu du bécher était ensuite centrifugé à 4000 rpm pendant 5 minutes, et le surnageant transvasé dans un cylindre gradué pour être complété à un volume de 20 ml avec de l'eau déminéralisée.

Cette procédure n'a été appliquée qu'aux échantillons de sédiments $f < 177 \mu\text{m}$ prélevés lors de la campagne préliminaire de mai 1981. Rappelons que le but de ces opérations était d'identifier grossièrement un gradient de concentration de métaux traces dans les sédiments et de s'en servir comme critère pour établir les stations d'échantillonnage de juillet et septembre.

4.3.2 Procédure pour déterminer la spéciation des métaux traces particulières

La procédure d'extractions successives (Tessier et al., 1979) utilisée pour déterminer la spéciation des métaux traces est décrite ci-dessous; les quantités de réactifs sont données pour environ 1g de sédiment poids sec. On doit noter cependant que les attaques se font sur les sédiments humides; tout pré-traitement (séchage, congélation, etc.) change la spéciation.

Fraction 1 (F1): Métaux échangeables

- introduire le sédiment humide (l'équivalent en poids d'environ 1g poids sec) dans une éprouvette à centrifugation de polypropylène de 50 ml;
- ajouter 8 ml de MgCl_2 0.5 M préparé avec de l'eau desoxygénée et ajusté à $\text{pH} = 7.0$ avec NaOH dilué;
- agiter pendant 10 minutes;
- centrifuger pendant 30 min à 10,000 rpm (12,000 g);
- récupérer le surnageant avec une pipette ou par décantation, filtrer au besoin et doser les métaux.

Fraction 2 (F2): Métaux liés aux carbonates

- rincer le résidu précédent avec 8 ml d'eau désionisée desoxygénée, agiter, centrifuger (30 min à 10,000 rpm), retirer le surnageant avec une pipette et le jeter;

- ajouter au résidu 8 ml de NaOAc 1.0 M ajusté à pH = 5.0 avec HOAc;
- agiter pendant 5 heures; ajuster le pH au besoin;
- centrifuger pendant 30 min à 10,000 rpm;
- récupérer le surnageant avec une pipette ou par décantation, filtrer au besoin et doser les métaux.

Fraction 3 (F3): Métaux liés aux oxydes de fer et de manganèse

- rincer le résidu précédent avec 8 ml d'eau désionisée désoxygénée, agiter, centrifuger (30 min, à 10,000 rpm), retirer le surnageant avec une pipette et le jeter;
- ajouter au résidu 20 ml de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 0.04 M préparé dans HOAc 25% v/v;
- chauffer à $96 \pm 3^\circ\text{C}$ pendant 6 h en agitant régulièrement;
- ajuster à 20 ml avec de l'eau;
- centrifuger pendant 30 min à 10,000 rpm;
- récupérer le surnageant avec une pipette ou par décantation et doser les métaux.

Fraction 4 (F4): Métaux liés à la matière organique

- rincer le résidu précédent avec 8 ml d'eau désionisée, agiter, centrifuger (30 min, à 10,000 rpm), retirer le surnageant avec une pipette et le jeter;
- ajouter au résidu 3 ml de HNO_3 0.02 M et 5 ml de H_2O_2 30% ajusté à pH = 2.0 avec HNO_3 ;
- chauffer à $85 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 2 h en agitant régulièrement;
- ajouter 3 ml de H_2O_2 ajusté à pH = 2.0 avec HNO_3 ;
- chauffer à $85 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 3 h en agitant régulièrement;
- laisser refroidir et ajouter 5 ml de NH_4OAc 3.2 M préparé dans HNO_3 20% v/v;
- ramener à 20 ml avec de l'eau désionisée;
- agiter constamment pendant 30 min;

- . centrifuger pendant 30 min à 10,000 rpm;
- . récupérer le surnageant avec une pipette ou par décantation et doser les métaux.

Fraction 5 (F5): Métaux liés à la matrice cristalline

- . rincer le résidu précédent avec 8 ml d'eau désionisée, agiter, centrifuger (30 min, à 10,000 rpm), retirer le surnageant avec une pipette et le jeter;
- . placer le résidu dans un bécher de Teflon;
- . ajouter 2 ml de HClO_4 et 10 ml de HF concentrés et évaporer presque à siccité;
- . ajouter 2 ml de HClO_4 et 10 ml de HF concentrés et évaporer presque à siccité;
- . ajouter 2 ml de HClO_4 et évaporer jusqu'à l'apparition de fumées blanches;
- . dissoudre le résidu dans HCl 25% (v/v) et compléter à 25 ml;
- . doser les métaux traces

On notera que les quatre premières extractions sont effectuées dans des éprouvettes à centrifugation afin d'éviter des pertes de matériel solide. Pour les trois premières extractions, les réactifs sont préparés dans de l'eau désaérée afin d'éviter une oxydation des sédiments. Le volume d'eau de rinçage utilisé est petit (8 ml) afin d'éviter une solubilisation importante du matériel solide, particulièrement de la matière organique.

Cette procédure a été appliquée:

- . à 16 stations choisies parmi les 46 échantillonnées en mai 1981; la fraction granulométrique $f < 70 \mu\text{m}$ a été utilisée; le but de cet exercice était de se servir des résultats de spéciation comme critère pour la sélection des stations à échantillonner en juillet et septembre;

- aux tranches 0-2 cm et 8-10 cm obtenues des carottes de sédiments prélevées en même temps que les plantes; la fraction granulométrique $f < 850 \mu\text{m}$ était alors utilisée; ceci correspond à 32 échantillons.
- aux 13 échantillons de sédiments superficiels prélevés en même temps que les bivalves; la fraction granulométrique $f < 70 \mu\text{m}$ était alors utilisée.

4.4 Dosage des métaux dans les différents extraits des sédiments

Suite à l'attaque des sédiments avec HNO_3 concentré (voir la section 4.3.1), les concentrations de Cu, Pb, Zn, Fe étaient déterminées dans l'extrait par spectrophotométrie d'absorption atomique avec flamme (Varian Techtron, Modèle 575-ABQ), en utilisant au besoin un correcteur de bruit de fond. La quantification était effectuée en se référant à une courbe d'étalonnage préparée dans HNO_3 50%.

Les concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les différents extraits de la procédure de spéciation (voir la section 4.3.2) ont également été déterminées par spectrophotométrie d'absorption atomique avec flamme. Pour la quantification des résultats, on a procédé par comparaison avec des courbes d'étalonnage préparées avec les composants inorganiques de chacune des solutions à analyser.

4.5 Autres mesures effectuées sur les sédiments

Des mesures complémentaires ont été effectuées (concentrations de Si, Al, S, carbone inorganique et carbone organique) sur les sédiments, dans le Laboratoire de Recherches minérales du ministère d'Énergie et Ressources du Québec. L'aluminium et le silicium étaient déterminés par spectrophotométrie d'absorption atomique, après fusion au métaborate de lithium et dissolution dans HCl 1.2 N. Le soufre et le carbone étaient déterminés respectivement avec un analyseur de soufre total (Leco, modèle IR-32) et un analyseur de carbone total (Leco, modèle IR-

12). Le carbone inorganique était obtenu par différence entre le carbone total et le carbone organique, ce dernier étant mesuré après un traitement acide (HCl) du sédiment pour dissoudre les carbonates.

4.6 Sélection des échantillons de plantes à analyser

Il était impossible, dans le cadre de ce contrat, d'espérer compléter l'analyse de tous les échantillons de plantes recueillis au cours des campagnes de juillet et septembre. Après consultation avec le délégué scientifique (M. Normand Bermingham), notre choix s'est fixé sur l'espèce Nuphar variegatum. Il s'agit de l'espèce qu'on retrouve au plus grand nombre de stations et, de plus, cette plante possède un gros rhizome et des tiges de bonnes dimensions, ce qui facilite le travail de laboratoire. L'anatomie de cette espèce ne devrait pas favoriser l'absorption de métaux à partir de la colonne d'eau, le système tige/feuille étant peu ramifié. Enfin, mentionnons qu'il existe dans la littérature scientifique quelques résultats analytiques pour les teneurs en métaux traces dans ces plantes (voir la section 6.4).

Avant de sélectionner les parties de Nuphar variegatum à analyser de façon systématique, on a procédé à des mesures préliminaires sur trois spécimens prélevés en juillet respectivement aux stations BR-06, BE-13 et LR-13. Pour chacun de ces échantillons, le rhizome était séparé en trois parties correspondant à celles formées pendant l'année actuelle (0 an), l'année dernière (1 an) et l'avant dernière année (2 ans). Cette distinction était faite en se basant sur le nombre de tiges attachées au rhizome et sur les cicatrices laissées sur ce dernier par les tiges des années précédentes. Chacune des parties individuelles du rhizome, de même que les tiges, étaient ensuite digérées (voir la section 4.7) et analysées pour Cu, Pb et Zn. Les résultats (Tableau 4.2) montrent qu'il existe un gradient de concentration entre la tige et le rhizome et dans le rhizome lui-même, notamment pour le zinc. Ces résultats nous ont amenés à sélectionner la tige et la section du rhizome de la dernière année de croissance (1 an) pour les

mesures systématiques. Mentionnons que la section actuelle (0 an) du rhizome était en général petite et difficile à séparer des tiges.

4.7 Digestion de *Nuphar variegatum* et dosage des teneurs en métaux traces

Les plantes étaient d'abord nettoyées soigneusement et séparées en parties (p.e. tige, rhizome). Les parties sélectionnées pour analyse étaient séchées à 105°C pendant 24 h et broyées finement avec un mélangeur (Osterizer, Cyclo-trol). Pour une station donnée, selon le cas, on mélangeait ensemble chacune des parties des cinq spécimens récoltés pour former des échantillons composés ou, encore, on les conservait telles quelles pour les analyser individuellement. Environ 1 g des échantillons ainsi formés étaient ensuite digérés de la façon suivante:

- . 10 ml de HNO_3 (70%) et 3 ml de HClO_4 (concentré) à température de la pièce pour 24 h;
- . chauffage jusqu'à l'apparition de fumée blanche de HClO_4 .

Après avoir laissé refroidir la solution, on ajoutait 5 ml de HNO_3 (4%) et on chauffait légèrement avant de compléter le volume à 10 ml avec de l'eau déminéralisée. Les digestions étaient effectuées dans des béchers de Teflon. La détermination de la concentration des métaux traces était effectuée par spectrophotométrie d'absorption atomique avec flamme. La quantification était effectuée en se référant à une courbe d'étalonnage préparée dans HNO_3 (2%).

La justesse et la précision de cette procédure ont été évaluées en analysant quatre répliqués d'un étalon certifié (U.S. National Bureau of Standards, No 1570, feuilles d'épinard). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.3; la précision analytique obtenue pour des échantillons de *Nuphar variegatum* (stations BR-04 et BR-11) y est également présentée.

Tableau 4.2 : ^aTeneurs en Cu, Pb et Zn dans les tiges et dans différentes parties des rhizomes de trois spécimens de Nuphar variegatum.

Station	Partie ^b	[Cu] (µg/g)	[Pb] (µg/g)	[Zn] (µg/g)
BR-06	tige	9.5	<1	24.8
	rhizome (0 an)	9.5	<1	10.5
	rhizome (1 an)	8.7	<1	5.7
	rhizome (2 ans)	10.6	<1	6.3
BE-13	tige	3.7	<1	24.3
	rhizome (0 an)	4.1	<1	15.1
	rhizome (1 an)	3.0	<1	13.4
	rhizome (2 ans)	3.4	<1	9.4
LR-13	tige	9.5	<1	93.6
	rhizome (0 an)	10.9	<1	47.9
	rhizome (1 an)	6.0	<1	18.5
	rhizome (2 ans)	2.8	<1	15.9

a : les concentrations sont exprimées en µg/g (poids sec)

b : les rhizomes sont séparés en trois parties correspondant à celles formées pendant l'année actuelle (0 an), l'année dernière (1 an) et l'avant dernière année (2 ans).

Tableau 4.3: Vérification de la justesse et de la précision de la méthodologie utilisée pour analyser les plantes.

Station	Partie de la plante	N	Concentration ^a (g/g, poids sec)			
			Cu	Zn	Fe	Mn
BR-04	tige	4	6.74 ± 0.63	25.2 ± 1.3	57.4 ± 5.0	375 ± 6.7
BR-04	rhizome	5	4.02 ± 0.34	9.45 ± 0.48	27.5 ± 5.5	136 ± 6.4
BR-11	tige	5	23.0 ± 1.5	43.6 ± 2.2	165 ± 8.3	312 ± 15.1
BR-11	rhizome	5	5.70 ± 0.3	13.4 ± 0.7	46.3 ± 5.7	119 ± 11.5
Etalon NBS épinard	cette étude	4	11.0 ± 0.5	50.8 ± 1.4	381 ± 21	158 ± 2
Etalon NBS épinard	valeur acceptée	-	12 ± 2	50 ± 2	550 ± 20	165 ± 6

^a moyenne ± écart-type.

4.8 Identification et préparation des mollusques

Les deux espèces de mollusques ont été identifiées comme étant Elliptio complanata et Anodonta grandis (Pennak, 1953; Clarke, 1973). Cette identification a été confirmée par le Dr. A. Forester (Université de Toronto), spécialiste des mollusques d'eau douce.

Initialement, il avait été prévu d'analyser un seul échantillon composé des parties molles des organismes à chaque station, tel que suggéré par le Dr. A. Forester. Nous avons donc pris la décision de congeler les mollusques jusqu'au moment de l'analyse.

Suite à des discussions avec D. Cossa (INRS-Océanologie, Rimouski) et les Drs. Amiard et Amiard-Triquet (Université de Nantes) et après consultation de la littérature, il est cependant apparu qu'il aurait été préférable de faire jeuner les organismes (pour vider le tractus intestinal) avant de les analyser. Pour pallier au fait que les organismes n'avaient pas été mis à jeuner avant de les congeler, nous avons donc tenté d'enlever les sédiments par dissection.

Les premiers essais de dissection ont été effectués sur Elliptio complanata, après décongélation; il était alors impossible d'éliminer les sédiments, étant donné la nature gélatineuse des organes. Les essais subséquents de dissection ont été faits sur les mollusques lyophilisés (Elliptio complanata); les organes devenaient alors instables (ils se désintégraient). Suite à une suggestion de M. Cossa, nous avons alors décidé de prélever des organes facilement accessibles comme le pied et les muscles adducteurs qui ne risquaient pas d'être contaminés par les sédiments. Cependant, après avoir analysé un certain nombre de pieds et de muscles, on s'est rendu compte qu'ils n'avaient pas des teneurs très élevées en métaux traces et qu'ils ne permettaient pas une bonne discrimination entre les stations.

Après tous ces essais plus ou moins fructueux, nous avons finalement trouvé un moyen de disséquer facilement les mollusques en procé-

dant lorsqu'ils sont encore congelés. Il est alors facile d'identifier les organes, de les séparer et d'enlever les sédiments qui pourraient les contaminer. Cette procédure de dissection a finalement été adoptée. On séparait ainsi les organes suivants: pied, muscle, masse viscérale (inclut les gonades, des organes digestifs et des nerfs), foie (glande digestive) branchies, manteau et oeufs, après avoir enlevé le tractus intestinal contenant les sédiments. Ces organes étaient finalement analysés séparément (voir la section 4.9), ce qui améliorait le pouvoir de résolution, mais augmentait de beaucoup le nombre d'analyses par rapport à ce qui avait été prévu initialement. Mentionnons que ces décisions ont été prises avec l'accord du délégué scientifique.

Après avoir procédé à la dissection, les organes étaient mis à sécher (105°C, 24 h) séparément; leur poids individuel était ensuite noté. La coquille était mesurée (longueur, largeur, hauteur) pesée et lavée à l'hypochlorite de sodium; on déterminait ensuite le poids et l'âge de l'organisme d'après les lignes de déposition calcaire qui y apparaissent.

4.9 Digestion des organes des mollusques et dosage des teneurs en métaux traces

Chacun des organes des mollusques était digéré de la façon suivante (Borg et al., 1981):

- . 10 ml de HNO₃ (70%) à température de la pièce pour la nuit;
- . évaporation presque à sec;
- . après avoir laissé refroidir, ajout de 10 ml de H₂O₂ (30%);
- . chauffage à 85°C pour 5-6 heures.

Après avoir laissé refroidir la solution, on ajoutait 5 ml de HNO₃ (4%) et on chauffait légèrement avant de compléter le volume à 10 ml avec de l'eau déminéralisée. Les digestions étaient effectuées dans des béchers de Teflon. La détermination de la concentration des métaux traces était effectuée par spectrophotométrie d'absorption atomique

avec flamme. La quantification était effectuée en se référant à une courbe d'étalonnage préparée dans HNO_3 (2%).

La précision et la justesse de cette procédure ont été évaluées à partir d'un étalon certifié (U.S. National Bureau of Standards, No 1556, tissus d'huîtres). A chaque fois qu'une série de digestions était effectuée, un étalon était introduit avec la série. Les résultats obtenus pour 21 répliqués de l'étalon sont, pour Cu: 53.7 ± 4.3 $\mu\text{g/g}$ (63.0 ± 3.5), Pb: < 2 $\mu\text{g/g}$ (0.48 ± 0.04), Zn: 791 ± 63 $\mu\text{g/g}$ (852 ± 14), Fe: 112 ± 23 $\mu\text{g/g}$ (195 ± 34) et Mn: 13.4 ± 3.3 $\mu\text{g/g}$ (17.5 ± 1.2); les valeurs entre parenthèses sont celles du U.S. NBS. Les valeurs moyennes que nous avons obtenues sont généralement plus faibles que celles de l'étalon. Mentionnons cependant que dans le cas de l'étalon, il était difficile d'obtenir une solution limpide après digestion, ce qui n'était pas le cas de nos échantillons de mollusques.

5. RESULTATS

5.1 Résultats analytiques de la campagne préliminaire de mai 1981

5.1.1 Concentrations de métaux traces dans les sédiments (attaque avec HNO₃ concentré)

Les sédiments prélevés en mai 1981 ont tous été attaqués avec l'acide nitrique concentré (voir la section 4.3.1). Rappelons que le but de cet exercice était d'obtenir, au moins grossièrement, le gradient de concentration de métaux traces auquel on pouvait s'attendre dans les sédiments. Les concentrations de métaux traces obtenues par cette procédure sont présentées dans les Tableaux 5.1 à 5.3 respectivement pour les lacs Beauchastel, La Bruère et Routhier. Pour les stations BR-03, LR-05 et LR-09, où nous avons prélevé 5 échantillons individuels (c'est-à-dire: 5 prises de benne) afin de vérifier la variabilité spatiale des sédiments à un site donné, ce sont les concentrations moyennes qui figurent dans ces tableaux. Les résultats analytiques pour chaque replicat, l'écart-type ainsi que le coefficient de variation sont présentés dans le Tableau 5.4.

De plus, aux stations LR-09, LR-10 et LR-12, nous avons prélevé à la fois un échantillon des sédiments superficiels (0 à 2 cm) et un échantillon des sédiments plus profonds (~ 8 à 10 cm). Ces échantillons furent analysés séparément et les résultats se trouvent dans le Tableau 5.5.

Un certain nombre d'observations peuvent être dégagées des Tableaux 5.1 à 5.5:

- . les variations de concentrations en métaux traces dans les sédiments sont assez importantes, étant de 13-686 µg/g (Cu), 14-433 µg/g (Pb) et 44-742 µg/g (Zn);

Tableau 5.1: Concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments^a du lac Beauchastel et de la rivière Beauchastel

station ^b	Concentration (µg/g)			
	<u>Cu</u>	<u>Pb</u>	<u>Zn</u>	<u>Fe</u>
BE-01	85	38	269	20400
BE-02	108	44	243	20200
BE-03	53	28	162	12800
BE-04	80	62	280	30200
BE-05	98	52	303	25400
BE-06	116	64	350	29000
BE-07	70	46	218	25400
BE-08	147	70	388	34000
BE-09	99	62	331	30000
BE-10	110	74	386	32600
BE-11	120	80	460	33800
BE-12	77	46	259	20400
BE-13	87	42	241	19800
BE-14	82	54	270	23500
BE-15	<u>131</u>	<u>80</u>	<u>454</u>	<u>28600</u>
moyenne	98	56	308	25740
écart-type	25	16	86	6170
CV ^c (%)	26	29	28	24
maximum	147	80	460	34000
minimum	53	28	162	12800
BE-16	126	92	387	31000
BE-17	160	98	350	26600
BE-18	160	132	470	27800
BE-19	85	62	237	26800

^a: Fraction granulométrique <177 µm; attaque avec HNO₃ concentré.

^b: Pour la localisation des stations d'échantillonnage, voir la Figure 4.1.

^c: CV = coefficient de variation.

Tableau 5.2: Concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments^a du lac La Bruère.

station ^b	Concentration (µg/g)			
	<u>Cu</u>	<u>Pb</u>	<u>Zn</u>	<u>Fe</u>
BR-01	100	92	207	18600
BR-02	125	104	261	19200
BR-03 ^c	141	111	301	23100
BR-04	103	78	203	17600
BR-05	182	126	299	23000
BR-06	31	30	71	9000
BR-07	155	122	295	24000
BR-08	193	136	312	29800
BR-09	152	142	362	37400
BR-10	124	88	221	22800
BR-11	166	166	339	24000
moyenne	134	109	261	22590
écart-type	45	37	82	7160
CV ^d (%)	34	34	31	32
maximum	193	166	339	37400
minimum	31	30	71	9000

^a: Fraction granulométrique < 177 µm; attaque avec HNO₃ concentré.

^b: Pour la localisation des stations d'échantillonnage, voir la Figure 4.2.

^c: Valeurs moyennes pour 5 échantillons (voir le Tableau 5.4).

^d: CV = coefficient de variation.

Tableau 5.3: Concentrations de Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments^a du lac Routhier et de la rivière Kinojévis.

station ^b	Concentration (µg/g)			
	<u>Cu</u>	<u>Pb</u>	<u>Zn</u>	<u>Fe</u>
LR-01	230	112	285	28800
LR-02	324	138	446	22200
LR-03	13	14	44	11600
LR-04	59	78	126	25200
LR-05 ^c	310	154	235	38840
LR-06	253	180	235	36400
LR-07	165	88	246	24400
LR-08	478	352	590	30200
LR-09 ^c	686	433	695	42100
LR-10	53	52	136	20200
LR-11	373	150	472	33200
LR-12	432	216	594	32800
LR-13	371	190	732	25600
LR-14	81	58	252	23000
LR-15	249	130	742	31400
moyenne	272	156	389	28390
écart-type	184	112	236	7860
CV ^d (%)	68	72	61	28
maximum	686	433	742	42100
minimum	13	14	44	11600
LR-16	166	122	566	31000

^a: Fraction granulométrique < 177 µm; attaque avec HNO₃ concentré.

^b: Pour la localisation des stations d'échantillonnage, voir la Figure 4.3.

^c: Valeurs moyennes pour 5 échantillons (voir le Tableau 5.4).

^d: CV = coefficient de variation.

Tableau 5.4: Vérification de la reproductibilité de l'échantillonnage de sédiments aux stations BR-03, LR-05 et LR-09.

station ^a	échantillon ^b	concentration (µg/g)			
		<u>Cu</u>	<u>Pb</u>	<u>Zn</u>	<u>Fe</u>
BR-03	1	138	120	301	19200
	2	152	112	313	26400
	3	140	112	307	24000
	4	134	96	278	20200
	5	139	114	306	25600
	moyenne	141	111	301	23080
	écart-type CV ^c (%)	7 4.8	9 8.0	14 4.5	3220 14.0
LR-05	1	275	182	222	31000
	2	304	170	226	34800
	3	252	150	177	36400
	4	350	222	305	48000
	5	369	144	250	44000
	moyenne	310	174	235	38840
	écart-type CV (%)	49 15.9	31 17.9	47 19.8	6970 17.9
LR-09	1	654	440	630	39800
	2	716	386	830	44000
	3	672	420	634	38800
	4	620	460	720	42000
	5	770	460	662	46000
	moyenne	686	433	695	42100
	écart-type CV (%)	58 8.5	31 7.2	83 12.0	2960 7.0

^a: Pour la localisation des stations d'échantillonnage, voir les Figures 4.2 et 4.3.

^b: Fraction granulométrique <177 µm; attaque avec HNO₃ concentré.

^c: CV = coefficient de variation.

Tableau 5.5: Comparaison des teneurs en Cu, Pb, Zn et Fe dans les sédiments^a superficiels et les sédiments plus profonds aux stations LR-09, LR-10 et LR-12.

station ^b	strate (cm)	concentration (µg/g)			
		<u>Cu</u>	<u>Pb</u>	<u>Zn</u>	<u>Fe</u>
LR-09	0-2	672	420	634	38800
	8-10	728	272	746	33400
LR-10	0-2	53	52	136	20200
	8-10	140	62	343	25600
LR-12	0-2	432	216	594	32800
	8-10	566	242	974	25600

^a: Fraction granulométrique <177 µm; attaque avec HNO₃ concentré.

^b: Pour la localisation des stations d'échantillonnage, voir la Figure 4.3.

- . en comparant les différents milieux entre eux, on note que la variabilité spatiale des concentrations en Cu, Pb et Zn est beaucoup plus importante dans le lac Routhier que dans les deux autres lacs. Par ailleurs, la variabilité spatiale des concentrations en Fe est semblable dans les 3 cas;
- . les stations échantillonnées ne mettent en évidence, ni dans le lac Beauchastel, ni dans le lac La Bruère, de gradients marqués de concentration; seul le lac Routhier présente des gradients de concentration appréciables, de l'amont vers l'aval de la confluence des rivières Dufault et Kinojévis. Par ailleurs, le lac Routhier supporte une population abondante de macrophytes mais la population indigène des pélécy-podes semble nulle (voir le Tableau A.1, Annexe). Cette dernière hypothèse a été confirmée lors de la campagne de juillet 1981;
- . en ce qui concerne la variabilité des concentrations de métaux traces particulières à une station donnée (Tableau 5.4) elle est plus élevée à la station LR-05 (coefficient de variation de 15-20%) qu'aux stations BR-03 et LR-09 (coefficient de variation généralement inférieur à 10%).
- . il existe dans certains cas un gradient vertical important de concentrations de métaux traces entre les strates 0-2 cm et 8-10 cm (Tableau 5.5).

Ces observations ont joué un rôle important pour organiser les deux campagnes d'échantillonnage de l'été, notamment en ce qui concerne le choix des stations, le nombre d'échantillons de sédiments à prélever à une station, et la strate de sédiments à analyser.

5.1.2 Spéciation des métaux traces

Après avoir mesuré, pour toutes les stations échantillonnées en mai 1981, les concentrations des métaux traces particulières par une

attaque avec HNO_3 concentré, seize stations ont été sélectionnées pour qu'on y détermine la spéciation des métaux; pour le choix on s'est surtout basé sur les résultats présentés dans les Tableaux 5.1 à 5.3, en essayant de choisir un gradient important pour chacun des métaux traces. Le but de cet exercice était de vérifier si on pouvait espérer un gradient de concentration de métaux important pour chacune des fractions de la procédure de spéciation. Les stations choisies, ainsi que les résultats de la spéciation de Cu, Pb, Zn et Fe sont présentés dans les Tableaux 5.6 à 5.9; dans ces tableaux apparaissent également la somme des quatre premières fractions (S4), la somme des cinq fractions (S5) qui correspond à la concentration totale et le rapport $M(\text{F3})/\text{Fe}(\text{F3})$ où $M(\text{F3})$ correspond à la concentration du métal M dans la fraction 3. Ce dernier rapport a été calculé pour être utilisé comme guide, étant donné que Luoma et Bryan (1978) ont trouvé que l'accumulation du plomb dans Scrobicularia plana était corrélée avec le rapport $[\text{Pb}]/[\text{Fe}]$ lorsque ces métaux étaient extraits des sédiments avec HCl 1N.

Les résultats montrent les gammes de concentrations (exprimées en $\mu\text{g/g}$; poids sec) suivantes:

- . pour la fraction F1, <0.1-11.9 (Cu), <1-2.6 (Pb), 5.6-122 (Zn);
- . pour la fraction F2, 4.3-123 (Cu), 1.7-114 (Pb), 10.9-104 (Zn);
- . pour la fraction F3, 6.4-55.3 (Cu), 13.1-85.6 (Pb), 60.8-310 (Zn);
- . pour la fraction F4, 20.4-315 (Cu), 6.3-62.6 (Pb), 14.9-54.1 (Zn);
- . pour la fraction F5, 33.3-83.0 (Cu), 16.7-56.7 (Pb), 74.3-113 (Zn);

Tableau 5.6: Spéciation du cuivre particulaire ($f < 70 \text{ m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981^a.

Station	Fraction ^b					S4 ^c	S5 ^c	Cu(F3)/Fe(F3) ^d
	F1	F2	F3	F4	F5			
BE-03	<0.1	19.1	12.9	38.2	39.3	70.2	110	0.0021
BE-06	<0.1	20.0	17.5	39.0	40.0	76.5	117	0.0024
BE-07	<0.1	7.1	6.4	24.5	33.3	38.0	71.3	0.0015
BE-14	<0.1	13.8	13.5	26.4	36.0	53.7	89.7	0.0020
BE-15	0.2	21.7	13.9	52.5	45.7	88.1	134	0.0017
BE-18	0.1	28.3	14.4	67.7	58.3	111	169	0.0029
BR-01	<0.1	17.9	21.1	30.3	48.3	69.3	118	0.0049
BR-04	0.1	20.3	20.7	42.5	41.7	83.6	125	0.0048
BR-06	0.1	17.9	12.3	36.1	37.3	66.4	104	0.0039
BR-11	0.3	25.4	22.8	60.2	60.3	109	169	0.0052
LR-01	<0.1	4.3	10.2	150	67.0	165	232	0.0025
LR-02	11.9	80.5	50.9	118	61.7	261	323	0.0111
LR-04	<0.1	5.4	6.5	20.4	38.7	32.3	71.0	0.0014
LR-09	11.0	123	55.3	315	83.0	504	587	0.0045
LR-13	5.2	77.8	17.1	174	66.0	274	340	0.0032
LR-14	<0.1	10.4	9.6	27.0	35.0	47.0	82.0	0.0022

a : Concentrations en $\mu\text{g/g}$ (poids sec).

b : Les fractions F1, ..., F5 correspondent respectivement au cuivre échangeable ... au cuivre résiduel.

c : S4 et S5 correspondent respectivement aux sommes des quatre premières et des cinq fractions.

d : Cu(F3) et Fe(F3) correspondent respectivement au cuivre et au fer dans la fraction 3.

Tableau 5.7: Spéciation du plomb particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981^a.

Station	Fraction ^b					S4 ^c	S5 ^c	Pb(F3)/Fe(F3) ^d
	F1	F2	F3	F4	F5			
BE-03	<1	10.4	13.1	8.4	16.7	31.9	48.6	0.0052
BE-06	<1	4.4	31.2	10.5	23.3	28.1	51.4	0.0043
BE-07	1	5.7	20.7	6.3	23.3	21.7	45.0	0.0050
BE-14	<1	1.7	33.2	6.3	16.7	22.0	38.7	0.0048
BE-15	<1	4.4	41.5	12.6	30.0	34.5	64.5	0.0050
BE-18	<1	23.8	70.8	21.1	43.3	74.9	118	0.0142
BR-01	1	11.8	51.3	14.5	30.0	48.6	78.6	0.0119
BR-04	<1	9.5	51.3	14.6	23.3	45.4	68.7	0.0119
BR-06	<1	18.5	43.7	10.6	23.3	47.6	70.9	0.0140
BR-11	1	22.3	85.6	27.4	43.3	87.1	130	0.0195
LR-01	2.6	43.4	39.5	14.7	23.3	77.4	101	0.0095
LR-02	1.8	32.7	60.4	16.9	33.3	77.0	110	0.0132
LR-04	<1	9.8	44.0	14.9	30.0	43.5	73.5	0.0095
LR-09	2.6	114	20.4	62.6	56.7	265	322	0.0166
LR-13	1	37.2	81.4	29.5	43.3	101	145	0.0150
LR-14	<1	6.2	25.0	8.4	20.0	25.2	45.2	0.0057

a : Concentrations en $\mu\text{g/g}$ (poids sec).

b : Les fractions F1, ..., F5 correspondent respectivement au plomb échangeable ... au plomb résiduel.

c : S4 et S5 correspondent respectivement aux sommes des quatre premières et des cinq fractions.

d : Pb(F3) et Fe(F3) correspondent respectivement au plomb et au fer dans la fraction 3.

Tableau 5.8: Spéciation du zinc particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981^a.

Station	Fraction ^b					S4 ^c	S5 ^c	Zn(F3)/Fe(F3) ^d
	F1	F2	F3	F4	F5			
BE-03	14.6	84.3	182	19.1	75.7	195	270	0.0302
BE-06	25.4	59.9	183	20.9	78.9	183	262	0.0251
BE-07	8.6	43.7	103	17.6	72.0	113	185	0.0249
BE-14	21.8	45.5	161	18.0	74.3	153	228	0.0236
BE-15	44.9	71.4	225	30.4	91.3	242	333	0.0271
BE-18	36.7	67.4	233	40.3	79.0	243	322	0.0467
BR-01	9.6	29.4	119	18.1	81.7	107	188	0.0276
BR-04	17.0	36.8	133	18.1	75.3	127	203	0.0310
BR-06	21.2	32.9	111	16.3	73.3	117	191	0.0357
BR-11	30.6	50.4	163	27.2	113.0	177	290	0.0371
LR-01	32.6	44.1	106	30.5	100.0	152	252	0.0254
LR-02	85.4	39.9	211	29.3	87.7	244	332	0.0460
LR-04	5.6	10.9	60.8	14.9	93.7	57.4	151	0.0132
LR-09	38.3	104	305	39.3	108.0	311	419	0.0249
LR-13	122	95.1	310	54.1	112.0	403	515	0.0572
LR-14	18.6	29.2	143	20.5	78.7	129	207	0.0327

a : Concentrations en $\mu\text{g/g}$ (poids sec).

b : Les fractions F1, ..., F5 correspondent respectivement au zinc échangeable ... au zinc résiduel.

c : S4 et S5 correspondent respectivement aux sommes des quatre premières et des cinq fractions.

d : Pb(F3) et Fe(F3) correspondent respectivement au zinc et au fer dans la fraction 3.

Tableau 5.9: Spéciation du fer particulaire ($f < 70 \mu\text{m}$) pour des stations choisies parmi celles échantillonnées en mai 1981^a.

Station	Fraction ^b					S4 ^e	S5 ^e
	F1	F2	F3	F4	F5		
BE-03	1.8	580	6020	440	29700	3560	33300
BE-06	1.8	675	7280	670	28300	4430	32700
BE-07	4.4	520	4140	650	30300	2910	33200
BE-14	2.6	600	6850	480	28300	3970	32300
BE-15	0.9	575	8300	880	30700	4960	35660
BE-18	0.9	485	5000	820	31300	3420	34700
BR-01	0.9	178	4300	350	27700	2320	30000
BR-04	0.9	145	4300	440	26700	2380	29100
BR-06	2.6	194	3100	320	27300	1840	29100
BR-11	6.4	205	4400	490	30000	2560	32600
LR-01	824	1440	4200	460	32000	4480	36500
LR-02	4.5	435	4600	445	29000	2830	31800
LR-04	4.6	285	4610	850	36300	3110	39400
LR-09	21.0	1660	12300	500	31700	7360	39100
LR-13	4.5	585	5400	820	31000	3720	34700
LR-14	1.8	325	4370	590	31000	2770	33800

a : Concentrations en $\mu\text{g/g}$ (poids sec).

b : Les fractions F1, ..., F5 correspondent respectivement au fer échangeable ... au fer résiduel.

c : S4 et S5 correspondent respectivement aux sommes des quatre premières et des cinq fractions.

- . pour la somme des quatre premières fractions, S4, 32.3-504 (Cu), 21.7-265 (Pb), 57.4-403 (Zn);
- . pour les rapports M (F3)/Fe (F3): 0.0014-0.011 pour Cu (F3)/Fe (F3), 0.0043-0.0166 pour Pb (F3)/Fe (F3) et 0.0132-0.0572 pour Zn (F3)/Fe (F3).

Ces résultats ont également été pris en compte pour organiser les campagnes de juillet et septembre. On notera que, de façon systématique, les concentrations les plus élevées sont retrouvées dans le lac Routhier.

5.2 Caractéristiques générales des échantillons de carottes de sédiments

Les Tableaux 5.10 et 5.11 présentent les concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium respectivement dans les tranches 0-2 cm et 8-10 cm des carottes de sédiments pour la fraction granulométrique <850 µm:

Les concentrations de carbone organique sont généralement plus élevées dans la tranche 0-2 cm que dans celle de 8-10 cm; ceci est particulièrement vrai pour les stations BE-13 (1.06 vs 0.30%), BR-04 (2.61 vs 0.74%), BR-11 (1.12 vs 0.70%), LR-09 (1.13 vs 0.81%), MO-01 (0.77 vs 0.42%) et MO-02 (1.63 vs 1.28%). La station PE-01 montre une teneur particulièrement élevée de carbone organique, soit 7.24%.

Les concentrations de carbone inorganique ont également tendance à être plus élevée dans la tranche 0-2 cm que dans celle de 8-10 cm; c'est particulièrement vrai pour les stations BE-13 (1.22 vs 0.36%), BR-04 (1.44 vs 0.42%), BR-11 (1.43 vs 0.45%), LR-09 (1.85 vs 0.80%), LR-13 (1.35 vs 0.85%), LR-17 (1.43 vs 0.89%), MO-01 (0.80 vs 0.26%) et MO-02 (1.28 vs 0.75%). De nouveau, la station PE-01 se distingue des autres par sa teneur élevée en carbone inorganique (5.83%).

Tableau 5.10 : Concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans la tranche 0-2 cm de carottes de sédiments ($f < 850 \mu\text{m}$).

Station	[C _o] (%)	[C _i] (%)	[S] (%)	[Al] (%)	[Si] (%)
BE01	.55	.63	.06	11.8	71.0
BE03	.11	.14	.03	11.6	74.3
BE13	1.06	1.22	.08	12.9	64.7
BE16	.97	.68	.06	12.2	61.5
BR01	.61	.56	.04	12.9	67.5
BR04	2.61	1.44	.12	12.0	61.8
BR06	.16	.16	.03	11.3	73.6
BR11	1.12	1.43	.07	13.6	58.7
LR09	1.13	1.85	.16	13.4	57.1
LR13	1.16	1.35	.09	14.0	58.3
LR15	1.09	.99	.06	13.8	60.0
LR16	.39	.34	.03	11.7	72.2
LR17	1.31	1.43	.08	13.6	57.7
PE01	7.24	5.83	2.57	9.3	34.8
M001	.77	.80	.05	12.3	67.7
M002	1.63	1.28	.07	12.0	66.2

Tableau 5.11 : Concentrations de carbone organique, de carbone inorgan-
 nique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans la
 tranche 8-10 cm de carottes de sédiments (f < 850 µm).

Station	[C _o] (%)	[C _i] (%)	[S] (%)	[Al] (%)	[Si] (%)
BE01	.56	.41	.05	11.6	72.0
BE03	.23	.33	.04	14.8	60.8
BE13	.30	.36	.09	13.4	66.2
BE16	.94	.58	.10	15.4	57.7
BR01	.45	.32	.04	13.9	66.6
BR04	.74	.42	.04	15.4	58.5
BR06	.29	.18	.03	11.7	74.1
BR11	.70	.45	.04	14.8	61.8
LR09	.81	.80	.14	13.6	62.2
LR13	1.05	.85	.07	13.8	63.0
LR15	.93	.62	.05	13.4	64.0
LK16	.59	.41	.03	12.6	70.1
LR17	1.40	.89	.19	13.9	61.5
PE01	7.24	5.83	2.57	9.3	34.8
M001	.42	.26	.04	14.8	61.1
M002	1.28	.75	.05	13.6	64.0

Les teneurs en soufre présentent moins de différences entre les tranches 0-2 et 8-10 cm que les deux paramètres précédents. Par ailleurs, la station PE-01 présente une teneur en soufre (2.57%) qui est de 13 à 85 fois plus élevée qu'aux autres stations. Les concentrations d'aluminium et de silicium varient également peu entre les tranches 0-2 et 8-10 cm. De nouveau, la station PE-01 se distingue nettement des autres avec des concentrations d'aluminium et de silicium beaucoup plus faibles.

5.3 Spéciation des métaux traces dans les échantillons de carottes de sédiments

La spéciation des métaux traces dans les tranches 0-2 cm et 8-10 cm des carottes de sédiments est présentée dans les Tableaux 5.12 à 5.19. Rappelons que la fraction granulométrique $f < 850 \mu\text{m}$ a été utilisée pour les déterminations. La spéciation dans ces sédiments sera ultérieurement comparée avec les teneurs en métaux traces dans les plantes; il s'agit de stations où Nuphar variegatum a été prélevé. Les résultats sont discutés pour chaque métal individuellement; les pourcentages donnés sont des moyennes pour toutes les stations, à moins d'indication contraire.

5.3.1 Cuivre

Les concentrations de cuivre échangeable sont systématiquement plus élevées, lorsque mesurables, dans la tranche 0-2 cm que dans celle de 8-10 cm; les concentrations sont particulièrement élevées aux stations LR-09 et LR-17. De façon systématique, les concentrations de Cu (F2) sont plus élevées en surface (0-2 cm) qu'en profondeur (8-10 cm); de même les pourcentages du cuivre particulaire total retrouvés dans cette fraction sont plus élevés dans la tranche 0-2 cm (15.7%) que dans celle de 8-10 cm (2.9%). Les concentrations les plus élevées se retrouvent dans le lac Routhier (stations LR-09 et LR-13).

Tableau 5.12: Spéciation du cuivre particulaire dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique < 850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	1.8	12.5	11.4	23.1	14.0	14.3	25.7	48.8	62.8
BE03	.4	5.6	7.1	3.9	6.0	6.0	13.1	17.0	23.0
BE13	.3	21.4	13.7	45.0	30.7	21.7	35.4	80.4	111.1
BE16	-.1	5.9	7.8	15.5	16.7	5.9	13.7	29.2	45.9
BR01	.1	13.9	18.8	21.9	25.0	14.0	32.8	54.7	79.7
BR04	1.1	25.0	9.0	139.0	40.7	26.1	35.1	174.1	214.8
BR06	-.1	5.5	7.4	5.8	6.7	5.5	12.9	18.7	25.4
BR11	.4	33.8	45.9	65.0	61.3	34.2	80.1	145.1	206.4
LR09	53.6	179.0	12.4	424.0	82.0	232.6	245.0	669.0	751.0
LR13	18.4	101.0	12.6	217.0	63.0	119.4	132.0	349.0	412.0
LR15	3.3	50.2	16.6	120.0	56.7	53.5	70.1	190.1	246.8
LR16	-.1	.8	2.2	3.5	6.7	.8	3.0	6.5	13.2
LR17	21.8	54.2	15.7	105.0	55.7	76.0	91.7	196.7	252.4
PE01	-.1	1.6	5.6	1500.0	161.0	1.6	7.2	1507.2	1668.2
M001	-.1	2.3	4.1	10.0	12.7	2.3	6.4	16.4	29.1
M002	.1	1.6	2.7	19.4	16.7	1.7	4.4	23.8	40.5
Moyenne	-	32.4	12.1	170	41.0	38.5	50.5	220	261
Ecart-type	-	47.5	10.3	371	40.1	61.1	63.9	383	422

-59-

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (cuivre échangeable) ... fraction 5 (cuivre résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.13: Spéciation du plomb dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	.9	5.2	8.3	-2.1	6.7	6.1	14.4	14.4	21.1
BE03	-.8	3.4	-2.1	-2.1	3.3	3.4	3.4	3.4	6.7
BE13	.9	10.6	27.1	4.2	10.0	11.5	38.6	42.8	52.8
BE16	.9	5.1	12.3	-2.1	3.3	6.0	18.3	18.3	21.6
IR01	-.9	10.5	37.2	4.2	13.3	10.5	47.7	51.9	65.2
IR04	2.7	24.6	43.7	12.7	20.0	27.3	71.0	83.7	103.7
IR06	-.8	5.1	8.2	-2.1	3.3	5.1	13.3	13.3	16.6
IR11	-.9	13.5	71.0	16.8	26.7	13.5	84.5	101.3	128.0
RO9	7.3	41.8	145.0	41.8	46.7	49.1	194.1	235.9	282.6
R13	6.3	51.7	82.1	18.8	26.7	58.0	140.1	158.9	185.6
R15	.9	21.2	49.7	12.5	20.0	22.1	71.8	84.3	104.3
R16	-.9	1.7	2.0	-2.1	3.3	1.7	3.7	3.7	7.0
R17	3.6	19.6	39.5	12.6	23.3	23.2	62.7	75.3	98.6
E01	-1.1	42.0	159.0	135.0	160.0	42.0	201.0	336.0	496.0
001	-.9	8.7	8.3	-2.1	6.7	8.7	17.0	17.0	23.7
002	-.9	6.2	8.3	2.1	13.3	6.2	14.5	16.6	29.9
oyenne	-	16.9	44.0	-	24.2	18.4	62.3	78.6	103
cart-type	-	15.6	48.7	-	38.1	17.4	64.3	93.4	129

F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (plomb échangeable) ... fraction 5 (plomb résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.14: Spéciation du zinc particulaire dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	37,9	14,3	44,2	3,1	26,7	52,2	96,4	99,5	126,2
BE03	9,6	7,6	22,2	0,8	23,4	17,2	39,4	40,2	63,6
BE13	43,9	53,9	131,0	10,7	55,0	97,8	228,8	239,5	294,5
BE16	14,3	17,6	59,2	5,2	54,0	31,9	91,1	96,3	150,3
BR01	10,6	20,3	80,6	7,1	51,7	30,9	111,5	118,6	170,3
BR04	55,7	38,9	101,0	16,7	57,7	94,6	195,6	212,3	270,0
BR06	2,6	8,0	25,6	1,2	26,0	10,6	36,2	37,4	63,4
BR11	16,8	39,2	168,0	23,1	106,0	56,0	224,0	247,1	353,1
LR09	461,0	138,0	368,0	40,3	110,0	599,0	967,0	1007,3	1117,3
LR13	274,0	108,0	343,0	45,6	99,0	382,0	725,0	770,6	869,6
LR15	116,0	84,7	326,0	48,3	113,0	200,7	526,7	575,0	688,0
LR16	1,1	2,0	14,7	1,4	26,7	3,1	17,8	19,2	45,9
LR17	77,9	20,9	77,8	14,1	80,3	98,8	176,6	190,7	271,0
PE01	5,5	231,0	1080,0	297,0	103,0	236,5	1316,5	1613,5	1716,5
M001	4,0	5,7	25,9	4,6	35,7	9,7	35,6	40,2	75,9
M002	5,2	7,3	27,5	6,5	38,0	12,5	40,0	46,5	84,5
Moyenne	71,0	49,8	181	32,9	62,9	121	302	335	398
Ecart-type	125	62,7	268	72,2	33,7	164	385	447	472

^z F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (zinc échangeable) ... fraction 5 (zinc résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.15: Spéciation du fer particulaire dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	1,7	294,0	3470,0	150,0	15700,0	295,7	3765,7	3915,7	19615,7
BE03	-,8	107,0	1710,0	43,3	15000,0	107,0	1817,0	1860,3	16860,3
BE13	-,9	424,0	5620,0	335,0	18300,0	424,0	6044,0	6379,0	24679,0
BE16	-,9	80,4	3730,0	236,0	25300,0	80,4	3810,4	4046,4	29346,4
BR01	-,9	152,0	4160,0	154,0	20700,0	152,0	4312,0	4466,0	25166,0
BR04	1,8	282,0	4170,0	907,0	19000,0	283,8	4453,8	5360,8	24360,8
BR06	-,8	66,8	1800,0	53,8	13300,0	66,8	1866,8	1920,6	15220,6
BR11	,9	180,0	7930,0	376,0	25700,0	180,9	8110,9	8486,9	34186,9
LR09	28,3	1520,0	18100,0	815,0	29000,0	1548,3	19648,3	20463,3	49463,3
LR13	7,2	650,0	6740,0	627,0	27700,0	657,2	7397,2	8024,2	35724,2
LR15	1,8	415,0	5590,0	439,0	26000,0	416,8	6006,8	6445,8	32445,8
LR16	-,9	86,8	2300,0	112,0	14000,0	86,8	2386,8	2498,8	16498,8
LR17	7,2	721,0	7690,0	630,0	26700,0	728,2	8418,2	9048,2	35748,2
PE01	2240,0	8200,0	34400,0	9640,0	50300,0	10440,0	44840,0	54480,0	104780,0
M001	,9	97,2	2570,0	220,0	19700,0	98,1	2668,1	2888,1	22588,1
M002	,9	130,0	2680,0	422,0	18300,0	130,9	2810,9	3232,9	21532,9
Moyenne	-	838	7041	948	22800	981	8022	8970	31800
Ecart-type	-	2000	8300	2330	8970	2550	10720	12900	21500

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (fer échangeable) ... fraction 5 (fer résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.16: Spéciation du cuivre dans la tranche 8-10 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	-.1	.7	9.6	14.4	7.3	.7	10.3	24.7	32.0
BE03	-.1	.4	4.1	6.9	21.0	.4	4.5	11.4	32.4
BE13	-.1	.6	3.7	5.7	9.0	.6	4.3	10.0	19.0
BE16	-.1	.4	4.3	6.9	21.7	.4	4.7	11.6	33.3
BR01	-.1	2.0	9.9	11.8	21.3	2.0	11.9	23.7	45.0
BR04	-.1	.4	2.9	8.2	27.7	.4	3.3	11.5	39.2
BR06	-.1	.2	1.9	2.5	4.7	.2	2.1	4.6	9.3
BR11	-.1	.2	2.7	2.7	16.3	.2	2.9	5.6	21.9
LR09	16.3	39.4	8.1	325.0	61.3	55.7	63.8	388.8	450.1
LR13	-.1	1.4	2.3	9.7	22.0	1.4	3.7	13.4	35.4
LR15	-.1	.4	1.7	3.6	15.0	.4	2.1	5.7	20.7
LR16	-.1	.1	1.0	1.9	9.0	.1	1.1	3.0	12.0
LR17	2.0	18.6	6.8	153.0	45.7	20.6	27.4	180.4	226.1
PE01	-.1	1.6	5.6	1500.0	161.0	1.6	7.2	1507.2	1668.2
M001	-.1	1.0	5.2	3.6	17.0	1.0	6.2	9.8	26.8
M002	-.1	.4	1.5	3.2	14.7	.4	1.9	5.1	19.8
Moyenne	-	4.2	4.5	129	29.7	5.4	9.8	139	168
Ecart-type	-	10.4	2.9	375	37.9	14.3	15.7	378	416

-63-

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (cuivre échangeable) ... fraction 5 (cuivre résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.17: Spéciation du plomb dans la tranche 8-10 cm de carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^z.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	=.9	=.9	=2.1	=2.1	=3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
BE03	=.9	=.9	=2.1	=2.1	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
BE13	=.9	=.9	=2.1	=2.1	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
BE16	=.9	=.9	=2.1	2.1	6.7	0.0	0.0	2.1	8.8
BR01	=.9	1.7	4.2	=2.1	13.3	1.7	5.9	5.9	19.2
BR04	=.9	=.9	=2.1	=2.1	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
BR06	=.9	=.9	2.1	=2.1	6.7	0.0	2.1	2.1	8.8
BR11	=.9	=.9	=2.1	=2.1	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
LR09	1.8	11.2	12.4	8.4	33.9	13.0	25.4	33.8	67.7
LR13	=.9	1.7	2.1	=2.1	10.0	1.7	3.8	3.8	13.8
LR15	=.9	=.9	2.1	=2.1	6.6	0.0	2.1	2.1	8.7
LR16	=.9	=.9	=2.1	=2.1	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3
LR17	.9	13.2	12.4	5.3	10.0	14.1	26.5	31.8	41.8
PE01	-1.1	42.0	159.0	135.0	160.0	42.0	201.0	336.0	496.0
M001	=.9	=.9	=2.1	=2.1	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
M002	=.9	.9	=2.1	=2.1	10.0	.9	.9	.9	10.9
Moyenne	-	-	-	-	18.8				
Ecart-type	-	-	-	-	38.3				

-64-

^z F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (plomb échangeable) ... fraction 5 (plomb résiduel).
 S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.
 Les concentrations sont en µg/g (poids sec).
 Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.18: Spéciation du zinc dans la tranche 8-10 cm des carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	.1	.8	13.3	2.1	27.0	.9	14.2	16.3	43.3
BE03	-.1	1.0	10.9	3.6	70.0	1.0	11.9	15.5	85.5
BE13	-.1	.9	10.1	2.3	46.7	.9	11.0	13.3	60.0
BE16	-.1	.8	13.4	5.9	79.7	.8	14.2	20.1	99.8
BR01	.4	5.0	20.5	5.0	58.3	5.4	25.9	30.9	89.2
BR04	-.1	1.0	12.9	4.4	82.7	1.0	13.9	18.3	101.0
BR06	.3	.5	8.9	1.5	24.0	.8	9.7	11.2	35.2
BR11	.1	.9	15.6	5.5	80.0	1.0	16.6	22.1	102.1
LR09	157.0	39.0	139.0	43.0	101.0	196.0	335.0	378.0	479.0
LR13	4.4	4.6	22.4	5.9	68.3	9.0	31.4	37.3	105.6
LR15	.3	5.5	17.6	4.0	57.3	5.8	23.4	27.4	84.7
LR16	.2	.5	12.2	3.5	44.3	.7	12.9	16.4	60.7
LR17	245.0	40.7	129.0	36.2	85.7	285.7	414.7	450.9	536.6
PE01	5.5	231.0	1080.0	297.0	103.0	236.5	1316.5	1613.5	1716.5
M001	-.9	1.0	14.0	4.0	61.0	1.0	15.0	19.0	80.0
M002	-.9	.7	13.4	7.1	63.0	.7	14.1	21.2	84.2
Moyenne	-	20.9	95.8	26.9	65.8	46.7	143	169	235
Ecart-type	-	57.5	266	73.0	23.0	97.0	336	408	422

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (zinc échangeable) ... fraction 5 (zinc résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.19: Spéciation du fer dans la tranche 8-10 cm de carottes de sédiments (fraction granulométrique <850 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
BE01	0,9	24,0	1910,0	163,0	14700,0	24,9	1934,9	2097,9	16797,9
BE03	1,8	256,0	4200,0	172,0	32000,0	257,8	4457,8	4629,8	36629,8
BE13	1,7	115,0	3270,0	325,0	23000,0	116,7	3386,7	3711,7	26711,7
BE16	6,1	122,0	4130,0	544,0	32300,0	128,1	4258,1	4802,1	37102,1
BR01	1,7	120,0	3020,0	216,0	25700,0	121,7	3141,7	3357,7	29057,7
BR04	3,5	157,0	4560,0	416,0	33300,0	160,5	4720,5	5136,5	38436,5
BR06	-0,9	20,6	1630,0	109,0	13700,0	20,6	1650,6	1759,6	15459,6
BR11	17,0	148,0	4360,0	283,0	30700,0	165,0	4525,0	4808,0	35508,0
LR09	101,0	1471,0	5810,0	843,0	26300,0	1572,0	7382,0	8225,0	34525,0
LR13	8,0	216,0	3940,0	436,0	26000,0	224,0	4164,0	4600,0	30600,0
LR15	1,7	80,7	2940,0	348,0	25000,0	82,4	3022,4	3370,4	28370,4
LR16	5,0	163,0	3210,0	258,0	19000,0	168,0	3378,0	3636,0	22636,0
LR17	102,0	738,0	4760,0	1228,0	28000,0	840,0	5600,0	6828,0	34828,0
PE01	2240,0	8200,0	34400,0	9640,0	50300,0	10440,0	44840,0	54480,0	104780,0
M001	2,6	97,5	4340,0	153,0	31300,0	100,1	4440,1	4593,1	35893,1
M002	4,4	129,0	4060,0	483,0	26300,0	133,4	4193,4	4676,4	30976,4
Moyenne	156	754	5660	976	27400	910	6570	7540	34900
Ecart-type	557	2020	7740	2330	8500	2570	10300	12600	19900

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (fer échangeable) ... fraction 5 (fer résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Les concentrations de Cu (F3) sont systématiquement plus grandes dans la tranche 0-2 cm que dans celle de 8-10 cm; par ailleurs, les pourcentages du cuivre particulaire total sont semblables, étant respectivement de 13.3% (0-2 cm) et de 12.0% (8-10 cm). Les concentrations de Cu(F4) sont également plus élevées en surface qu'en profondeur; c'est particulièrement vrai pour les stations BE-13 (45.0 vs 5.7), BR-04 (139 vs 8.2), BR-11 (65.0 vs 16.3), LR-13 (217 vs 9.7) et LR-15 (120 vs 3.6). Les pourcentages du cuivre particulaire total s'établissent respectivement à 42.1% (0-2 cm) et 32.7% (8-10 cm). Le cuivre particulaire est habituellement caractérisé par de fortes proportions du métal total associé à la fraction 4 (Tessier et al., 1980); ce résultat peut être expliqué en partie par le fait que pour la plupart des ligands, le cuivre montre des constantes de stabilité (pour la formation de complexes) élevées. Les concentrations de Cu(F5) sont souvent un peu plus élevées en surface qu'en profondeur et représentent respectivement 27.2% (0-2 cm) et 52.1% (8-10 cm) du cuivre particulaire total.

Les gammes de concentrations dans chacune des fractions sont (en g/g, poids sec):

- pour F1, <0.1-53.6 (0-2 cm) et <0.1-16.3 (8-10 cm);
- pour F2, 0.8-179 (0-2 cm) et 0.1-39.4 (8-10 cm);
- pour F3, 2.2-45.9 (0-2 cm) et 1.0-9.9 (8-10 cm);
- pour F4, 3.5-1500 (0-2 cm) et 1.9-1500 (8-10 cm);
- pour F5, 6.0-161 (0-2 cm) et 4.7-161 (8-10 cm).

5.3.2 Plomb

Les concentrations de plomb échangeable, lorsque plus élevées que la limite de sensibilité, ne représentent qu'un faible pourcentage du plomb particulaire total; elles sont plus élevées en surface qu'en

profondeur. Dans la fraction 2, les concentrations sont toujours plus élevées en surface qu'en profondeur où on ne mesure que peu de valeurs au-dessus du seuil de sensibilité; Pb(F2), en surface, représente 23.3% du plomb particulaire total.

Dans la fraction 3, on retrouve de nouveau des concentrations plus élevées en surface qu'en profondeur où on note plusieurs valeurs en-dessous de la limite de sensibilité; le plomb dans cette fraction représente en surface 43.9% du plomb particulaire total. Ce fort pourcentage de plomb dans la fraction 3 est une caractéristique de ce métal (Tessier et al., 1980). Les concentrations de Pb(F4) sont souvent plus faibles que la limite de sensibilité, quoique les stations du lac Routhier et du lac Pelletier (tranche 0-2 cm) fassent exception à cette règle. On remarquera que ces stations présentent en général des concentrations de carbone organique et de sulfures plus élevées que les autres. Pour les stations où Pb(F4) est mesurable, sa concentration en surface représente environ 12% du plomb particulaire total. Les concentrations de Pb(F5) sont assez semblables en surface et en profondeur; ces dernières (0-2 cm) représentent 26% du plomb particulaire total.

Les gammes de concentrations ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans chacune des fractions sont:

- pour F1, <0.9-7.3 (0-2 cm) et <0.9-1.8 (8-10 cm);
- pour F2, 1.7-51.7 (0-2 cm) et <0.9-42.0 (8-10 cm);
- pour F3, <2.1-159 (0-2 cm) et <2.1-159 (8-10 cm);
- pour F4, <2.1-135 (0-2 cm) et <2.1-135 (8-10 cm);
- pour F5, 3.3-160 (0-2 cm) et 3.3-160 (8-10 cm).

5.3.3 Zinc

Les concentrations du zinc échangeable sont généralement beaucoup plus élevées en surface qu'en profondeur; la seule exception est la station LR-17 où on observe la situation inverse. Les concentrations de zinc échangeable sont spécialement élevées dans le lac Routhier (sauf à la station LR-16). La concentration de Zn(F1), en surface représente 12.9% du zinc particulaire total, ce qui est appréciable; les stations du lac Routhier contribuent fortement à ce fort pourcentage moyen. Par exemple, les stations LR-09 et LR-13 présentent respectivement des pourcentages de 41.3 et 31.5 en surface. Même en profondeur, certaines stations (LR-09: 32.8% et LR-17: 45.7%) présentent de forts pourcentages.

Les concentrations de Zn(F2) sont systématiquement beaucoup plus élevées en surface qu'en profondeur; elles représentent respectivement 11.0% (0-2 cm) et 3.6% (8-10 cm) du zinc particulaire total. De même façon, sauf pour LR-17, les concentrations de Zn(F3) sont plus élevées en surface qu'en profondeur; elles correspondent respectivement à 38.6% (0-2 cm) et 22.6% (8-10 cm) du zinc particulaire total. On trouve habituellement de fortes proportions de zinc associées aux oxydes de fer et de manganèse et peu d'associées à la matière organique (Tessier et al., 1980). En accord avec ces constatations, on mesure des concentrations de Zn(F4) relativement faibles et souvent plus élevées en surface qu'en profondeur; elles représentent respectivement 5.2% (0-2 cm) et 6.3% (8-10 cm) du zinc particulaire total. Les concentrations de Zn(F5) sont aussi, de façon générale, plus élevées en surface qu'en profondeur; elles correspondent respectivement à 27.6% (0-2 cm) et 62.2% (8-10 cm) du zinc particulaire total.

Les gammes de concentrations ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans chacune des fractions sont:

- . pour F1, 1.1-461 (0-2 cm) et <0.1-245 (8-10 cm);
- . pour F2, 2.0-231 (0-2 cm) et 0.5-231 (8-10 cm);

- . pour F3, 14.7-1080 (0-2 cm) et 8.9-1080 (8-10 cm);
- . pour F4, 0.8-297 (0-2 cm) et 1.5-297 (8-10 cm);
- . pour F5, 26.0-113 (0-2 cm) et 24.0-103 (8-10 cm).

5.3.4 Fer

Les concentrations de fer échangeable, contrairement aux autres métaux, sont plus élevées en profondeur qu'en surface, ce qui est normal puisqu'on s'attend à des concentrations de fer réduit plus élevées lorsque le milieu est réducteur. Ainsi, on trouve que Fe(F1) représente, dans la strate 8-10 cm, 0.19% du fer particulaire total; ces résultats sont beaucoup plus élevés que ceux observés par exemple pour des sédiments en suspension dans les rivières Yamaska (0.007%) et Saint-François (0.008%) (Tessier et al., 1980).

Par contre, les concentrations de Fe(F2) sont tantôt plus élevées, tantôt plus faibles en surface qu'en profondeur; elles représentent respectivement à 1.5% (0-2 cm) et 1.4% (8-10 cm). Les concentrations de Fe(F3) se comportent un peu de la même manière; elles correspondent respectivement à 18.5% (0-2 cm) et 13.6% (8-10 cm) du fer particulaire total. Le même comportement est observé pour Fe(F4); les concentrations correspondent respectivement à 1.8% (0-2 cm) et 1.7% (8-10 cm) du fer particulaire total. Finalement, les concentrations de Fe(F5) sont généralement un peu plus élevées en profondeur qu'en surface; elles représentent respectivement 78.0% (0-2 cm) et 83.2% (8-10 cm) du fer particulaire total.

5.4 Caractéristiques granulométriques des sédiments ingérés par les bivalves

Si l'on veut mettre en relation la spéciation des métaux traces et leur accumulation dans les bivalves, il est alors important d'avoir des informations sur les dimensions des particules ingérées par ces orga-

nismes; en effet, la spéciation des métaux traces particulières est fonction de la granulométrie des sédiments (Gibbs, 1977; Tessier et al., 1982).

Dans le but d'obtenir ces informations, on a donc prélevé, lors de la dissection des organismes, le contenu intestinal de chacune des deux espèces; cinq organismes de chaque espèce, provenant de cinq sites différents, étaient utilisés pour obtenir suffisamment de matériel. Le matériel ainsi obtenu était ensuite traité avec H₂O₂ 30% (5 ml; évaporation à chaud jusqu'à environ 1 ml); le but de ce traitement était de digérer le mucus intestinal qui a tendance à agglomérer les particules. Le matériel ainsi traité était dilué dans une solution de NaCl (1%), de NaN₃ (0.1%) et de métaphosphate (0.4%), et la distribution des particules était obtenue à l'aide d'un compteur de particules (Coulter Counter, modèle TA, cellule de 400 µm).

La distribution des particules est présentée sur la Figure 5.1 pour Elliptio complanata et pour Anodonta grandis. D'après ces résultats, la dimension limite des particules ingérées se situerait entre 50 et 80 µm. Ces résultats doivent cependant être pris à titre indicatif seulement, car l'emploi de peroxyde d'hydrogène pour se départir du mucus a sûrement détruit également des particules organiques; ils indiquent cependant que le choix de $f < 70$ µm pour mettre en relation la spéciation des métaux traces et leur accumulation dans les mollusques est réaliste.

5.5 Caractéristiques générales des échantillons de sédiments de surface

Le Tableau 5.20 présente les concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans les sédiments de surface de fraction granulométrique < 70 µm.

Les concentrations de carbone organique et inorganique présentent des gradients intéressants: 0.43 - 1.54% (carbone organique); 0.48 -

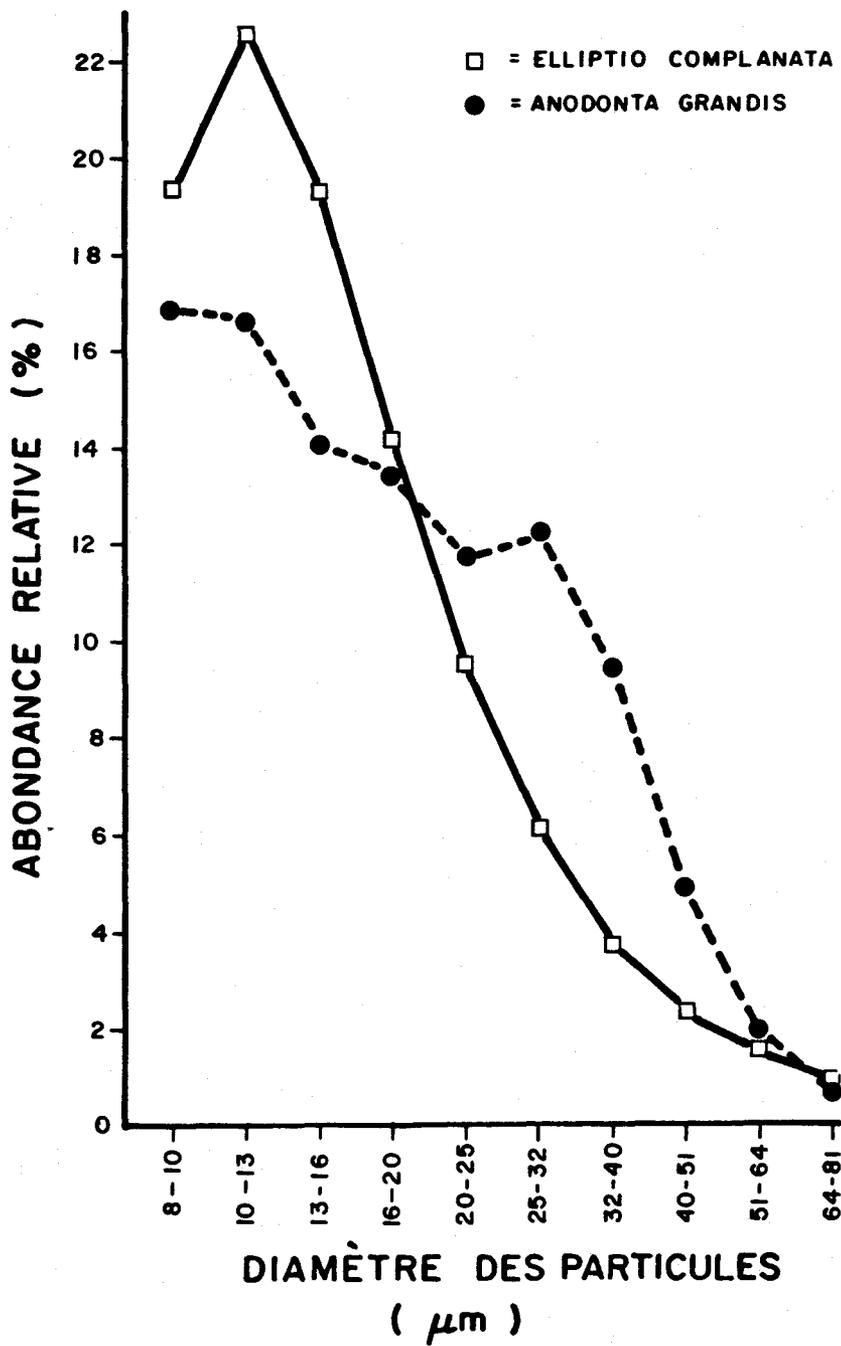


Figure 5.1: Distribution des particules en fonction de leur volume dans l'intestin des bivalves.

Tableau 5.20: Concentrations de carbone organique, de carbone inorganique, de soufre, d'aluminium et de silicium dans les sédiments superficiels de fraction granulométrique <70 µm.

Station	[C _o] (%)	[C _I] (%)	[S] (%)	[Al] (%)	[Si] (%)
M001	.43	.48	.03	12.5	68.1
M002	.90	.86	.05	13.3	61.3
M003	.46	.61	.04	13.5	65.3
BE01	.84	.76	.10	12.5	64.6
BE03	.74	.89	.07	12.9	63.7
BE11	.72	.94	.05	13.5	61.6
BE13	.71	1.12	.07	13.3	63.0
BE15	.78	.98	.06	13.8	61.1
BE16	1.54	1.30	.12	14.3	57.5
BR01	.56	.76	.05	13.7	63.1
BR04	.78	.81	.05	13.1	62.8
BR06	.75	.91	.06	13.5	62.0
BR11	.84	1.26	.06	14.0	61.6

1.30% (carbone inorganique); ils sont cependant moins élevés que ceux présentés dans les Tableaux 5.10 et 5.11, dû surtout à l'absence de stations dans les lacs Routhier et Pelletier.

Les concentrations de soufre, même si elles présentent un gradient acceptable (0.03 - 0.12%), ne sont pas élevées. Les concentrations d'aluminium et de silicium varient peu.

5.6 Spéciation des métaux traces dans les échantillons de sédiments de surface

La spéciation des métaux traces dans les sédiments de surface de fraction granulométrique $<70 \mu\text{m}$ est présentée dans les Tableaux 5.21 à 5.24. La spéciation dans ces sédiments sera ultérieurement comparée avec les teneurs en métaux traces dans les bivalves (Elliptio complanata et Anodonta grandis). Les résultats sont discutés brièvement pour chaque métal individuellement; les pourcentages indiqués sont des moyennes pour toutes les stations, à moins d'indication contraire.

5.6.1 Cuivre

Les concentrations de cuivre échangeable sont faibles (Tableau 5.21), lorsque mesurables; elles sont généralement plus faibles que celles mesurées en surface dans les carottes (Tableau 5.12). Dépendant des stations, les concentrations de Cu(F2) sont plus élevées ou plus faibles dans les sédiments superficiels que dans la tranche 0-2 cm des carottes; elles représentent 13.0% du cuivre particulaire total. Les concentrations de Cu(F3), Cu(F4) et Cu(F5) sont généralement plus élevées dans les sédiments superficiels que dans la tranche 0-2 cm des carottes, quoique la tendance ne soit pas systématique; ces concentrations représentent respectivement 14.3, 33.4 et 39.3% du cuivre particulaire total.

Les gammes de concentrations (en $\mu\text{g/g}$, poids sec) dans chacune des fractions sont:

Tableau 5.21: Spéciation du cuivre particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique <70 μm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
M001	.1	2.1	4.3	5.2	12.0	2.2	6.5	11.7	23.7
M002	.1	1.9	6.0	7.7	25.0	2.0	8.0	15.7	40.7
M003	-.1	2.8	6.4	4.8	21.0	2.8	9.2	14.0	35.0
BE01	-.1	8.3	12.8	69.6	35.7	8.3	21.1	90.7	126.4
BE03	-.1	17.5	13.8	40.3	35.7	17.5	31.3	71.6	107.3
BE11	.2	18.8	18.4	38.7	40.7	19.0	37.4	76.1	116.8
BE13	.2	18.0	14.3	40.3	42.3	18.2	32.5	72.8	115.1
BE15	.5	22.0	17.0	43.7	43.0	22.5	39.5	83.2	126.2
BE16	-.1	13.7	7.9	69.1	54.7	13.7	21.6	90.7	145.4
BR01	.2	18.1	20.2	28.7	38.3	18.3	38.5	67.2	105.5
BR04	.2	19.4	18.1	43.7	39.3	19.6	37.7	81.4	120.7
BR06	.3	23.7	17.8	54.9	45.3	24.0	41.8	96.7	142.0
BR11	.1	27.8	31.4	61.5	59.3	27.9	59.3	120.8	180.1
Moyenne	-	14.9	14.5	39.1	37.9	15.1	29.6	68.7	107
Ecart-type	-	8.6	7.4	22.4	12.9	8.6	15.5	34.1	46.2

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (cuivre échangeable) ... fraction 5 (cuivre résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en $\mu\text{g/g}$ (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.22: Spéciation du plomb particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique <70 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
M001	-0,9	4,3	14,5	-2,1	10,0	4,3	18,8	18,8	28,8
M002	-0,9	2,6	20,8	2,1	20,0	2,6	23,4	25,5	45,5
M003	-0,9	2,6	14,4	-2,1	13,3	2,6	17,0	17,0	30,3
BE01	-0,9	13,9	24,8	4,2	23,3	13,9	38,7	42,9	66,2
BE03	-0,9	8,6	26,8	6,3	23,3	8,6	35,4	41,7	65,0
BE11	-0,9	3,5	26,9	8,3	23,3	3,5	30,4	38,7	62,0
BE13	-0,9	6,1	33,1	8,3	26,7	6,1	39,2	47,5	74,2
BE15	-0,9	6,1	31,1	10,4	23,3	6,1	37,2	47,6	70,9
BE16	-0,9	14,9	27,0	10,5	33,3	14,9	41,9	52,4	85,7
BR01	-0,9	13,0	49,5	8,3	26,7	13,0	62,5	70,8	97,5
BR04	-0,9	10,4	45,4	8,4	26,7	10,4	55,8	64,2	90,9
BR06	-0,9	12,2	51,6	8,4	26,7	13,1	64,7	73,1	99,8
BR11	-0,9	16,7	77,0	21,0	36,7	16,7	93,7	114,7	151,4
Moyenne	-	8,8	34,1	8,8	24,1	8,9	43,0	50,4	74,5
Ecart-type	-	5,0	17,6	4,8	7,1	5,0	21,4	26,3	32,5

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (plomb échangeable) ... fraction 5 (plomb résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.23: Spéciation du zinc particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique <70 µm)^a.

Fraction	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
M001	1,5	5,1	31,8	4,0	36,0	6,6	38,4	42,4	78,4
M002	1,1	7,2	51,5	6,9	66,0	8,3	59,8	66,7	134,7
M003	,4	7,8	44,8	5,9	60,0	8,2	53,0	58,9	118,9
BE01	29,4	75,3	160,0	16,3	58,3	104,7	264,7	281,0	339,3
BE03	19,1	64,5	177,0	15,2	65,7	83,6	260,6	275,8	341,5
BE11	19,3	55,9	195,0	20,2	79,0	75,2	270,2	290,4	369,4
BE13	36,9	64,2	204,0	19,2	82,3	101,1	305,1	324,3	406,6
BE15	54,6	70,1	214,0	24,2	84,0	124,7	338,7	362,9	446,9
BE16	16,0	65,5	206,0	40,2	105,0	81,5	287,5	327,7	432,7
BR01	7,8	17,6	123,0	13,3	80,7	25,4	148,4	161,7	242,4
BR04	10,0	34,1	139,0	13,6	68,3	44,1	183,1	196,7	265,0
BR06	13,8	41,4	163,0	18,6	81,3	55,2	218,2	236,8	318,1
BR11	13,4	49,1	215,0	33,0	112,0	62,5	277,5	310,5	422,5
Moyenne	17.2	42.9	148.0	17.7	75.4	60.1	208	226	301
Ecart-type	15.5	26.0	66.4	10.3	19.8	39.6	103	111	125

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (zinc échangeable) ... fraction 5 (zinc résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

Tableau 5.24: Spéciation du fer particulaire dans les sédiments superficiels (fraction granulométrique <70 µm)^a.

Station	F1	F2	F3	F4	F5	S2	S3	S4	S5
M001	.9	67.0	2830.0	112.0	21300.0	67.9	2897.9	3009.9	24309.9
M002	2.6	90.7	4980.0	207.0	29300.0	93.3	5073.3	5280.3	34580.3
M003	4.3	57.0	3880.0	117.0	28000.0	61.3	3941.3	4058.3	32058.3
BE01	15.6	669.0	5990.0	261.0	25700.0	684.6	6674.6	6935.6	32635.6
BE03	7.0	673.0	7220.0	238.0	27700.0	680.0	7900.0	8138.0	35838.0
BE11	5.3	381.0	7660.0	283.0	30000.0	386.3	8046.3	8329.3	38329.3
BE13	7.1	811.0	8910.0	257.0	29700.0	818.1	9728.1	9985.1	39685.1
BE15	20.2	742.0	8080.0	350.0	29300.0	762.2	8842.2	9192.2	38492.2
BE16	2.7	280.0	5610.0	139.0	37300.0	282.7	5892.7	6031.7	43331.7
BR01	.9	144.0	4950.0	922.0	27700.0	144.9	5094.9	6016.9	33716.9
BR04	2.6	163.0	4740.0	186.0	24700.0	165.6	4905.6	5091.6	29791.6
BR06	2.6	190.0	5160.0	196.0	28000.0	192.6	5352.6	5548.6	33548.6
BR11	2.7	185.0	5820.0	290.0	32700.0	187.7	6007.7	6297.7	38997.7
Moyenne	5.7	343	5830	274	28600	348	6180	6460	35000
Ecart-type	5.8	280	1728	207	3830	285	1980	2010	4920

^a F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (fer échangeable) ... fraction 5 (fer résiduel).

S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de F1 et F2 ... de F1, F2, F3, F4 et F5.

Les concentrations sont en µg/g (poids sec).

Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité.

- . pour F1: <0.1 - 0.5
- . pour F2: 1.9 - 27.8
- . pour F3: 4.3 - 31.4
- . pour F4: 4.8 - 69.6
- . pour F5: 12.0 - 59.3

Ces gammes de concentrations sont beaucoup moins grandes que celles observées pour les carottes de sédiments (voir la section 5.3.1); c'est surtout dû au fait que les sédiments de surface n'ont pas été échantillonnés dans les lacs Routhier et Pelletier, étant donné qu'on n'y trouvait pas de bivalves.

5.6.2 Plomb

Les concentrations de plomb échangeable sont, sauf à BR-06, systématiquement plus faibles que la limite de sensibilité (Tableau 5.22). Comme dans le cas du cuivre, les concentrations de Pb(F2) sont plus faibles ou plus élevées, dépendant des stations, dans les sédiments superficiels que dans la tranche 0-2 cm des carottes; elles représentent 11.6% du plomb particulaire total. Les concentrations de Pb(F3), Pb(F4) et Pb(F5) sont systématiquement plus élevées dans les sédiments de surface que dans la tranche 0-2 cm des carottes; elles correspondent respectivement à 45.3, 10.2 et 34.4% du plomb particulaire total. De nouveau, on trouve un fort pourcentage du plomb dans la fraction 3, ce qui est caractéristique de ce métal.

Les gammes de concentrations (en $\mu\text{g/g}$, poids sec) dans chacune des fractions sont:

- . pour F2: 5.6 - 21.0
- . pour F3: 31.5 - 51.7
- . pour F4: <2.1 - 21.0
- . pour F5: 10.0 - 36.7

Ces gammes de concentrations sont restreintes, surtout si on les compare à celles obtenues pour les carottes de sédiments qui incluent les lacs Routhier et Pelletier.

5.6.3 Zinc

Les concentrations de zinc échangeable (Tableau 5.23) sont beaucoup plus élevées que celles de cuivre et de plomb; elles correspondent à 4.8% du zinc particulaire total. Les concentrations de Zn(F2) sont tantôt plus élevées, tantôt plus faibles que celles dans la tranche 0-2 cm des carottes (Tableau 5.14), dépendant des stations; elles représentent 12.8% du zinc particulaire total. Les concentrations de Zn(F3), Zn(F4) et Zn(F5) sont généralement plus élevées dans la couche superficielle des sédiments que dans la tranche 0-2 cm des carottes; elles correspondent respectivement à 47.6, 5.7 et 29.2% du zinc particulaire total.

Les gammes de concentrations (en $\mu\text{g/g}$, poids sec) dans chacune des fractions sont:

- . pour F1: 0.4 - 54.6
- . pour F2: 5.1 - 75.3
- . pour F3: 31.8 - 215
- . pour F4: 4.0 - 40.2
- . pour F5: 36.0 - 112

Ces gammes de concentration sont plus faibles que celles observées pour les carottes de sédiments (voir la section 5.3.3).

5.6.4 Fer

Les concentrations de fer échangeable sont plus élevées dans la couche superficielle des sédiments (Tableau 5.24) que dans la tranche 0-2 cm des carottes (Tableau 5.15); cette différence peut être reliée à la granulométrie des sédiments ($<70 \mu\text{m}$ vs $<850 \mu\text{m}$). Ces concentrations représentent 0.02% du fer particulaire total. Les concentrations de

Fe(F2) et de Fe(F4) sont parfois plus élevées, parfois plus faibles, dépendant des stations, que dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments; elles correspondent respectivement à 0.9 et 0.8% du fer particulaire total. Par ailleurs, les concentrations de Fe(F3) et Fe(F5) sont généralement plus élevées que dans la tranche 0-2 cm des carottes de sédiments; elles représentent respectivement 16.5 et 81.8% du fer particulaire total.

5.7 Teneurs en métaux traces dans Nuphar variegatum

Dans cette section, on retrouve des résultats analytiques pour des plantes prélevées à 16 stations, lesquelles étaient réparties de la manière suivante: lac Pelletier (1), lac Beauchastel (3), lac Montbelliard (2), rivière Beauchastel (1), lac La Bruère (4) et lac Routhier (5). Rappelons qu'à chacune de ces stations on a prélevé 5 spécimens individuels. Normalement pour chaque site deux échantillons composites (l'un pour les rhizomes et l'autre pour les tiges) étaient préparés et analysés pour cinq métaux (Cu, Pb, Zn, Fe, Mn); ces résultats sont présentés dans les Tableaux 5.25A (rhizomes) et 5.26A (tiges). Par ailleurs, à quatre stations (2 contaminées, LR-09 et LR-15; 2 témoins, MO-01 et MO-02) les cinq spécimens furent analysés séparément, afin de vérifier la variabilité inter-plante à un site donné, c'est-à-dire la variabilité spatiale à l'échelle de quelques mètres. Ces résultats individuels figurent dans les Tableaux 5.25B (rhizomes) et 5.26B (tiges), accompagnés de la valeur moyenne pour la station, l'écart-type et le coefficient de variation. Enfin, à deux stations (BE-01 et BR-11), des plantes furent prélevées à la fois en juillet et en septembre, afin d'évaluer la variabilité temporelle des teneurs en métaux traces dans Nuphar variegatum; ces données se retrouvent dans le Tableau 5.27.

Dans ce qui suit, la variabilité spatio-temporelle des résultats est discutée brièvement pour chaque métal; les relations entre les teneurs en métaux dans les plantes et celles dans les sédiments sont analysées dans la section 6.4 (Discussion). Signalons immédiatement

Tableau 5.25A: Concentrations de métaux ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les rhizomes de Nuphar variegatum - échantillons composites.

Station ^a	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE-01	9.0	<1.0	24.6	195	500
BE-03	4.6	<1.0	49.8	82.0	176
BE-13	3.7	<1.0	9.9	61.0	129
BE-16	3.0	<1.0	9.5	83.8	97.8
BR-01	5.9	<1.0	42.4	119	115
BR-04	3.9	1.0	8.1	25.0	119
BR-06	5.4	<1.0	11.8	43.0	114
BR-11	42.2	2.0	47.6	180	419
LR-09 ^b	7.1	<1.0	13.5	91.4	46.3
LR-13	7.9	<1.0	12.6	39.0	97.1
LR-15 ^b	6.0	<1.0	22.4	88.0	179
LR-16	3.5	<1.0	37.2	86.0	147
LR-17	12.1	<1.0	15.2	88.0	46.3
PE-01	5.7	<1.0	20.7	33.0	15.1
MO-01 ^b	3.7	-	21.8	45.6	156
MO-02 ^b	3.6	-	9.9	30.3	125

^a Les stations MO-01 et MO-02 ont été échantillonnées en septembre alors que les autres l'ont été en juillet.

^b Valeur moyenne pour des plantes analysées séparément, voir le Tableau 5.25B.

Tableau 5.25B: Concentrations de métaux ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les rhizomes de Nuphar variegatum - échantillons individuels.

Station ^a	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
LR-09 01	9.7	<1.0	13.0	147.0	44.2
LR-09 02	5.6	<1.0	12.1	51.0	33.1
LR-09 03	4.7	<1.0	10.0	55.0	60.6
LR-09 04	9.6	<1.0	6.9	42.0	58.2
LR-09 05	6.0	<1.0	25.7	162.0	35.5
Moyenne	7.1	<1.0	13.5	91.4	46.3
Ecart-type	2.4	-	7.2	58.0	12.7
CV (%) ^b	34	-	53	63	27
LR-15 01	8.5	<1.0	19.0	27.9	118
LR-15 02	5.4	<1.0	29.8	92.3	178
LR-15 03	5.1	<1.0	13.6	106.0	143
LR-15 04	4.6	<1.0	21.9	120.0	197
LR-15 05	6.5	<1.0	27.9	94.0	258
Moyenne	6.0	<1.0	22.4	88.0	179
Ecart-type	1.6	-	6.6	35.4	53.8
CV (%) ^b	27	-	30	40	30
MO-01 01	6.8	-	19.9	36.0	165
MO-01 02	3.1	-	27.7	32.0	300
MO-01 03	2.4	-	26.5	70.0	96.1
MO-01 04	3.0	-	14.6	38.0	60.2
MO-01 05	3.1	-	20.3	52.0	158
Moyenne	3.7	-	21.8	45.6	156
Ecart-type	1.8	-	5.4	15.6	91.6
CV (%) ^b	49	-	25	34	59
MO-02 01	5.7	-	18.8	28.6	127
MO-02 02	3.1	-	5.1	26.0	144
MO-02 03	4.3	-	8.9	39.0	108
MO-02 04	3.2	-	6.3	23.0	156
MO-02 05	1.9	-	10.6	35.0	90.2
Moyenne	3.6	-	9.9	30.3	125
Ecart-type	1.4	-	5.4	6.6	26.5
CV (%) ^b	39	-	55	22	21

^a Les notations 01 → 05 indiquent qu'il s'agit d'échantillons individuels prélevés à la station indiquée.

^b CV = coefficient de variation.

Tableau 5.26A: Concentrations de métaux ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les tiges de Nuphar variegatum - échantillons composites.

Station ^a	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE-01	4.7	<1.0	15.5	110	138
BE-03	7.0	1.0	23.4	189	589
BE-13	5.1	1.0	27.2	112	529
BE-16	4.7	<1.0	20.5	96	390
BR-01	10.6	3.0	29.8	98	330
BR-04	6.1	1.0	22.5	48	390
BR-06	8.1	5.0	22.8	72	319
BR-11	4.0	<1.0	18.1	117	49
LR-09 ^b	15.7	<1.0	88.2	83	177
LR-13	10.0	1.0	77.8	135	205
LR-15 ^b	11.9	<1.0	76.1	91	366
LR-16	2.4	<1.0	23.6	113	310
LR-17	30.7	9.0	55.8	148	124
PE-01	2.4	1.0	20.1	123	292
MO-01 ^b	3.7	-	16.6	149	396
MO-02 ^b	2.9	-	14.5	107	335

^a Les stations MO-01 et MO-02 ont été échantillonnées en septembre alors que les autres l'ont été en juillet.

^b Valeur moyenne pour des plantes analysées séparément, voir le Tableau 5.26B.

Tableau 5.26B: Concentrations de métaux ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les tiges de Nuphar variegatum - échantillons individuels.

Station ^a	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
LR-09 01	15.2	-	96.7	109	208
LR-09 02	13.5	<1.0	91.2	109	137
LR-09 03	16.4	<1.0	75.4	53.0	140
LR-09 04	21.9	<1.0	112	63.9	212
LR-09 05	13.5	<1.7	89.7	113	253
Moyenne	16.1	<1.0	93.0	89.6	190
Ecart-type	3.5	-	13.2	28.7	50.2
CV (%) ^b	22	-	14	32	26
LR-15 01	9.0	<1.0	81.3	76.8	300
LR-15 02	9.4	<1.0	76.5	78.8	330
LR-15 03	9.1	<1.0	77.0	104	380
LR-15 04	19.9	<1.0	72.6	74.0	414
LR-15 05	12.0	<1.0	73.1	123	404
Moyenne	11.9	<1.0	76.1	91.3	366
Ecart-type	4.7	-	3.5	21.4	49.0
CV (%) ^b	39	-	5	23	13
MO-01 01	4.3	-	18.6	199	459
MO-01 02	2.0	-	14.4	97.0	596
MO-01 03	5.3	-	18.4	250	312
MO-01 04	2.7	-	12.1	84.5	161
MO-01 05	4.4	-	19.6	118	451
Moyenne	3.7	-	16.6	150	396
Ecart-type	1.4	-	3.2	71.6	165
CV (%) ^b	38	-	19	48	42
MO-02 01	3.5	-	16.4	131	408
MO-02 02	3.0	-	13.5	112	349
MO-02 03	3.6	-	19.3	139	333
MO-02 04	2.3	-	10.8	76.0	281
MO-02 05	2.2	-	12.4	78.0	306
Moyenne	2.9	-	14.5	107	335
Ecart-type	0.7	-	3.4	29.3	48.2
CV (%) ^b	24	-	23	27	14

^a Les notations 01 → 05 indiquent qu'il s'agit d'échantillons individuels prélevés à la station indiquée.

^b CV: Coefficient de variation.

Tableau 5.27: Comparaison des teneurs en métaux ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les tiges et rhizomes de Nuphar variegatum en juillet et septembre α .

Station	Date	[Cu]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
Tiges					
BE-01	juillet (N=3)	9.2±0.3	26.5±0.8	238±7	493±6
	septembre (N=3)	4.5±0.5	36.0±1.9	202±33	747±90
BR-11	juillet (N=5)	50.4±2.8	60.4±1.6	253±17	421±13
	septembre (N=3)	23.0±1.5	43.6±2.2	165± 8	312±15
Rhizomes					
BE-01	juillet (N=3)	5.5±0.5	16.9±0.5	128±3	167±3
	septembre (N=3)	7.0±0.5	19.8±1.6	54.6±4.0	170±13
BR-11	juillet (N=5)	3.6±0.5	23.0±1.8	126±13.5	57.4±2.9
	septembre (N=5)	5.7±0.3	13.4±0.7	46.3±5.7	119±12

α Echantillons composites analysés de 3 à 5 fois; résultats présentés comme valeur moyenne \pm écart-type.

que les résultats obtenus pour le plomb sont presque tous inférieurs à la limite de détection (1 µg/g); même les quelques valeurs figurant aux Tableaux 5.25, 5.26 et 5.27 sont près de la limite de sensibilité et sont donc entachées d'une erreur importante. Par conséquent, les résultats pour le plomb ne sont pas considérés dans les sections suivantes.

5.7.1 Variabilité spatiale à un site donné

Pour chaque métal, la variabilité inter-plante dans un rayon d'environ 10 mètres à un site donné s'avère importante, la plupart des coefficients de variation étant supérieurs à 25% (Tableaux 5.25B et 5.26B). Cette variabilité, aussi importante pour le lac contaminé (Routhier) que pour le lac témoin (Montbelliard), dépasse de beaucoup la variabilité des concentrations de ces mêmes métaux dans les sédiments (cf. Tableau 5.4). Notons que les coefficients de variation pour les métaux traces (Cu, Zn) sont du même ordre de grandeur que ceux pour le fer et le manganèse. Par ailleurs, à une station donnée la variabilité des concentrations trouvées dans les différentes tiges est généralement inférieure à celle des concentrations observées dans les rhizomes prélevés au même site: zinc, 4 cas sur 4 (4/4); cuivre (3/4); fer (2/4); manganèse (4/4).

5.7.2 Variabilité saisonnière

La comparaison des teneurs en métaux dans les tiges et les rhizomes de Nuphar variegatum en juillet et en septembre montre que certains changements se sont produits au cours de cette période de 5 semaines. Les valeurs présentées dans le Tableau 5.27 pour juillet et septembre proviennent évidemment de plantes différentes prélevées lors des 2 campagnes (échantillons composites: 5 spécimens récoltés à chaque site et combinés). En interprétant les résultats, on doit donc tenir compte de la variabilité inter-plante qui a été mise en évidence dans la section 5.7.1.

Pour les tiges, les concentrations de cuivre ont diminué de manière importante (> 50%) et ceci aux deux stations. Les teneurs en fer

montrent une tendance semblable (quoique moins marquée), en particulier à la station BR-11, alors que les niveaux de zinc et de manganèse varient différemment aux deux sites: on note une augmentation évidente à la station BE-01 mais une diminution à BR-11. Par ailleurs, dans les rhizomes, les niveaux de cuivre (BE-01, BR-11), de zinc et de manganèse (BE-01) sont demeurés sensiblement constants pour les deux campagnes d'échantillonnage. Parmi les éléments manifestant des changements appréciables, seul le fer montre la même tendance aux deux stations, à savoir une diminution importante (>55%) de juillet à septembre.

5.7.3 Variabilité spatiale dans la région d'étude - campagne d'échantillonnage de juillet

Les résultats présentés dans les Tableaux 5.25A et 5.26A montrent les gammes de concentration ($\mu\text{g/g}$, poids sec) suivantes pour les 14 stations échantillonnées en juillet.

	<u>rhizome</u>	<u>tige</u>
Cu	3-12 (moy. 6)	2-50 (moy. 13)
Zn	8-50 (moy. 21)	20- 93 (moy. 41)
Fe	25-128 (moy. 78)	48-253 (moy. 129)
Mn	15-179 (moy. 108)	124-589 (moy. 353)

Les gammes de variation sont plus étendues pour les tiges que pour les rhizomes et la distribution des valeurs individuelles s'avère biaisée vers le bas dans les deux cas. Les concentrations des métaux individuels se classent généralement dans l'ordre croissant $\text{Cu} < \text{Zn} < \text{Fe} < \text{Mn}$, à quelques exceptions près où les deux derniers éléments changent

de rang: $[Mn] < [Fe]$ aux stations LR-09, BR-11 et PE-01 (rhizome), et LR-17 (rhizome et tige). Pour tous les métaux, les valeurs moyennes pour les tiges sont plus élevées que celles des rhizomes.

5.8 Teneurs en métaux traces dans Elliptio complanata

Les teneurs en cuivre, plomb, zinc, fer et manganèse dans le pied, les muscles adducteurs, la masse viscérale, le foie, les branchies et le manteau de Elliptio complanata sont présentées dans les Tableaux 5.28 à 5.33. Dans le Tableau 5.34, on présente les concentrations des mêmes métaux, reconstituées pour l'organisme complet excluant la coquille; pour reconstituer ces concentrations, on s'est servi de l'équation suivante:

$$C_R = \frac{C_1 W_1 + \dots + C_i W_i}{W_1 + \dots + W_i} \quad (5.1)$$

où C_R est la concentration reconstituée alors que C_i et W_i représentent respectivement les concentrations et les poids secs de chacun des organes du bivalve. On notera qu'une partie de l'organisme, ne correspondant à aucun des organes analysés, était jetée après avoir déterminé son poids sec; ce dernier correspondait à environ 10-15% du poids sec total des chairs de l'organisme. Cette partie de l'organisme (comprenant entre autres le tractus intestinal) était rejetée parce qu'elle était en contact direct avec les sédiments et qu'il était difficile de la nettoyer pour éviter des contaminations. Par ailleurs, l'âge, la longueur, la largeur, l'épaisseur et l'indice de condition de chaque bivalve analysé sont donnés dans le Tableau 5.35; l'indice de condition est le rapport {poids sec des chairs/poids sec total de l'organisme}.

Un certain nombre d'observations générales peuvent être faites à partir des Tableaux 5.28 à 5.34. Concernant l'accumulation des métaux dans les différents organes, on obtient généralement les ordres décroissants suivants:

Tableau 5.28: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans le pied de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	2,8	-9,4	108,0	66,0	0,0
M001 G2	1,3	-9,0	101,0	108,0	0,0
M001 G3	13,4	-13,4	126,0	107,0	0,0
M001 G4	3,2	-16,1	111,0	80,7	144,0
M001 G5	6,9	-32,3	190,0	64,3	-3,2
M001 MOY	5,4	0,0	127,2	85,2	144,0
M001 ET	4,8	0,0	36,3	21,3	0,0
M002 G1	7,1	-8,9	134,0	161,0	0,0
M002 G2	3,3	-11,5	149,0	138,0	0,0
M002 G3	5,7	-14,0	136,0	28,6	103,0
M002 MOY	5,4	0,0	139,7	109,2	103,0
M002 ET	1,8	0,0	8,1	70,7	0,0
M003 G1	7,5	0,0	112,0	108,0	54,8
M003 G2	8,4	0,0	115,0	101,0	34,6
M003 G3	11,9	0,0	105,0	110,0	60,4
M003 G4	11,8	0,0	121,0	78,0	78,4
M003 G5	-2,2	-21,7	137,0	109,0	47,8
M003 G6	3,4	-11,2	197,0	135,0	33,7
M003 G7	2,3	-11,2	125,0	180,0	51,7
M003 MOY	7,6	0,0	130,3	118,6	51,6
M003 ET	4,1	0,0	31,1	32,1	15,4
BE03 G1	8,7	-9,7	149,0	77,7	65,1
BE03 G2	6,7	-9,6	153,0	231,0	45,2
BE03 G3	5,7	-7,1	138,0	142,0	46,8
BE03 G4	6,9	-8,6	155,0	51,7	47,4
BE03 G5	8,2	-10,2	136,0	112,0	16,3
BE03 G6	5,3	-8,8	130,0	70,2	60,5
BE03 MOY	6,9	0,0	143,5	114,1	46,9
BE03 ET	1,3	0,0	10,2	65,7	17,1
BE16 G1	8,9	0,0	126,0	1042,0	458,0
BE16 G2	10,0	0,0	106,0	444,0	132,0
BE16 G3	6,8	0,0	138,0	349,0	101,0
BE16 G4	9,5	0,0	176,0	400,0	235,0
BE16 G5	5,2	-10,3	188,0	124,0	76,3
BE16 G6	5,9	-8,4	153,0	135,0	95,0
BE16 G7	8,8	-9,8	146,0	225,0	65,7
BE16 MOY	7,9	0,0	147,6	388,4	166,1
BE16 ET	1,9	0,0	28,2	314,3	140,6

Tableau 5.28 (suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G1	8,3	0,0	120,0	92,0	42,9
BR01 G2	13,2	0,0	141,0	126,0	43,1
BR01 G3	9,5	0,0	145,0	86,0	26,3
BR01 G4	9,3	0,0	135,0	89,0	44,8
BR01 G5	7,0	-10,0	130,0	100,0	61,0
BR01 G6	30,1	6,5	163,0	105,0	32,7
BR01 G7	11,2	4,5	156,0	161,0	47,8
BR01 MOY	12,7	5,5	141,4	108,4	42,7
BR01 ET	7,9	1,4	14,8	26,8	11,1
BR06 G1	24,1	0,0	157,0	205,0	66,3
BR06 G3	15,7	0,0	137,0	170,0	75,8
BR06 G4	16,0	0,0	131,0	542,0	367,0
BR06 G5	9,1	-11,4	181,0	80,0	33,0
BR06 G6	5,3	-7,5	157,0	150,0	42,1
BR06 G7	8,3	-6,4	159,0	71,0	46,2
BR06 MOY	13,1	0,0	153,7	203,0	105,1
BR06 ET	6,9	0,0	17,8	174,0	129,3
BR11 G1	14,2	0,0	119,0	233,0	86,5
BR11 G2	12,5	0,0	148,0	129,0	34,7
BR11 G3	16,7	0,0	148,0	214,0	98,0
BR11 G4	11,4	0,0	128,0	91,0	35,2
BR11 G5	7,2	-9,0	164,0	153,0	50,5
BR11 MOY	12,4	0,0	140,6	164,0	61,0
BR11 ET	3,5	0,0	17,6	59,0	29,5

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.29: Concentrations de métaux traces dans les muscles adducteurs de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	1,8	=5,9	71,9	35,4	0,0
M001 G2	2,3	=7,6	79,4	75,6	0,0
M001 G3	2,9	=7,3	89,5	102,0	0,0
M001 G4	1,8	=8,8	73,7	43,9	57,0
M001 G5	3,0	=15,2	102,0	75,8	63,6
M001 MOY	2,4	0,0	83,3	66,5	60,3
M001 ET	,6	0,0	12,5	27,0	4,7
M002 G1	1,7	=5,8	67,9	104,0	0,0
M002 G2	3,9	=7,7	75,4	84,6	0,0
M002 G3	2,5	=8,2	85,1	57,9	35,5
M002 MOY	2,7	0,0	76,1	82,2	35,5
M002 ET	1,1	0,0	8,6	23,1	0,0
M003 G1	4,7	0,0	96,3	196,0	120,0
M003 G2	3,9	0,0	96,1	266,0	138,0
M003 G3	6,4	0,0	93,6	564,0	166,0
M003 G4	4,7	0,0	86,6	195,0	72,5
M003 G5	2,5	=12,3	96,3	272,0	114,0
M003 G6	1,6	=8,2	113,0	312,0	87,7
M003 G7	2,7	=8,9	83,2	257,0	95,6
M003 MOY	3,8	0,0	95,0	294,6	113,4
M003 ET	1,6	0,0	9,5	126,0	31,8
BE03 G1	3,6	=5,2	85,6	82,5	55,7
BE03 G2	2,4	=4,0	77,8	115,0	45,2
BE03 G3	4,7	=5,8	94,7	246,0	131,0
BE03 G4	4,0	=5,7	102,0	34,5	74,1
BE03 G5	3,0	=4,9	89,2	113,0	84,7
BE03 G6	2,7	=6,8	78,1	95,9	54,1
BE03 MOY	3,4	0,0	87,9	114,5	74,1
BE03 ET	,9	0,0	9,5	70,8	31,4
BE16 G1	6,3	0,0	96,6	190,0	105,0
BE16 G2	5,4	0,0	92,8	265,0	175,0
BE16 G3	6,9	0,0	138,0	541,0	436,0
BE16 G4	5,2	0,0	133,0	187,0	123,0
BE16 G5	5,1	=8,5	149,0	188,0	168,0
BE16 G6	4,2	=8,4	100,0	175,0	98,3
BE16 G7	20,8	=10,4	122,0	406,0	184,0
BE16 MOY	7,7	0,0	118,8	278,9	184,2
BE16 ET	5,8	0,0	22,4	141,7	116,3

Tableau 5.29 (suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G1	8,3	0,0	109,0	221,0	77,9
BR01 G2	4,4	0,0	96,8	63,0	33,5
BR01 G3	6,0	0,0	118,0	75,0	56,5
BR01 G4	4,7	0,0	104,0	133,0	57,3
BR01 G5	23,1	-5,9	85,0	118,0	50,9
BR01 G6	18,3	-3,8	90,0	168,0	45,8
BR01 G7	17,3	3,8	99,0	169,0	87,7
BR01 MOY	11,7	3,8	100,3	135,3	58,5
BR01 ET	7,7	0,0	11,2	55,9	18,6
BR06 G1	9,0	0,0	94,4	533,0	157,0
BR06 G2	5,7	0,0	86,9	103,0	37,7
BR06 G3	12,8	0,0	110,0	311,0	324,0
BR06 G4	13,1	0,0	91,1	444,0	188,0
BR06 G5	9,0	-6,0	111,0	114,0	44,3
BR06 G6	17,3	-3,8	108,0	207,0	74,8
BR06 G7	8,0	-5,0	117,0	120,0	112,0
BR06 MOY	10,7	0,0	102,6	261,7	134,0
BR06 ET	3,9	0,0	11,6	172,9	100,7
BR11 G1	4,1	0,0	87,4	68,0	49,3
BR11 G2	4,8	0,0	97,2	77,0	34,7
BR11 G3	8,9	0,0	112,0	361,0	136,0
BR11 G4	3,8	0,0	96,9	53,0	27,5
BR11 G5	5,3	-4,4	95,6	120,0	87,2
BR11 MOY	5,4	0,0	97,8	135,8	66,9
BR11 ET	2,1	0,0	8,9	128,3	45,0

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.30: Concentrations de métaux traces dans la masse viscérale (µg/g, poids sec) de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	10,1	-3,1	70,7	336,0	0,0
M001 G2	7,5	8,3	136,0	387,0	0,0
M001 G3	9,1	-3,5	92,2	1890,0	0,0
M001 G4	5,5	3,2	63,6	263,0	520,0
M001 G5	10,4	-6,9	84,1	131,0	125,0
M001 MOY	8,5	5,8	89,3	601,4	322,5
M001 ET	2,0	3,6	28,4	726,8	279,3
M002 G1	13,9	2,1	92,9	924,0	0,0
M002 G2	8,7	8,7	75,7	957,0	0,0
M002 G3	8,9	3,7	81,8	431,0	147,0
M002 MOY	10,5	4,8	83,5	770,7	147,0
M002 ET	2,9	3,4	8,7	294,6	0,0
M003 G5	12,8	4,0	92,4	956,0	583,0
M003 G6	7,8	3,5	109,0	662,0	661,0
M003 G7	14,9	6,8	91,5	1630,0	698,0
M003 MOY	11,8	4,8	97,6	1082,7	647,3
M003 ET	3,6	1,8	9,9	496,3	58,7
BE03 G1	13,4	-2,0	104,0	590,0	449,0
BE03 G2	8,1	1,4	90,3	635,0	292,0
BE03 G3	9,1	-1,9	94,9	599,0	393,0
BE03 G4	16,7	-2,8	83,3	848,0	347,0
BE03 G5	10,8	-2,0	97,3	806,0	652,0
BE03 G6	8,6	-2,7	69,4	429,0	282,0
BE03 MOY	11,1	1,4	89,9	651,2	402,5
BE03 ET	3,3	0,0	12,2	154,1	137,3
BE16 G5	11,7	-4,9	228,0	815,0	678,0
BE16 G6	8,0	-3,5	97,9	540,0	235,0
BE16 G7	14,7	6,3	151,0	2000,0	719,0
BE16 MOY	11,5	6,3	159,0	1118,3	544,0
BE16 ET	3,4	0,0	65,4	775,8	268,4

Tableau 5.30 (suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G5	21,5	7,3	119,0	780,0	440,0
BR01 G6	13,1	7,3	116,0	615,0	185,0
BR01 G7	15,0	6,0	108,0	360,0	233,0
BR01 MOY	16,5	6,9	114,3	585,0	286,0
BR01 ET	4,4	,8	5,7	211,6	135,5
BR06 G5	18,1	3,8	137,0	290,0	127,0
BR06 G6	20,7	7,5	158,0	743,0	469,0
BR06 G7	9,5	6,8	91,5	678,0	124,0
BR06 MOY	16,1	6,0	128,8	570,3	240,0
BR06 ET	5,9	2,0	34,0	244,9	198,3
BR11 G5	23,5	5,5	103,0	438,0	264,0

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.31: Concentrations de métaux traces dans le foie ($\mu\text{g/g}$, poids sec) de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	33,9	13,0	150,0	313,0	0,0
M001 G2	18,3	-18,3	103,0	183,0	0,0
M001 G3	20,0	-13,3	139,0	1080,0	0,0
M001 G4	23,0	-13,5	96,0	284,0	143,0
M001 G5	50,0	-26,3	129,0	132,0	34,3
M001 MOY	29,0	13,0	123,4	398,4	88,7
M001 ET	13,2	0,0	23,2	388,0	76,9
M002 G1	37,8	12,2	120,0	695,0	0,0
M002 G2	24,1	17,2	129,0	569,0	0,0
M002 G3	24,6	-14,0	115,0	739,0	103,0
M002 MOY	28,8	14,7	121,3	667,7	103,0
M002 ET	7,8	3,5	7,1	88,2	0,0
M003 G5	24,2	-30,3	152,0	1060,0	185,0
M003 G6	26,0	-20,0	198,0	1340,0	184,0
M003 G7	32,6	31,0	161,0	978,0	165,0
M003 MOY	27,6	31,0	170,3	1126,0	178,0
M003 ET	4,4	0,0	24,4	189,8	11,3
BE03 G1	37,6	-8,0	118,0	544,0	90,4
BE03 G2	31,7	-4,6	137,0	1400,0	345,0
BE03 G3	37,3	-7,0	122,0	648,0	156,0
BE03 G4	33,7	-10,5	116,0	726,0	278,0
BE03 G5	27,0	-10,0	114,0	1200,0	296,0
BE03 G6	24,7	-10,3	106,0	783,5	208,0
BE03 MOY	32,0	0,0	118,8	883,6	228,9
BE03 ET	5,3	0,0	10,4	338,4	95,2
BE16 G5	28,8	-13,7	227,0	1320,0	263,0
BE16 G6	38,5	-15,4	183,0	785,0	172,0
BE16 G7	45,2	13,1	213,0	2370,0	339,0
BE16 MOY	37,5	13,1	207,7	1491,7	258,0
BE16 ET	8,2	0,0	22,5	806,3	83,6

Tableau 5.31 (suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G5	45,7	-10,9	164,0	544,0	109,0
BR01 G6	43,1	9,2	171,0	780,0	125,0
BR01 G7	44,7	19,4	180,0	942,0	225,0
BR01 MOY	44,5	14,3	171,7	755,3	153,0
BR01 ET	1,3	7,2	8,0	200,1	62,9
BR06 G5	47,3	-18,2	178,0	164,0	49,1
BR06 G6	118,0	15,3	189,0	992,0	171,0
BR06 G7	53,3	-9,3	195,0	1240,0	200,0
BR06 MOY	72,9	15,3	187,3	798,7	140,0
BR06 ET	39,2	0,0	8,6	563,5	80,1
BR11 G5	54,5	20,2	187,0	879,0	199,0

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.32: Concentrations de métaux traces dans les branchies ($\mu\text{g/g}$, poids sec) de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	28,6	12,7	306,0	762,0	0,0
M001 G2	21,6	22,3	294,0	1190,0	0,0
M001 G3	12,7	13,3	243,0	1200,0	0,0
M001 G4	22,1	-11,6	197,0	651,0	5210,0
M001 G5	62,7	26,7	284,0	373,0	4770,0
M001 MOY	29,5	18,8	264,8	835,2	4990,0
M001 ET	19,4	6,9	44,7	357,7	311,1
M002 G1	18,7	12,5	285,0	1310,0	0,0
M002 G2	23,3	15,0	268,0	2250,0	0,0
M002 G3	41,3	11,3	281,0	788,0	4950,0
M002 MOY	27,8	12,9	278,0	1449,3	4950,0
M002 ET	11,9	1,9	8,9	740,9	0,0
M003 G5	20,2	-11,2	327,0	1800,0	7790,0
M003 G6	45,7	10,2	406,0	3710,0	12300,0
M003 G7	12,7	14,1	231,0	2260,0	5690,0
M003 MOY	26,2	12,2	321,3	2590,0	8593,3
M003 ET	17,3	2,8	87,6	996,8	3377,4
BE03 G1	78,1	6,3	1010,0	1480,0	10100,0
BE03 G2	61,4	-5,7	1120,0	2140,0	10300,0
BE03 G3	62,5	-7,4	957,0	1810,0	9700,0
BE03 G4	50,9	-6,2	491,0	1550,0	7580,0
BE03 G5	47,4	-10,5	558,0	1260,0	7940,0
BE03 G6	52,3	-9,0	613,0	1440,0	7210,0
BE03 MOY	58,8	6,3	791,5	1613,3	8805,0
BE03 ET	11,2	0,0	268,2	313,9	1378,8
BE16 G5	35,6	-13,7	2380,0	3820,0	10400,0
BE16 G6	31,4	15,3	924,0	3890,0	9160,0
BE16 G7	23,8	13,4	768,0	2610,0	6590,0
BE16 MOY	30,3	14,4	1357,3	3440,0	8716,7
BE16 ET	6,0	1,3	889,1	719,7	1943,3

Tableau 5.32 (suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G5	96,3	37,5	668,0	2080,0	7520,0
BR01 G6	230,0	32,9	1390,0	2300,0	9090,0
BR01 G7	315,0	37,5	1130,0	3290,0	9370,0
BR01 MOY	213,8	36,0	1062,7	2556,7	8660,0
BR01 ET	110,3	2,7	365,7	644,5	997,1
BR06 G5	82,0	45,1	1190,0	2100,0	7240,0
BR06 G6	98,4	35,6	944,0	1460,0	6430,0
BR06 G7	216,0	25,6	957,0	3870,0	7690,0
BR06 MOY	132,1	35,4	1030,3	2476,7	7120,0
BR06 ET	73,1	9,8	138,4	1248,4	638,5
BR11 G5	203,0	39,8	832,0	2700,0	9870,0

^a Un signe (-) indique la valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

^b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.33: Concentrations de métaux traces dans le manteau ($\mu\text{g/g}$, poids sec) de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	17,1	13,7	182,0	3690,0	0,0
M001 G2	16,1	8,0	180,0	4590,0	0,0
M001 G3	10,2	16,1	166,0	5110,0	0,0
M001 G4	33,6	17,7	194,0	3340,0	5420,0
M001 G5	10,9	18,2	144,0	1820,0	644,0
M001 MOY	17,6	13,9	173,2	3710,0	3032,0
M001 ET	9,5	4,2	19,1	1269,2	3377,1
M002 G1	11,0	10,5	173,0	6550,0	0,0
M002 G2	12,0	14,1	145,0	6060,0	0,0
M002 G3	12,5	18,7	161,0	4230,0	1560,0
M002 MOY	11,8	14,4	159,7	5613,3	1560,0
M002 ET	8	4,1	14,0	1222,8	0,0
M003 G5	18,5	26,5	282,0	10500,0	6730,0
M003 G6	18,3	9,9	332,0	9900,0	5540,0
M003 G7	14,3	26,8	220,0	10700,0	4250,0
M003 MOY	17,0	21,1	278,0	10366,7	5506,7
M003 ET	2,4	9,7	56,1	416,3	1240,3
BE03 G1	42,1	3,8	223,0	1940,0	1700,0
BE03 G2	49,8	6,5	365,0	5730,0	3180,0
BE03 G3	54,0	4,7	404,0	4294,0	3300,0
BE03 G4	38,2	5,2	194,0	5310,0	2280,0
BE03 G5	35,7	5,8	233,0	2870,0	2770,0
BE03 G6	43,4	8,9	230,0	4248,0	2270,0
BE03 MOY	43,9	7,7	274,8	4065,3	2583,3
BE03 ET	6,9	1,7	86,9	1438,9	612,4
BE16 G5	121,0	15,2	2320,0	8770,0	10800,0
BE16 G6	50,3	23,0	691,0	12800,0	8400,0
BE16 G7	38,0	25,1	564,0	11800,0	6570,0
BE16 MOY	69,8	21,1	1191,7	11123,3	8590,0
BE16 ET	44,8	5,2	979,2	2098,5	2121,4

Tableau 5.33 (suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G5	41,1	34,3	235,0	4380,0	2120,0
BR01 G6	43,3	24,9	298,0	2380,0	2000,0
BR01 G7	198,0	40,8	462,0	3510,0	2660,0
BR01 MOY	94,1	33,3	331,7	3423,3	2260,0
BR01 ET	90,0	8,0	117,2	1002,8	351,6
BR06 G5	83,1	47,0	515,0	5320,0	3680,0
BR06 G6	114,0	34,0	448,0	6630,0	3710,0
BR06 G7	48,1	25,8	313,0	4160,0	1290,0
BR06 MOY	81,7	35,6	425,3	5370,0	2893,3
BR06 ET	33,0	10,7	102,9	1235,8	1388,6
BR11 G5	134,0	25,2	382,0	3570,0	4290,0

a Un signe (-) indique la valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.34: Concentrations de métaux traces (µg/g, poids sec) reconstituées dans les chairs de Elliptio complanata^a.

Station ^b	[Cu]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 G1	13.8	135.9	824.5	0.0
M001 G2	10.2	153.0	1073.0	0.0
M001 G3	10.2	138.2	1955.3	0.0
M001 G4	12.5	106.8	720.5	1646.9
M001 G5	22.2	143.8	388.0	0.0
M001 MOY	13.8	135.5	992.3	1646.9
M001 ET	4.9	17.4	591.8	0.0
M002 G1	13.3	133.5	1672.5	0.0
M002 G2	11.5	133.0	1840.4	0.0
M002 G3	16.0	140.4	910.5	1274.5
M002 MOY	13.6	135.6	1474.4	1274.5
M002 ET	2.3	4.1	495.6	0.0
M003 G5	0.0	175.1	3145.4	2877.7
M003 G6	17.8	232.6	3216.9	3993.0
M003 G7	12.8	133.3	2609.9	1500.3
M003 MOY	15.3	180.3	2990.7	2790.4
M003 ET	3.5	49.9	331.7	1248.6
BE03 G1	27.1	237.0	841.1	1720.4
BE03 G2	20.7	233.0	1459.0	1594.8
BE03 G3	23.8	239.6	1220.9	1711.2
BE03 G4	24.0	176.3	1518.1	1673.1
BE03 G5	17.2	157.5	998.8	1367.5
BE03 G6	20.8	171.0	1291.4	1362.2
BE03 MOY	22.3	202.4	1221.6	1571.5
BE03 ET	3.4	37.9	262.1	166.1
BE16 G5	39.3	909.6	2820.6	3792.5
BE16 G6	21.5	346.1	3500.2	3100.0
BE16 G7	23.7	349.2	3695.1	2796.6
BE16 MOY	28.2	534.9	3338.7	3229.7
BE16 ET	9.7	324.4	459.1	510.4

Tableau 5.34 (suite).

Station	[Cu]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR01 G5	40.4	247.2	1330.2	2006.1
BR01 G6	53.1	329.8	971.0	1678.3
BR01 G7	83.9	308.3	1189.4	1791.7
BR01 MOY	59.1	295.1	1163.5	1825.3
BR01 ET	22.3	42.8	181.0	166.5
BR06 G5	37.6	364.0	1304.1	1772.9
BR06 G6	53.7	323.7	1627.9	1799.6
BR06 G7	48.9	273.1	1613.0	1415.6
BR06 MOY	46.8	320.2	1515.0	1662.7
BR06 ET	8.3	45.6	182.8	214.4
BR11 G5	67.7	271.9	1264.5	2376.6

a Les concentrations sont reconstituées avec l'équation (5.1); la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.35: Indice de condition, âge, longueur, largeur et épaisseur de la coquille de Elliptio complanata.

Station ^a	Indice de condition	Age (année)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)
MO-01 G1	0.058	11	79	41	20
MO-01 G2	0.061	9	73	37	19
MO-01 G3	0.047	9	81	44	21
MO-01 G4	0.063	9	72	39	19
MO-01 G5	0.055	6	65	37	16
MO-02 G1	0.052	13	86	41	27
MO-02 G2	0.058	11	72	41	20
MO-02 G3	0.078	11	75	37	18
MO-03 G5	0.047	-	73	40	21
MO-03 G6	0.043	11	70	38	20
MO-03 G7	0.049	9	75	33	20
BE-03 G1	0.081	9	86	44	20
BE-03 G2	0.071	12	87	45	26
BE-03 G3	0.070	10	86	44	24
BE-03 G4	0.075	10	81	42	22
BE-03 G5	0.081	10	77	43	20
BE-03 G6	0.084	11	77	44	17
BE-16 G5	0.047	12	77	41	21
BE-16 G6	0.054	13	79	44	22
BE-16 G7	0.047	12	79	43	21
BR-01 G5	0.081	9	86	42	22
BR-11 G6	0.082	9	92	47	22
BR-11 G7	0.076	11	94	47	24
BR-06 G5	0.072	10	80	39	21
BR-06 G6	0.073	10	86	45	23
BR-06 G7	0.059	12	87	45	24
BR-11 G5	0.082	12	88	43	22

^a La notation G1, G2 ... indique qu'il s'agit d'individus.

- . pour Cu: branchie > manteau > foie > masse viscérale > pied > muscle
- . pour Pb: branchie \hat{A} manteau > foie > masse viscérale
- . pour Zn: branchie > manteau > foie > pied > masse viscérale > muscle
- . pour Fe: manteau > branchie > foie > masse viscérale > muscle \hat{A} pied
- . pour Mn: branchie > manteau > masse viscérale > foie > muscle > pied

Les concentrations de plomb dans le pied et les muscles adducteurs sont, dans la plupart des cas, inférieures à la limite de sensibilité. Par ailleurs, sans faire d'analyse statistique, il ne semble pas que les concentrations de Cu, Zn, Fe et Mn dans le pied et les muscles adducteurs permettent de discriminer entre les diverses stations. De manière générale, les coefficients de variation sont relativement élevés. Le zinc est le métal qui présente généralement les coefficients de variation les plus faibles pour les différents organes. La variabilité semble spécialement élevée à la station MO-01; par contre, la station MO-03 présente généralement la variabilité la plus faible. De façon générale, les coefficients de variation sont plus faibles pour l'organisme reconstitué que pour les organes individuels, ce qui semble indiquer que i) les individus à une même station ne répartissent pas tous un métal de la même façon et/ou ii) la dissection n'est pas tout à fait sélective.

5.9 Teneurs en métaux traces dans Anodonta grandis

Les teneurs en cuivre, plomb, zinc, fer et manganèse dans le pied, les muscles adducteurs, la masse viscérale, le foie, les branchies, le manteau et les oeufs de Anodonta grandis sont présentés dans les Tableaux 5.36 à 5.42. Notons que pour Anodonta grandis la présence ou

Tableau 5.36: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans le pied de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	35,1	-8,8	119,0	70,2	37,8
M001 A11M	8,6	-7,8	94,9	110,0	26,7
M001 A12F	31,0	-10,7	120,0	96,0	47,0
M001 A13F	16,9	-11,2	121,0	528,0	194,0
M001 A14M	21,0	8,1	125,0	80,7	109,0
M001 MOY	22,5	8,1	116,0	177,0	82,9
M001 ET	10,7	0,0	12,0	196,8	69,8
M002 A10M	24,8	-12,5	150,0	49,9	107,0
M002 A11F	30,9	23,8	120,0	238,0	73,7
M002 A12F	19,1	-11,9	124,0	262,0	2670,0
M002 A13F	95,4	21,2	228,0	117,0	106,0
M002 A14M	41,5	-11,9	122,0	83,0	121,0
M002 MOY	42,3	22,5	148,8	150,0	615,5
M002 ET	30,8	1,8	45,9	94,7	1148,6
M003 A10M	11,7	-11,7	60,9	70,0	0,0
M003 A11F	17,3	-15,7	61,3	141,0	0,0
M003 A12M	17,1	-18,9	73,9	152,0	0,0
M003 A13M	14,3	-14,3	65,6	128,0	0,0
M003 A14M	5,1	-12,8	71,7	141,0	0,0
M003 MOY	13,1	0,0	66,7	126,4	0,0
M003 ET	5,0	0,0	5,9	32,7	0,0
BE01 A10F	11,5	-6,8	143,0	264,0	133,0
BE01 A11F	18,1	-9,5	133,0	85,6	90,3
BE01 A12M	16,6	-10,4	122,0	187,0	109,0
BE01 A13F	7,8	-11,2	149,0	257,0	89,5
BE01 A14M	5,5	-9,2	125,0	210,0	79,6
BE01 MOY	11,9	0,0	134,4	200,7	100,3
BE01 ET	5,4	0,0	11,5	71,9	21,2
BE03 A10M	15,2	16,7	135,0	169,0	71,7
BE03 A11M	12,0	8,0	91,9	232,0	116,0
BE03 A12F	23,0	32,8	128,0	82,0	44,3
BE03 A13M	6,5	13,0	106,0	365,0	254,0
BE03 A14M	76,2	5,8	141,0	227,0	89,0
BE03 MOY	26,6	15,3	120,4	215,0	115,0
BE03 ET	28,4	10,7	20,7	103,4	82,0
BE11 A10M	15,7	-5,6	135,0	259,0	139,0
BE11 A11F	6,4	14,3	111,0	207,0	111,0
BE11 A12F	25,0	-7,2	129,0	186,0	107,0
BE11 A13M	32,7	-8,6	172,0	163,0	143,0
BE11 A14M	27,2	-6,2	107,0	136,0	74,7
BE11 MOY	21,4	14,3	130,8	190,2	114,9
BE11 ET	10,4	0,0	25,9	46,7	27,7

Tableau 5.36 (Suite)

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	32,1	-7,6	97,9	76,5	0,0
BE15 A11F	42,0	-11,7	184,0	35,0	0,0
BE15 A12F	10,9	-5,7	65,4	344,0	0,0
BE15 A13F	20,2	-8,4	97,6	75,8	0,0
BE15 A14F	58,7	-6,4	96,1	25,8	66,0
BE15 MOY	32,8	0,0	108,2	111,4	66,0
BE15 ET	18,7	0,0	44,6	132,1	0,0
BE16 A10M	21,8	-19,8	147,0	139,0	159,0
BE16 A11M	44,1	-44,0	172,0	352,0	339,0
BE16 A12M	63,0	14,5	97,0	96,9	87,2
BE16 MOY	43,0	14,5	138,7	196,0	195,1
BE16 ET	20,6	0,0	38,2	136,8	129,7
BR01 A10M	116,0	-9,4	104,0	37,5	38,4
BR01 A11M	98,9	-36,6	103,0	36,6	65,9
BR01 A12M	11,2	-16,0	118,0	288,0	152,0
BR01 A13M	12,2	-24,4	132,0	122,0	53,7
BR01 A14M	11,5	-10,5	319,0	2510,0	60,7
BR01 MOY	50,0	0,0	155,2	598,8	74,1
BR01 ET	52,8	0,0	92,3	1073,3	44,7
BR04 A10M	9,5	-15,7	85,0	126,0	67,7
BR04 A11M	10,8	-35,8	93,2	251,0	93,2
BR04 A12F	12,9	-25,8	93,0	413,0	95,6
BR04 A13M	7,9	-19,7	90,7	158,0	65,1
BR04 A14F	83,3	-92,6	157,0	278,0	130,0
BR04 MOY	24,9	0,0	103,8	245,2	90,3
BR04 ET	32,7	0,0	29,9	113,0	26,3
BR06 A10F	39,2	-21,7	82,6	43,9	41,3
BR06 A11F	62,1	-9,7	127,0	155,0	62,1
BR06 A12M	27,7	-30,8	98,5	-30,8	61,5
BR06 A13M	7,0	-17,4	129,0	69,6	130,0
BR06 A14F	21,7	-27,1	117,0	81,3	187,0
BR06 MOY	31,5	0,0	110,8	87,5	96,4
BR06 ET	20,7	0,0	19,9	47,7	60,8
BR11 A10M	22,4	-20,4	89,6	1020,0	375,0
BR11 A11F	8,5	-16,9	71,2	135,6	55,9
BR11 A12F	12,7	-12,7	109,0	127,0	87,5
BR11 A13M	10,5	-11,7	95,8	117,0	82,8
BR11 A14M	7,4	-24,6	103,0	123,0	61,4
BR11 MOY	12,3	0,0	93,7	304,5	132,5
BR11 ET	6,0	0,0	14,6	400,0	136,2

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiées par les symboles M ou F; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.37: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les muscles adducteurs de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	4,8	=4,0	115,0	32,3	278,0
M001 A11M	2,1	=7,0	68,4	83,7	87,9
M001 A12F	3,4	=6,8	95,7	102,0	76,7
M001 A13F	4,8	=9,5	108,0	95,3	100,0
M001 A14M	5,1	=10,1	86,9	80,8	62,6
M001 MOY	4,0	0,0	94,8	78,8	121,0
M001 ET	1,3	0,0	18,3	27,4	88,8
M002 A10M	2,1	=6,9	93,4	104,0	82,4
M002 A11F	24,7	9,2	81,5	119,0	176,0
M002 A12F	6,7	=9,6	95,4	154,0	176,0
M002 A13F	2,6	6,5	78,5	216,0	134,0
M002 A14M	6,9	8,7	96,4	86,8	126,0
M002 MOY	8,6	8,1	89,0	136,0	138,9
M002 ET	9,3	1,4	8,4	51,1	39,2
M003 A10M	2,1	=10,3	46,4	82,0	0,0
M003 A11F	2,5	=8,3	53,4	125,0	0,0
M003 A12M	4,4	=22,2	51,1	67,0	0,0
M003 A13M	3,4	=11,5	52,8	80,0	0,0
M003 A14M	2,8	=14,1	50,9	127,0	0,0
M003 MOY	3,0	0,0	50,9	96,2	0,0
M003 ET	,9	0,0	2,7	27,8	0,0
BE01 A10F	3,1	15,3	84,0	84,0	103,0
BE01 A11F	2,3	11,6	92,6	104,0	92,6
BE01 A12M	5,1	=12,7	112,0	140,0	156,0
BE01 A13F	3,9	=19,4	150,0	175,0	202,0
BE01 A14M	1,7	=8,4	99,4	33,4	49,3
BE01 MOY	3,2	13,5	107,6	107,3	120,6
BE01 ET	1,3	2,6	25,8	54,0	59,3
BE03 A10M	9,1	10,1	113,0	85,8	142,0
BE03 A11M	4,3	5,4	72,3	134,0	87,8
BE03 A12F	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BE03 A13M	1,4	=14,4	85,0	43,2	85,0
BE03 A14M	7,5	8,3	118,0	71,0	127,0
BE03 MOY	5,6	7,9	97,1	83,5	110,5
BE03 ET	3,4	2,4	22,0	38,0	28,5
BE11 A10M	4,2	=6,0	90,5	60,7	141,0
BE11 A11F	1,2	5,4	89,4	89,4	76,3
BE11 A12F	3,5	6,0	84,5	144,0	52,4
BE11 A13M	5,6	=7,0	108,0	105,0	108,0
BE11 A14M	6,5	=5,4	72,0	141,0	130,0
BE11 MOY	4,2	5,7	88,9	108,0	101,5
BE11 ET	2,0	,4	13,0	35,3	36,9

Tableau 5.37 (Suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	3,4	-8,3	73,0	117,0	0,0
BE15 A11F	3,3	-6,6	85,1	86,4	0,0
BE15 A12F	2,2	-7,2	74,2	72,0	0,0
BE15 A13F	3,2	8,1	78,0	96,7	0,0
BE15 A14F	2,5	-6,3	65,4	88,8	88,8
BE15 MOY	2,9	8,1	75,1	92,2	88,8
BE15 ET	0,5	0,0	7,2	16,5	0,0
BE16 A10M	8,4	-14,0	92,7	98,3	139,0
BE16 A11M	13,3	19,0	105,0	209,0	274,0
BE16 A12M	5,2	-17,2	51,7	121,0	87,9
BE16 MOY	9,0	19,0	83,1	142,8	167,0
BE16 ET	4,1	0,0	27,9	58,5	96,2
BR01 A10M	6,2	-7,8	78,8	85,8	42,1
BR01 A11M	20,4	-11,9	86,2	156,0	401,0
BR01 A12M	5,6	-7,7	78,1	127,0	82,8
BR01 A13M	7,4	-3,0	76,8	130,0	99,0
BR01 A14M	5,2	-7,5	72,6	112,0	48,7
BR01 MOY	9,0	0,0	78,5	122,2	134,7
BR01 ET	6,4	0,0	4,9	25,8	150,7
BR04 A10M	4,6	-9,2	70,5	183,0	38,5
BR04 A11M	9,1	-9,1	86,4	91,0	81,9
BR04 A12F	6,9	9,9	88,2	89,2	107,0
BR04 A13M	5,3	-17,8	83,5	107,0	74,6
BR04 A14F	3,8	-19,1	72,5	76,3	47,7
BR04 MOY	5,9	9,9	80,2	109,3	69,9
BR04 ET	2,1	0,0	8,2	42,6	27,5
BR06 A10F	5,1	-17,0	63,0	68,1	78,4
BR06 A11F	5,1	-10,2	71,3	81,5	97,7
BR06 A12M	8,4	-27,9	78,0	55,7	69,6
BR06 A13M	6,0	-19,9	83,5	-19,9	99,5
BR06 A14F	5,5	-18,4	79,0	-18,4	95,6
BR06 MOY	6,0	0,0	75,0	68,4	88,2
BR06 ET	1,4	0,0	8,0	12,9	13,4
BR11 A10M	10,8	-9,0	94,3	80,8	264,0
BR11 A11F	3,1	-7,6	50,3	45,8	48,1
BR11 A12F	7,5	-7,5	91,6	75,1	148,0
BR11 A13M	6,8	-7,5	58,6	18,5	179,0
BR11 A14M	8,5	-7,7	110,0	93,0	129,0
BR11 MOY	7,3	0,0	81,0	62,6	153,6
BR11 ET	2,8	0,0	25,4	30,2	78,4

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.38: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans la masse viscérale de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	4,3	2,7	92,5	228,0	221,0
M001 A11M	4,7	3,6	97,3	270,0	24,5
M001 A12F	12,2	-3,0	82,6	357,0	470,0
M001 A13F	19,8	8,3	127,0	331,0	715,0
M001 A14M	16,7	5,3	76,6	336,0	257,0
M001 MOY	11,5	5,0	95,2	304,4	337,5
M001 ET	7,0	2,5	19,5	53,6	263,7
M002 A10M	23,1	2,6	103,0	693,0	800,0
M002 A11F	24,0	5,7	95,3	916,0	1200,0
M002 A12F	25,6	-5,6	110,0	1670,0	1260,0
M002 A13F	18,5	9,1	97,8	1550,0	1060,0
M002 A14M	16,8	-2,9	97,9	608,0	591,0
M002 MOY	21,6	5,8	100,8	1087,4	982,2
M002 ET	3,8	3,3	5,9	492,0	281,5
M003 A10M	12,8	-3,8	59,1	267,0	308,0
M003 A11F	10,4	-4,7	54,4	275,0	0,0
M003 A12M	11,5	-6,4	58,5	127,0	0,0
M003 A13M	6,2	-3,9	43,2	104,0	0,0
M003 A14M	13,4	-4,3	62,3	195,0	306,0
M003 MOY	10,9	0,0	55,5	193,6	307,0
M003 ET	2,9	0,0	7,4	78,2	1,4
BE01 A10F	16,4	-5,5	129,0	1800,0	1110,0
BE01 A11F	11,2	-6,6	105,0	1770,0	801,0
BE01 A12M	11,0	-6,1	103,0	1280,0	610,0
BE01 A13F	16,2	-8,5	122,0	2380,0	1250,0
BE01 A14M	10,1	-3,9	112,0	890,0	398,0
BE01 MOY	13,0	0,0	114,2	1624,0	833,8
BE01 ET	3,1	0,0	11,1	565,9	350,2
BE03 A10M	26,2	3,4	154,0	904,0	488,0
BE03 A11M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BE03 A12F	14,7	3,4	113,0	233,0	521,0
BE03 A13M	13,7	7,6	111,0	336,0	564,0
BE03 A14M	5,4	-,9	98,7	437,0	179,0
BE03 MOY	15,0	4,8	119,2	477,5	438,0
BE03 ET	8,6	2,4	24,1	296,3	175,4
BE11 A10M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BE11 A11F	28,3	8,8	183,0	1240,0	652,0
BE11 A12F	14,7	3,2	179,0	2220,0	1120,0
BE11 A13M	8,1	2,1	150,0	782,0	298,0
BE11 A14M	32,2	4,0	140,0	1640,0	631,0
BE11 MOY	20,8	4,5	163,0	1470,5	675,3
BE11 ET	11,3	3,0	21,2	610,4	337,9

Tableau 5.38 (Suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	13,5	-3,1	72,0	407,0	470,0
BE15 A11F	13,5	-2,4	83,6	314,0	379,0
BE15 A12F	18,1	-4,0	106,0	281,0	771,0
BE15 A13F	13,2	-2,8	88,5	252,0	521,0
BE15 A14F	14,3	-2,5	99,3	740,0	667,0
BE15 MOY	14,5	0,0	89,9	398,8	561,6
BE15 ET	2,0	0,0	13,3	199,4	156,8
BE16 A10M	24,4	11,9	190,0	1250,0	683,0
BE16 A11M	79,1	22,0	286,0	1100,0	714,0
BE16 A12M	15,4	6,6	126,0	495,0	330,0
BE16 MOY	39,6	13,5	200,7	948,3	575,7
BE16 ET	34,5	7,8	80,5	399,7	213,3
BR01 A10M	22,1	3,4	98,5	272,0	151,0
BR01 A11M	28,3	5,6	114,0	129,0	313,0
BR01 A12M	22,8	6,8	102,0	181,0	296,0
BR01 A13M	24,4	5,3	110,0	318,0	234,0
BR01 A14M	23,1	4,9	90,2	262,0	182,0
BR01 MOY	24,1	5,2	102,9	232,4	235,2
BR01 ET	2,5	1,2	9,4	76,0	70,1
BR04 A10M	20,1	-2,7	80,9	214,0	188,0
BR04 A11M	23,8	-1,9	136,0	208,0	245,0
BR04 A12F	20,2	3,8	72,1	305,0	290,0
BR04 A13M	16,7	-3,7	100,0	222,0	263,0
BR04 A14F	29,4	-11,3	112,0	328,0	588,0
BR04 MOY	22,0	3,8	100,2	255,4	314,8
BR04 ET	4,8	0,0	25,4	56,6	157,2
BR06 A10F	38,5	5,8	105,0	187,0	362,0
BR06 A11F	38,3	6,4	132,0	902,0	570,0
BR06 A12M	33,0	-8,7	92,9	60,8	486,0
BR06 A13M	27,5	9,5	118,0	85,5	364,0
BR06 A14F	35,0	-11,3	108,0	45,1	418,0
BR06 MOY	34,5	7,2	111,2	256,1	444,0
BR06 ET	4,5	2,0	14,7	365,3	84,5
BR11 A10M	41,9	4,0	40,2	370,0	652,0
BR11 A11F	13,7	-5,3	66,7	284,0	210,0
BR11 A12F	36,6	5,4	139,0	160,0	646,0
BR11 A13M	18,9	1,5	78,6	385,0	257,0
BR11 A14M	38,1	7,7	160,0	616,0	437,0
BR11 MOY	29,8	4,7	96,9	363,0	440,4
BR11 ET	12,6	2,6	50,5	167,3	208,4

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11, ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.39: Concentrations de métaux traces (µg/g, poids sec) dans le foie de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	21,4	4,6	115,0	118,0	219,0
M001 A11M	29,4	-4,0	157,0	151,0	306,0
M001 A12F	23,9	4,6	152,0	110,0	281,0
M001 A13F	31,9	10,8	155,0	64,9	272,0
M001 A14M	24,4	4,7	103,0	160,0	216,0
M001 MOY	26,2	6,2	136,4	120,8	258,8
M001 ET	4,3	3,1	25,4	37,7	39,7
M002 A10M	26,2	7,8	115,0	238,0	389,0
M002 A11F	25,9	4,6	122,0	273,0	373,0
M002 A12F	37,9	6,8	152,0	169,0	426,0
M002 A13F	33,2	9,1	135,0	727,0	454,0
M002 A14M	32,4	4,9	116,0	245,0	330,0
M002 MOY	31,1	6,6	128,0	330,4	394,4
M002 ET	5,1	1,9	15,6	225,0	47,9
M003 A10M	18,6	-23,1	74,2	394,0	0,0
M003 A11F	21,7	-7,8	85,4	140,0	0,0
M003 A12M	22,0	-13,8	74,3	138,0	0,0
M003 A13M	19,2	8,3	78,5	150,0	0,0
M003 A14M	22,2	-9,7	74,3	87,0	0,0
M003 MOY	20,7	8,3	77,3	181,8	0,0
M003 ET	1,7	0,0	4,9	121,1	0,0
BE01 A10F	24,3	5,4	119,0	486,0	454,0
BE01 A11F	26,5	14,7	126,0	346,0	268,0
BE01 A12M	22,2	11,1	123,0	489,0	252,0
BE01 A13F	26,0	-9,0	130,0	627,0	370,0
BE01 A14M	20,5	-7,3	99,4	438,0	144,0
BE01 MOY	23,9	10,4	119,5	477,2	297,6
BE01 ET	2,5	4,7	11,9	101,7	118,6
BE03 A10M	39,5	6,9	193,0	1210,0	479,0
BE03 A11M	58,8	14,5	218,0	835,0	508,0
BE03 A12F	39,7	19,2	160,0	237,0	179,0
BE03 A13M	30,1	-10,4	163,0	166,0	234,0
BE03 A14M	31,1	2,2	171,0	368,0	295,0
BE03 MOY	39,8	10,7	181,0	563,2	339,0
BE03 ET	11,5	7,6	24,4	445,7	147,2
BE11 A10M	36,6	-4,3	231,0	941,0	496,0
BE11 A11F	45,1	-4,8	181,0	285,0	276,0
BE11 A12F	53,5	12,7	214,0	1220,0	561,0
BE11 A13M	58,8	6,5	222,0	620,0	470,0
BE11 A14M	56,7	5,5	197,0	1310,0	840,0
BE11 MOY	50,1	8,2	209,0	875,2	528,6
BE11 ET	9,2	3,9	20,0	425,9	203,9

Tableau 5.39 (Suite)

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	26,0	-4,9	106,0	78,6	0,0
BE15 A11F	21,8	-4,2	96,6	79,8	0,0
BE15 A12F	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BE15 A13F	27,9	5,5	102,0	87,5	0,0
BE15 A14F	34,4	4,9	138,0	202,0	220,0
BE15 MOY	27,5	5,2	110,7	112,0	220,0
BE15 ET	5,2	,4	18,6	60,1	0,0
BE16 A10M	34,1	9,7	205,0	1460,0	516,0
BE16 A11M	42,3	23,0	214,0	769,0	938,0
BE16 A12M	46,1	44,5	184,0	107,0	210,0
BE16 MOY	40,8	25,7	201,0	778,7	554,7
BE16 ET	6,1	17,6	15,4	676,6	365,5
BR01 A10M	63,0	-5,9	150,0	119,0	89,8
BR01 A11M	62,3	-7,7	172,0	162,0	305,0
BR01 A12M	72,5	-7,1	184,0	142,0	131,0
BR01 A13M	57,4	-7,7	128,0	176,0	142,0
BR01 A14M	53,4	-3,8	140,0	146,0	141,0
BR01 MOY	61,7	0,0	154,8	149,0	161,8
BR01 ET	7,2	0,0	23,0	21,5	82,9
BR04 A10M	71,9	-5,2	122,0	104,0	95,9
BR04 A11M	55,3	-5,8	156,0	69,8	157,0
BR04 A12F	36,6	-8,0	89,9	55,7	79,6
BR04 A13M	57,1	-10,2	153,0	255,0	149,0
BR04 A14F	54,1	-15,9	130,0	223,0	143,0
BR04 MOY	55,0	0,0	130,2	141,5	124,9
BR04 ET	12,5	0,0	26,8	91,4	34,8
BR06 A10F	60,2	-10,4	107,0	72,7	84,1
BR06 A11F	83,6	-7,7	179,0	207,0	268,0
BR06 A12M	92,6	16,5	225,0	49,6	185,0
BR06 A13M	93,7	-15,6	222,0	78,1	208,0
BR06 A14F	108,0	15,2	195,0	45,6	196,0
BR06 MOY	87,6	15,9	185,6	90,6	188,2
BR06 ET	17,6	,9	47,9	66,6	66,5
BR11 A10M	61,8	-9,8	146,0	137,0	322,0
BR11 A11F	34,8	-15,8	96,4	190,0	174,0
BR11 A12F	41,2	6,5	165,0	58,6	199,0
BR11 A13M	67,1	-5,1	119,0	164,0	213,0
BR11 A14M	12,3	-6,6	226,0	132,0	253,0
BR11 MOY	43,4	6,5	150,5	136,3	232,2
BR11 ET	22,1	0,0	49,6	49,3	57,8

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.40: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les branchies de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	258,0	10,2	531,0	1640,0	15900,0
M001 A11M	198,0	6,2	456,0	1620,0	16200,0
M001 A12F	162,0	7,3	538,0	1780,0	15300,0
M001 A13F	159,0	16,9	659,0	2370,0	13900,0
M001 A14M	236,0	15,3	382,0	1190,0	14300,0
M001 MOY	202,6	11,2	513,2	1720,0	15120,0
M001 ET	44,0	4,8	103,3	425,3	996,0
M002 A10M	236,0	9,2	537,0	1540,0	16900,0
M002 A11F	152,0	26,7	512,0	1710,0	16200,0
M002 A12F	165,0	14,8	548,0	1810,0	16300,0
M002 A13F	150,0	19,5	485,0	2280,0	16400,0
M002 A14M	248,0	8,2	469,0	2180,0	16400,0
M002 MOY	190,2	15,7	510,2	1904,0	16440,0
M002 ET	47,8	7,7	33,5	314,8	270,2
M003 A10M	425,0	19,7	579,0	1730,0	17600,0
M003 A11F	212,0	23,8	405,0	983,0	12600,0
M003 A12M	268,0	25,3	381,0	655,0	11200,0
M003 A13M	334,0	20,1	397,0	1290,0	10400,0
M003 A14M	348,0	14,0	426,0	1598,0	14800,0
M003 MOY	317,4	20,6	437,6	1251,2	13320,0
M003 ET	81,1	4,4	80,7	441,1	2917,5
BE01 A10F	130,0	3,7	542,0	1080,0	10900,0
BE01 A11F	163,0	6,5	829,0	1750,0	14800,0
BE01 A12M	195,0	11,8	649,0	1890,0	10300,0
BE01 A13F	277,0	21,2	891,0	1340,0	17000,0
BE01 A14M	185,0	8,0	548,0	1640,0	9370,0
BE01 MOY	190,0	10,2	691,8	1540,0	12474,0
BE01 ET	54,7	6,8	160,8	327,2	3268,5
BE03 A10M	215,0	8,0	1800,0	4290,0	19400,0
BE03 A11M	276,0	1,5	2230,0	3780,0	19900,0
BE03 A12F	333,0	31,7	1100,0	1430,0	17900,0
BE03 A13M	317,0	14,9	888,0	1740,0	17800,0
BE03 A14M	273,0	-1,0	2410,0	2890,0	16700,0
BE03 MOY	282,8	14,0	1685,6	2826,0	18340,0
BE03 ET	45,9	13,0	673,3	1243,6	1297,3
BE11 A10M	333,0	-1,9	2440,0	6300,0	19300,0
BE11 A11F	418,0	22,7	3170,0	2810,0	23500,0
BE11 A12F	401,0	14,1	2430,0	3800,0	25500,0
BE11 A13M	413,0	4,6	2070,0	4150,0	18200,0
BE11 A14M	400,0	2,5	1790,0	6860,0	16900,0
BE11 MOY	393,0	11,0	2380,0	4784,0	20680,0
BE11 ET	34,4	9,3	518,3	1723,0	3658,1

Tableau 5.40 (Suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	454,0	-6,6	967,0	1260,0	14700,0
BE15 A11F	432,0	16,9	1250,0	1520,0	17700,0
BE15 A12F	469,0	-6,5	1420,0	1500,0	20900,0
BE15 A13F	383,0	-8,1	956,0	1380,0	17300,0
BE15 A14F	398,0	12,0	1390,0	2470,0	22200,0
BE15 MOY	427,2	14,5	1196,6	1626,0	18560,0
BE15 ET	36,4	3,5	224,0	483,2	2998,0
BE16 A10M	193,0	-3,8	2690,0	6060,0	18600,0
BE16 A11M	334,0	25,7	3920,0	3860,0	21100,0
BE16 A12M	381,0	39,7	3650,0	2730,0	17400,0
BE16 MOY	302,7	32,7	3420,0	4216,7	19033,3
BE16 ET	97,8	9,9	646,5	1693,4	1887,7
BR01 A10M	716,0	43,3	889,0	2030,0	13400,0
BR01 A11M	344,0	68,2	1630,0	1840,0	16000,0
BR01 A12M	515,0	38,2	841,0	2350,0	13100,0
BR01 A13M	603,0	23,3	1230,0	2100,0	11900,0
BR01 A14M	565,0	22,5	1210,0	2700,0	11900,0
BR01 MOY	548,6	39,1	1160,0	2204,0	13260,0
BR01 ET	136,2	18,6	317,6	332,0	1677,2
BR04 A10M	772,0	69,9	1490,0	1180,0	17200,0
BR04 A11M	531,0	49,6	1660,0	2040,0	18100,0
BR04 A12F	766,0	73,2	1520,0	1240,0	19000,0
BR04 A13M	781,0	44,1	819,0	1133,0	14200,0
BR04 A14F	1110,0	96,2	1110,0	962,0	16800,0
BR04 MOY	792,0	66,6	1319,8	1311,0	17060,0
BR04 ET	206,4	20,8	346,3	420,5	1810,5
BR06 A10F	1200,0	79,4	860,0	794,0	13900,0
BR06 A11F	508,0	19,8	2140,0	1780,0	20000,0
BR06 A12M	1140,0	45,3	771,0	725,0	14400,0
BR06 A13M	1280,0	52,1	782,0	569,0	13500,0
BR06 A14F	171,0	-2,0	116,0	81,2	2480,0
BR06 MOY	859,8	49,2	933,8	789,8	12856,0
BR06 ET	492,2	24,5	738,0	619,6	6375,5
BR11 A10M	621,0	41,6	2410,0	2630,0	20000,0
BR11 A11F	575,0	108,0	2480,0	1890,0	22000,0
BR11 A12F	477,0	71,3	1820,0	1990,0	16600,0
BR11 A13M	499,0	23,9	1160,0	4250,0	16500,0
BR11 A14M	464,0	18,3	1140,0	3460,0	11000,0
BR11 MOY	527,2	52,6	1802,0	2844,0	17220,0
BR11 ET	67,8	37,2	648,1	1005,2	4188,3

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.41: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans le manteau de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	31,1	5,0	160,0	125,0	1040,0
M001 A11M	29,1	3,9	245,0	148,0	1430,0
M001 A12F	19,0	-4,2	184,0	211,0	674,0
M001 A13F	26,1	15,7	195,0	470,0	1490,0
M001 A14M	18,2	-5,1	92,9	136,0	541,0
M001 MOY	24,7	8,2	175,4	218,0	1035,0
M001 ET	5,9	6,5	55,6	144,8	429,4
M002 A10M	30,7	-4,3	157,0	170,0	1120,0
M002 A11F	22,3	4,8	144,0	435,0	1210,0
M002 A12F	28,0	4,5	116,0	496,0	1480,0
M002 A13F	28,2	6,2	160,0	496,0	1640,0
M002 A14M	28,9	4,7	123,0	188,0	1100,0
M002 MOY	27,6	5,1	140,0	357,0	1310,0
M002 ET	3,2	0,8	19,8	164,5	238,7
M003 A10M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M003 A11F	19,8	6,6	87,6	191,0	723,0
M003 A12M	23,0	-13,5	100,0	149,0	0,0
M003 A13M	26,0	-7,4	111,0	163,0	623,0
M003 A14M	43,1	-9,2	85,2	275,0	1380,0
M003 MOY	28,0	6,6	95,9	194,5	908,7
M003 ET	10,4	0,0	11,9	56,4	411,2
BE01 A10F	12,6	4,2	121,0	295,0	1010,0
BE01 A11F	15,2	-7,2	183,0	507,0	1170,0
BE01 A12M	9,5	-6,3	120,0	507,0	405,0
BE01 A13F	15,6	14,2	127,0	498,0	1260,0
BE01 A14M	6,4	-4,8	147,0	285,0	336,0
BE01 MOY	11,9	9,2	139,6	418,4	836,6
BE01 ET	3,9	7,1	26,6	117,3	434,6
BE03 A10M	25,3	3,4	177,0	756,0	1030,0
BE03 A11M	32,9	6,2	176,0	932,0	1180,0
BE03 A12F	27,1	8,3	161,0	242,0	1090,0
BE03 A13M	21,1	-7,5	211,0	234,0	965,0
BE03 A14M	29,9	3,2	193,0	469,0	731,0
BE03 MOY	27,3	5,3	183,6	526,6	999,2
BE03 ET	4,5	2,4	19,0	311,0	169,5
BE11 A10M	33,6	3,7	271,0	951,0	1350,0
BE11 A11F	23,5	1,5	250,0	396,0	1120,0
BE11 A12F	27,0	-3,2	207,0	508,0	1590,0
BE11 A13M	71,2	10,6	432,0	1100,0	2090,0
BE11 A14M	40,3	2,4	186,0	989,0	1320,0
BE11 MOY	39,1	4,6	269,2	788,8	1494,0
BE11 ET	19,1	4,1	97,0	314,8	372,6

Tableau 5.41: (Suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	10,8	-4,2	59,9	171,0	453,0
BE15 A11F	17,5	-4,4	118,0	179,0	843,0
BE15 A12F	12,4	-5,1	85,5	170,0	551,0
BE15 A13F	8,9	-5,3	74,7	105,0	505,0
BE15 A14F	10,5	4,8	72,5	170,0	506,0
BE15 MOY	12,0	4,8	82,1	159,0	571,6
BE15 ET	3,3	0,0	22,0	30,4	155,6
BE16 A10M	45,4	-10,3	382,0	1240,0	2640,0
BE16 A11M	117,0	21,4	815,0	2470,0	4760,0
BE16 A12M	45,0	24,5	352,0	685,0	1560,0
BE16 MOY	69,1	23,0	516,3	1465,0	2986,7
BE16 ET	41,5	2,2	259,1	913,5	1627,9
BR01 A10M	89,9	3,9	93,0	113,0	708,0
BR01 A11M	234,0	22,4	432,0	426,0	5330,0
BR01 A12M	41,4	10,9	186,0	103,0	756,0
BR01 A13M	60,5	10,9	270,0	272,0	1140,0
BR01 A14M	45,5	3,8	193,0	171,0	713,0
BR01 MOY	94,3	10,4	234,8	217,0	1729,4
BR01 ET	80,4	7,6	126,8	134,8	2020,9
BR04 A10M	88,4	-4,8	192,0	135,0	1560,0
BR04 A11M	78,0	5,2	266,0	114,0	1310,0
BR04 A12F	30,2	-5,4	105,0	86,4	626,0
BR04 A13M	56,5	-11,5	147,0	230,4	1020,0
BR04 A14F	66,3	-15,8	156,0	205,0	711,0
BR04 MOY	63,9	5,2	173,2	154,2	1045,4
BR04 ET	22,3	0,0	60,4	61,2	394,7
BR06 A10F	46,6	-11,4	135,0	171,0	753,0
BR06 A11F	46,6	12,1	218,0	786,0	1050,0
BR06 A12M	67,4	-18,2	124,0	91,1	1110,0
BR06 A13M	62,3	12,2	190,0	48,8	879,0
BR06 A14F	32,9	14,3	121,0	114,0	600,0
BR06 MOY	51,2	12,9	157,6	242,2	878,4
BR06 ET	13,8	1,2	43,8	307,2	210,0
BR11 A10M	113,0	11,2	420,0	336,0	2340,0
BR11 A11F	35,2	-5,3	111,0	147,0	894,0
BR11 A12F	66,4	10,0	199,0	230,0	1410,0
BR11 A13M	64,0	5,1	150,0	492,0	1520,0
BR11 A14M	70,2	4,9	351,0	634,0	1370,0
BR11 MOY	69,8	7,8	246,2	367,8	1506,8
BR11 ET	27,9	3,3	133,2	196,9	523,9

a Un signe (-) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité; la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.42: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) dans les oeufs de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A12F	12,6	3,7	38,2	27,4	203,0
M001 A13F	14,9	4,2	62,8	48,3	370,0
M001 MOY	13,8	4,0	50,5	37,9	286,5
M001 ET	1,6	,4	17,4	14,8	118,1
M002 A11F	13,5	3,0	41,2	70,5	260,0
M002 A12F	14,1	3,6	56,9	82,7	417,0
M002 A13F	13,5	3,8	43,1	115,0	325,0
M002 MOY	13,7	3,5	47,1	89,4	334,0
M002 ET	,3	,4	8,6	23,0	78,9
M003 A11F	15,4	2,4	52,5	93,0	571,0
BE01 A10F	12,4	3,4	37,1	30,9	196,0
BE01 A11F	15,9	3,3	39,5	39,0	137,0
BE01 A13F	14,2	3,7	35,7	22,2	159,0
BE01 MOY	14,2	3,5	37,4	30,7	164,0
BE01 ET	1,8	,2	1,9	8,4	29,8
BE03 A12F	14,2	10,9	36,7	40,0	97,5
BE11 A11F	20,2	1,4	91,9	137,0	464,0
BE11 A12F	7,9	1,3	46,3	96,7	217,0
BE11 MOY	14,1	1,4	69,1	116,9	340,5
BE11 ET	8,7	,1	32,2	28,5	174,7
BE15 A10F	10,1	3,3	38,2	22,9	219,0
BE15 A11F	10,2	-3,3	37,6	19,8	0,0
BE15 A12F	8,9	-3,4	35,4	27,5	0,0
BE15 A13F	7,3	3,0	30,8	21,3	0,0
BE15 A14F	13,1	3,0	47,9	21,3	241,0
BE15 MOY	9,9	3,1	38,0	22,6	230,0
BE15 ET	2,1	,2	6,3	3,0	15,6
BR04 A12F	25,5	4,8	82,4	30,6	568,0
BR04 A14F	49,0	8,5	90,1	110,0	816,0
BR04 MOY	37,3	6,7	86,3	70,3	692,0
BR04 ET	16,6	2,6	5,4	56,1	175,4

Tableau 5.42 (Suite).

Station	[Cu]	[Pb]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BR06 A10F	40,4	-4,3	65,1	60,8	347,0
BR06 A11F	50,5	10,1	226,0	303,0	1600,0
BR06 A14F	49,4	5,4	151,0	27,1	575,0
BR06 MOY	46,8	7,8	147,4	130,3	840,7
BR06 ET	5,5	3,3	80,5	150,5	667,4
BR11 A11F	26,1	6,4	71,0	64,5	474,0
BR11 A12F	37,7	9,0	110,0	85,2	686,0
BR11 MOY	31,9	7,7	90,5	74,9	580,0
BR11 ET	8,2	1,8	27,6	14,6	149,9

a Un signe (\bar{b}) indique une valeur plus petite (<) que la limite de sensibilité. La notation A10F, A11F ... indique qu'il s'agit d'individus femelles; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type.

Tableau 5.43: Concentrations de métaux traces ($\mu\text{g/g}$, poids sec) reconstituées dans les chairs de Anodonta grandis^a.

Station ^b	[Cu]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
M001 A10M	63,0	196,9	441,6	3424,9
M001 A11M	62,4	218,2	565,6	4519,7
M001 A12F	37,0	161,0	389,7	2538,7
M001 A13F	45,2	216,7	606,7	3033,4
M001 A14M	64,6	152,4	431,2	3272,7
M001 MOY	54,4	189,1	486,9	3357,9
M001 ET	12,5	30,9	93,7	731,1
M002 A10M	71,4	214,7	623,9	4341,3
M002 A11F	32,7	121,1	437,7	2137,0
M002 A12F	45,4	171,1	643,2	3505,6
M002 A13F	40,2	149,7	755,5	2870,9
M002 A14M	85,3	208,0	836,5	4904,2
M002 MOY	55,0	172,9	659,3	3551,8
M002 ET	22,3	39,4	151,1	1109,0
M003 A10M	0,0	0,0	0,0	0,0
M003 A11F	37,6	98,0	227,7	0,0
M003 A12M	85,7	156,8	275,5	0,0
M003 A13M	86,5	142,3	390,6	0,0
M003 A14M	97,9	155,0	518,1	0,0
M003 MOY	76,9	138,0	353,0	0,0
M003 ET	26,8	27,4	129,6	0,0
BE01 A10F	26,4	125,4	365,5	1573,0
BE01 A11F	32,0	167,7	503,7	1951,1
BE01 A12M	53,4	234,7	903,6	2586,0
BE01 A13F	45,9	178,5	547,3	2407,8
BE01 A14M	49,6	217,5	725,3	2350,5
BE01 MOY	41,5	184,8	609,1	2173,7
BE01 ET	11,6	43,1	208,9	408,2
BE03 A10M	70,5	555,5	1607,8	5143,5
BE03 A11M	0,0	0,0	0,0	0,0
BE03 A12F	0,0	0,0	0,0	0,0
BE03 A13M	101,8	355,1	668,3	5425,4
BE03 A14M	91,7	779,3	1092,5	4942,4
BE03 MOY	88,0	563,3	1122,8	5170,4
BE03 ET	15,9	212,2	470,5	242,6
BE11 A10M	0,0	0,0	0,0	0,0
BE11 A11F	47,0	329,1	569,8	1959,8
BE11 A12F	64,8	401,5	893,0	3765,4
BE11 A13M	103,2	570,7	1392,2	4049,2
BE11 A14M	104,3	464,2	2241,9	3841,5
BE11 MOY	79,8	441,4	1274,2	3404,0
BE11 ET	28,6	102,4	728,4	970,2

Tableau 5.43 (Suite).

Station	[Cu]	[Zn]	[Fe]	[Mn]
BE15 A10F	43,6	121,2	193,9	0,0
BE15 A11F	39,6	140,0	180,7	0,0
BE15 A12F	0,0	0,0	0,0	0,0
BE15 A13F	31,6	108,0	154,8	0,0
BE15 A14F	39,7	148,3	302,6	1622,6
BE15 MOY	38,7	129,4	208,0	1622,6
BE15 ET	5,0	18,2	65,1	0,0
BE16 A10M	86,9	1096,9	2812,9	7219,9
BE16 A11M	160,5	1593,1	2144,3	8404,5
BE16 A12M	131,0	1175,8	1068,4	5398,1
BE16 MOY	126,1	1288,6	2008,5	7007,5
BE16 ET	37,0	266,6	880,1	1514,4
BR01 A10M	177,6	255,3	538,7	2790,8
BR01 A11M	168,8	666,3	741,5	6249,7
BR01 A12M	175,2	342,8	806,5	4113,6
BR01 A13M	226,9	511,7	877,1	4283,8
BR01 A14M	162,1	398,6	939,4	3119,6
BR01 MOY	182,1	434,9	780,6	4111,5
BR01 ET	25,7	159,3	154,3	1353,7
BR04 A10M	225,3	457,0	418,7	4633,7
BR04 A11M	160,3	531,6	625,4	4815,6
BR04 A12F	111,6	253,7	243,1	2611,1
BR04 A13M	194,0	269,4	414,8	3382,2
BR04 A14F	192,8	246,2	282,9	2845,9
BR04 MOY	176,8	351,6	397,0	3657,7
BR04 ET	43,1	133,2	149,7	1015,3
BR06 A10F	154,8	166,6	175,0	1666,2
BR06 A11F	133,1	536,1	737,0	4364,4
BR06 A12M	342,2	298,5	0,0	4204,6
BR06 A13M	377,3	321,5	0,0	3940,1
BR06 A14F	107,7	125,4	0,0	1442,1
BR06 MOY	223,0	289,6	456,0	3123,5
BR06 ET	126,5	161,2	397,4	1442,8
BR11 A10M	250,6	936,9	1117,4	7496,8
BR11 A11F	114,4	474,1	411,2	3996,6
BR11 A12F	99,9	370,8	384,3	2909,0
BR11 A13M	138,6	339,0	1213,6	4109,7
BR11 A14M	172,7	499,6	1423,1	3885,0
BR11 MOY	155,3	524,1	909,9	4479,4
BR11 ET	60,0	240,4	480,5	1753,1

a Les concentrations sont reconstituées avec l'équation (5.1); la notation (0.0) indique une valeur non mesurée.

b La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; MOY et ET indiquent respectivement la valeur moyenne et l'écart-type; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F.

L'absence d'oeufs nous a permis de distinguer les femelles porteuses d'oeufs (F) des autres individus (M)* ee qui n'était pas le cas pour Elliptio complanata. Les concentrations de ces mêmes métaux, reconstituées avec l'équation (5.1) pour l'organisme complet excluant la coquille, sont données dans le Tableau 5.43. On notera que, comme dans le cas de Elliptio complanata, la partie de l'organisme en contact direct avec les sédiments était rejetée parce qu'il y avait danger de contamination par les sédiments; elle correspondait à environ 10-15% du poids de l'organisme. Divers paramètres (âge, longueur, largeur, hauteur, indice de condition) de chaque individu sont donnés dans le Tableau 5.44.

Un certain nombre d'observations générales peuvent être faites à partir des Tableaux 5.36 à 5.44. En ce qui concerne l'accumulation des métaux traces dans les différents organes, on obtient généralement les ordres décroissants suivants:

- . pour Cu: branchies > manteau > foie > pied > oeufs > masse viscérale > muscles
- . pour Pb: branchies > foie > muscles > manteau > oeufs > masse viscérale
- . pour Zn: branchies > manteau > foie > pied > masse viscérale muscles > oeufs
- . pour Fe: branchies > masse viscérale > manteau > foie > pied > muscles > oeufs
- . pour Mn: branchies > manteau > masse viscérale > oeufs > foie > pied > muscles.

* Pour simplifier l'écriture, dans la suite du texte, on utilise mâle (M) et femelle (F) tout en sachant que (M) représente également des femelles non porteuses d'oeufs.

Tableau 5.44: Indice de condition, âge, longueur, largeur et épaisseur de la coquille de Anodonta grandis.

Station ^a	Indice de condition	Age (année)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
MO-01 A10M	0.114	8	95	54	37
MO-01 A12M	0.097	7	93	52	35
MO-01 A12F	0.122	7	88	50	31
MO-01 A13F	0.110	6	89	51	34
MO-01 A14M	0.118	6	83	46	29
MO-02 A10M	0.083	6	89	50	33
MO-02 A11F	0.137	6	96	53	36
MO-02 A12F	0.103	6	94	53	36
MO-02 A13F	0.126	7	97	52	39
MO-02 A14M	0.097	6	88	51	35
MO-03 A10M	0.070	6	84	45	30
MO-03 A11F	0.131	6	94	52	33
MO-03 A12M	0.095	5	69	36	25
MO-03 A13M	0.075	5	77	44	28
MO-03 A14M	0.086	5	70	40	27
BE-01 A10F	0.158	4	90	58	34
BE-01 A11F	0.137	3	80	47	29
BE-01 A12M	0.091	3	75	43	26
BE-01 A13F	0.158	3	80	43	25
BE-01 A14M	0.097	3	77	44	26
BE-03 A10M	0.110	6	97	54	40
BE-03 A11M	0.108	6	103	55	39
BE-03 A12F	0.155	4	91	51	36
BE-03 A13M	0.087	3	75	45	28
BE-03 A14M	0.093	6	105	60	44
BE-11 A10M	0.102	9	96	54	41
BE-11 A11F	0.151	7	102	57	39
BE-11 A12F	0.148	6	104	54	43
BE-11 A13M	0.154	6	93	53	35
BE-11 A14M	0.107	6	95	52	39

Tableau 5.44: (SUITE)

Station	Indice de condition	Age (année)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
BE-15 A10F	0.211	3	93	52	34
BE-15 A11F	0.181	3	90	51	34
BE-15 A12F	0.222	3	90	55	37
BE-15 A13F	0.227	3	94	54	37
BE-15 A14F	0.189	3	91	50	36
BE-16 A10M	0.064	7	95	52	34
BE-16 A11M	0.087	5	79	42	28
BE-16 A12M	0.092	5	78	43	27
BR-01 A10M	0.111	6	91	48	33
BR-01 A11M	0.113	5	88	44	31
BR-01 A12M	0.084	6	90	47	37
BR-01 A13M	0.099	7	86	51	31
BR-01 A14M	0.109	7	90	49	35
BR-04 A10M	0.108	6	87	45	33
BR-04 A11M	0.092	6	90	46	33
BR-04 A12F	0.141	5	87	44	33
BR-04 A13M	0.112	6	69	40	23
BR-04 A14F	0.106	4	65	39	25
BR-06 A10F	0.111	4	74	43	29
BR-06 A11F	0.107	5	88	47	33
BR-06 A12M	0.102	4	65	39	22
BR-06 A13M	0.095	4	70	40	25
BR-06 A14F	0.165	3	70	43	25
BR-11 A10M	0.087	6	91	45	33
BR-11 A11F	0.139	7	91	48	34
BR-11 A12F	0.132	6	93	52	36
BR-11 A13M	0.094	7	94	49	37
BR-11 A14M	0.085	7	98	55	38

^a La notation A10, A11 ... indique qu'il s'agit d'individus; les individus mâles ou femelles sont identifiés par les symboles M ou F.

Ces ordres sont un peu différents de ceux obtenus pour Elliptio complanata (voir la section 5.8). A. grandis semble accumuler plus de cuivre dans son pied, sa masse viscérale, son foie et ses branchies, moins de fer dans son foie et ses branchies et dans son manteau et plus de manganèse dans ses branchies que E. complanata. Les concentrations de plomb sont souvent plus faibles que la limite de sensibilité, notamment dans le pied et les muscles adducteurs.

6. TRAITEMENT DES DONNEES ET DISCUSSION

6.1 Estimation des associations des métaux traces particulières avec les phases des sédiments

Dans une étude approfondie de sédiments de ruisseaux (Tessier et al., 1982), on a pu obtenir des renseignements importants sur les associations des métaux traces particulières dans les diverses fractions lessivées avec certaines phases solides des sédiments. Dans cette étude, chaque échantillon de sédiments était séparé en huit fractions granulométriques et la procédure de détermination de la spéciation était appliquée sur chacune des fractions granulométriques de chaque sédiment; des valeurs de coefficients de corrélation linéaire (r) étaient ensuite calculés, pour chaque échantillon pris séparément (le regroupement considéré était composé des huit fractions granulométriques), entre les métaux traces et les constituants du sédiment. Cette procédure très laborieuse présentait l'avantage de minimiser les variations d'ordre géologique ou autre qui peuvent exister d'un site à l'autre; elle a permis d'associer assez clairement les métaux traces libérés dans les différentes fractions (F1 + F5) à des phases solides de quelques sédiments de ruisseaux. Par ailleurs, la sélectivité des réactifs utilisés dans les cinq étapes de la procédure séquentielle de détermination de la spéciation a été étudiée pour quelques sédiments des rivières Yamaska et Saint-François, ainsi que de ruisseaux de Gaspésie (Tessier et al., 1979; 1980; 1982), ce qui a permis d'obtenir certains renseignements concernant l'association des métaux traces avec les phases des sédiments et de faire ressortir le comportement géochimique des divers métaux.

Dans cette section, on utilise les renseignements obtenus des diverses études mentionnées ci-dessus, de même que des calculs des coefficients de corrélation (r), pour évaluer les associations des métaux traces particulières avec les diverses phases des sédiments dans la région d'étude. Etant donné que les sédiments n'ont pas été séparés en plusieurs fractions granulométriques (ce qui aurait constitué un

travail trop important dans le cadre de ce projet), les coefficients de corrélation sont calculés en prenant des groupes de stations; l'hypothèse que les coefficients de corrélation sont statistiquement différents de zéro a été vérifiée et les données ont été examinées graphiquement pour détecter et rejeter des corrélations fictives. Il faut cependant être conscient qu'en procédant de cette façon, on introduit des variations d'ordres géologique et anthropique qui influent sur les valeurs des coefficients de corrélation; ces derniers doivent donc être interprétés avec prudence. Des premiers essais de calcul de r , effectués sur les tranches 0-2 cm des carottes de sédiments, en considérant comme groupe toutes les stations, illustrent ces problèmes (Figures 6.1 et 6.2). Dans le premier cas (Figure 6.1), on obtient $r = 0.011$; en éliminant PE-01 et en traitant séparément d'une part le lac Routhier et d'autre part les autres lacs (Beauchastel, La Bruère, Montbeillard), on obtient respectivement $r = 0.955$ et $r = 0.458$. Dans le deuxième cas (Figure 6.2), on obtient $r = 0.029$, alors qu'en éliminant PE-01 et en constituant deux groupes différents, on obtient $r = 0.402$ (lac Routhier) et $r = 0.882$ (autres lacs). Après examen exhaustif des graphiques, on s'est rendu compte que i) de façon générale, la station PE-01 se comporte de manière tout à fait différente des autres; ii) les stations du lac Routhier se comportent souvent de façon différente de celles des lacs Beauchastel, La Bruère et Montbeillard. Pour ces raisons, les valeurs de r discutées ci-dessous ont été calculées pour les cinq groupes de stations suivants:

- . G1, sédiments superficiels; $f < 70 \mu\text{m}$; toutes les stations échantillonnées (lacs Beauchastel, La Bruère et Montbeillard).
- . G2, tranche 0-2 cm des carottes; $f < 850 \mu\text{m}$; stations des lacs Beauchastel, La Bruère et Montbeillard.
- . G3, tranche 8-10 cm des carottes; $f < 850 \mu\text{m}$; stations des lacs Beauchastel, La Bruère et Montbeillard.

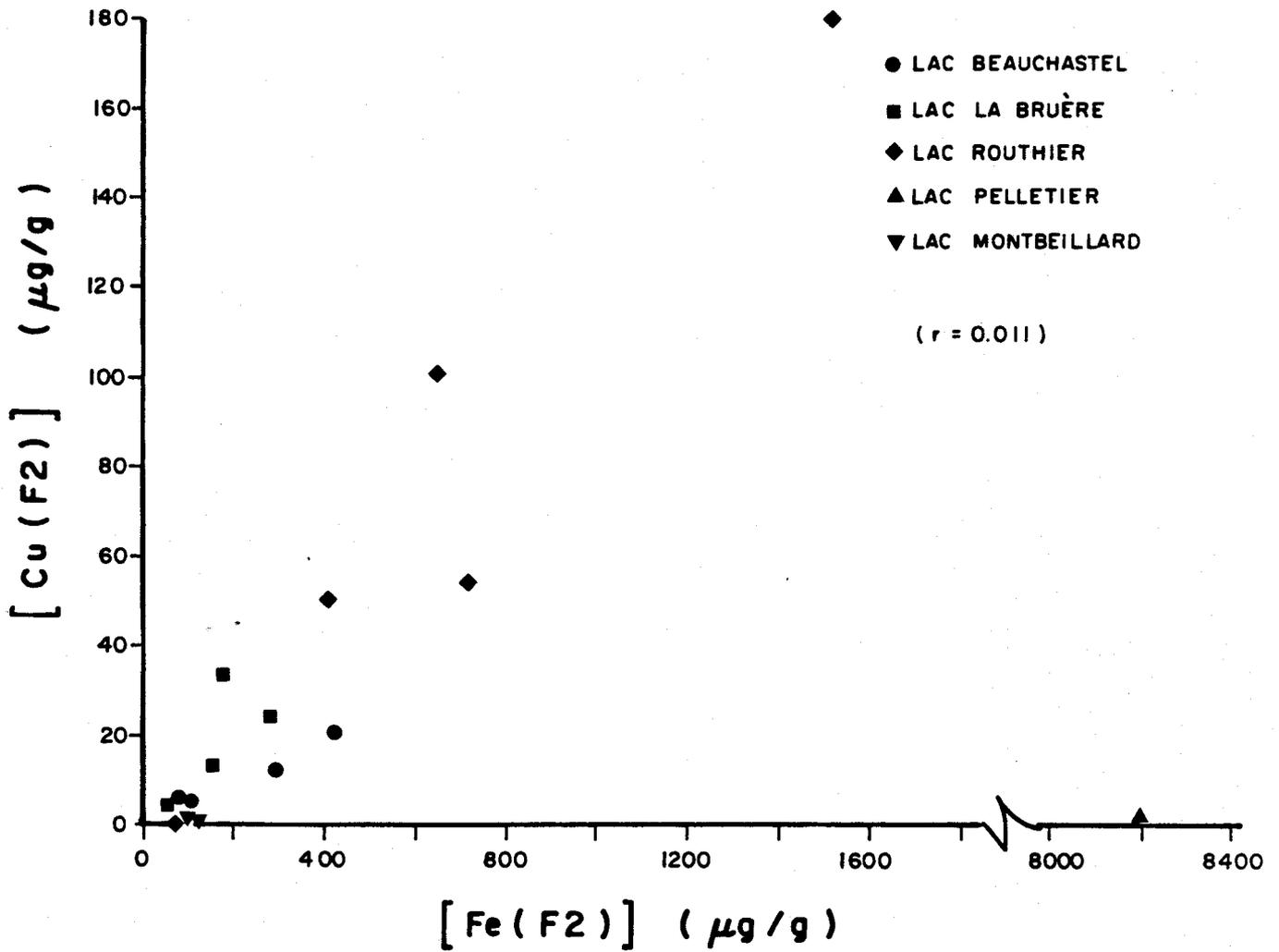


Figure 6.1: Relation entre [Cu(F2)] et [Fe(F2)] dans la strate 0-2 cm des carottes de sédiments.

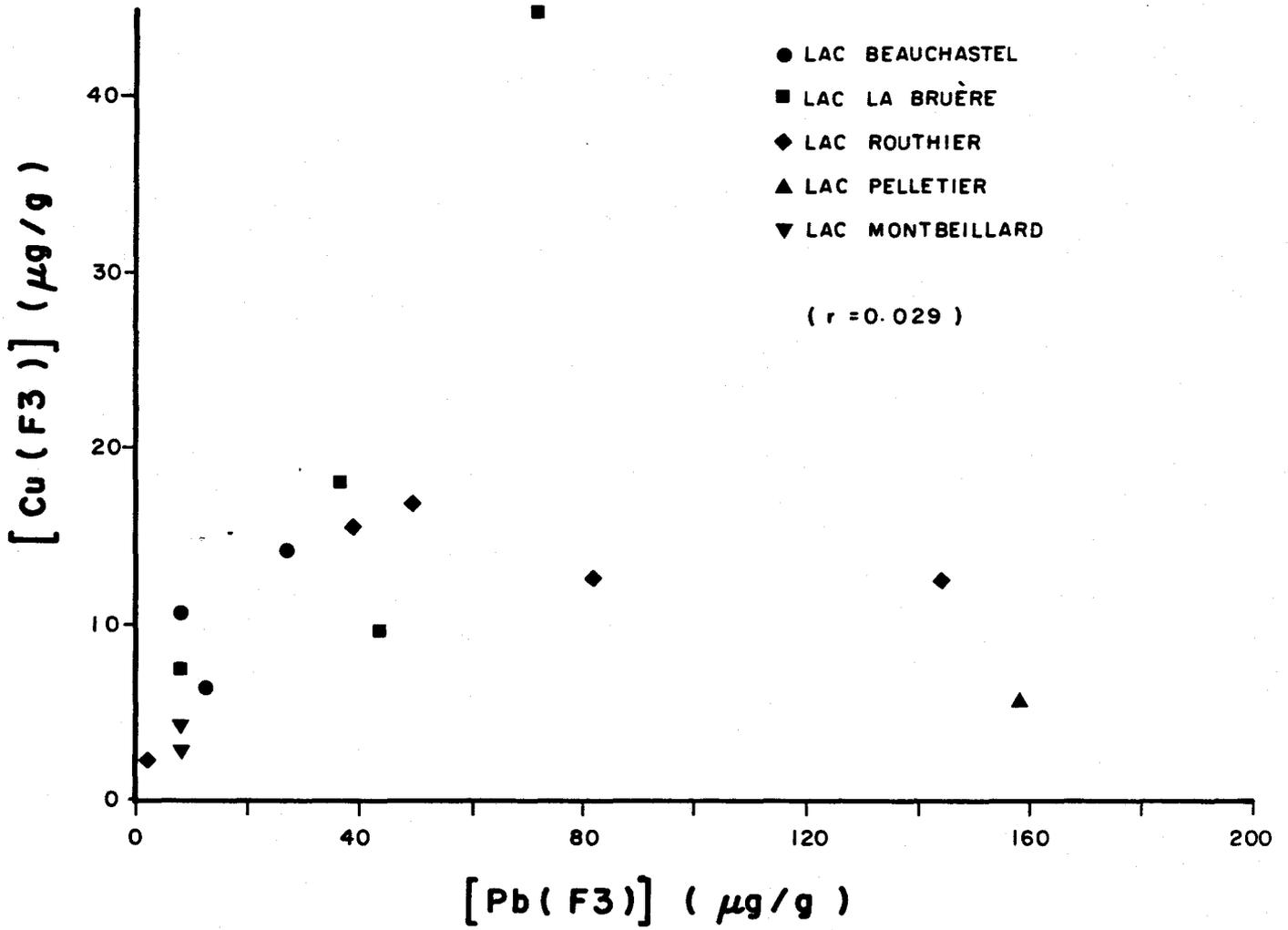


Figure 6.2: Relation entre [Cu(F3)] et [Pb(F3)] dans la strate 0-2 cm des carottes de sédiments.

- . G4, tranche 0-2 cm des carottes; $f < 850 \mu\text{m}$; stations du lac Routhier.
- . G5, tranche 8-10 cm des carottes; $f < 850 \mu\text{m}$; stations du lac Routhier.

Rappelons que la subdivision des stations en cinq groupes devrait avoir pour effet d'améliorer la signification physique des coefficients de corrélation calculés. Il faut cependant les interpréter avec prudence, car toute variation d'une station à l'autre n'est pas enlevée. On discute ci-dessous des associations des métaux avec les sédiments en considérant à tour de rôle chacune des fractions.

6.1.1 Fraction 1

Les métaux traces qu'on mesure dans la fraction 1 correspondent probablement à ceux qui étaient adsorbés électrostatiquement sur les divers constituants des sédiments (argiles, oxydes de fer et de manganèse, matière organique, etc.). Les concentrations de métaux traces qu'on retrouve dans cette fraction sont généralement faibles (Gibbs, 1977; Gupta et Chen, 1975; Brannon et al., 1977; Tessier et al., 1979; 1980; 1982), comme c'est le cas pour plusieurs stations échantillonnées lors de cette étude (voir les Tableaux 5.12 à 5.19 et 5.21 à 5.24); les concentrations sont cependant relativement élevées pour certaines stations du lac Routhier (Cu, Pb, Zn, Fe) et pour la station PE-01 (Fe).

Les coefficients de corrélation entre les paires de métaux Cu, Zn et Fe dans la fraction 1 sont généralement peu élevés (Tableau 6.1), sauf pour le groupe G1. On croit généralement que les métaux mesurés dans F1 sont en équilibre avec l'eau naturelle et que cet équilibre s'établit rapidement. Le fait de trouver peu de corrélations entre les métaux serait alors indicatif de différences dans les proportions relatives des métaux dans l'eau ambiante (en contact avec les sédiments) au moment de l'échantillonnage ou encore de variations d'une station à

Tableau 6.1: Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 1^a.

Groupe ^b		Pb(F1)	Zn(F1)	Fe(F1)
Cu(F1)	G1	^c	0.808	0.848
	G2	(0.039)	<u>(0.482)</u>	<u>(-0.221)</u>
	G3	-	-	-
	G4	(0.818)	(0.839)	0.984
	G5	-	-	-
Pb(F1)	G1	-	-	-
	G2	-	(0.680)	-
	G3	-	-	-
	G4	-	(0.845)	(0.772)
	G5	-	-	-
Zn(F1)	G1	-	-	0.860
	G2	-	-	<u>(0.278)</u>
	G3	-	-	<u>(-0.461)</u>
	G4	-	-	(0.888)
	G5	-	-	<u>0.963</u>

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

^c Nombre de données insuffisant pour calculer r .

l'autre dans les proportions relatives des phases des sédiments qui sont responsables de l'adsorption.

6.1.2 Fraction 2

Certains travaux (Deurer et al., 1978; Forstner et Patchineelam, 1976; Tessier et al., 1982) suggèrent que les métaux traces retrouvés dans cette fraction peuvent être associés à des carbonates (par exemple, co-précipitation avec des carbonates de calcium ou de fer) ou adsorbés spécifiquement (par exemple, sur des oxydes de fer ou de manganèse). Une partie des métaux associée à des sulfures pourrait être libérée dans cette fraction, particulièrement si ces sulfures sont peu cristallisés et finement divisés. Les coefficients de corrélation entre les métaux traces mesurés dans cette fraction et des constituants des sédiments sont généralement peu élevés et ne présentent pas une image claire (Tableau 6.2).

Ainsi, pour les groupes G1 et G2, qui sont constitués des mêmes stations, le cuivre semble associé aux carbonates (voir les valeurs de r pour le couple Cu(F2) - $C_{\text{Inorganique}}$) et le plomb, aux sulfures (voir les valeurs de r pour le couple Pb(F2)-S); le zinc et le fer semblent, pour leur part, adsorbés spécifiquement sur les oxydes de fer si on considère les valeurs de r pour les couples Zn(F2) - Fe(F3) et Fe(F2) - Fe(F3) et si on admet que la concentration de Fe(F3) origine de la dissolution d'oxydes de fer. Pour le groupe de stations G3, la seule corrélation qui ressort est celle entre Fe(F2) - Fe(F3), suggérant que le fer libéré dans la fraction 2 est adsorbé spécifiquement sur les oxydes de fer.

Plusieurs valeurs élevées de r sont observées pour les groupes G4 et G5 qui comprennent les stations du lac Routhier; rappelons que ces groupes ne comprennent que cinq stations, ce qui implique que pour être significativement différentes de zéro, les valeurs de r doivent être très élevées. On n'observe aucune corrélation pour le plomb. Le zinc semble associé aux sulfures. Par ailleurs, le cuivre et le fer

Tableau 6.2: Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 2^a.

	Groupe ^b	Pb(F2)	Zn(F2)	Fe(F2)	Fe(F3)	C _{org.}	C _{inorg.}	S	Al	Si
Cu (F2)	G1	(0.539)	(0.541)	(0.301)	(0.534)	(0.170)	0.629	(0.145)	(0.480)	(-0.464)
	G2	0.606	0.650	(0.458)	0.633	(0.394)	0.631	(0.470)	0.604	-0.620
	G3	- ^c	0.912	(-0.082)	(-0.136)	(-0.223)	(-0.250)	(-0.111)	(-0.012)	(-0.115)
	G4	(0.822)	<u>0.888</u>	0.955	0.942	(0.560)	0.894	0.983	(0.520)	(-0.715)
	G5	(0.737)	0.888	<u>0.998</u>	0.953	(0.125)	(0.496)	<u>(0.743)</u>	(0.395)	(-0.539)
Pb(F2)	G1		(0.407)	(0.021)	(-0.018)	(0.477)	(0.486)	0.592	(0.300)	(-0.360)
	G2		(0.117)	(0.053)	(-0.005)	<u>0.792</u>	(0.488)	<u>0.760</u>	(0.022)	(-0.335)
	G3		-	-	-	-	-	-	-	-
	G4		(0.866)	(0.666)	(0.593)	(0.651)	(0.775)	(0.737)	(0.744)	(-0.757)
	G5		(0.993)	(0.708)	(0.726)	(0.267)	(0.099)	(0.965)	(-0.027)	(-0.949)
Zn (F2)	G1			0.836	0.791	(0.499)	0.628	0.728	(0.139)	(-0.446)
	G2			<u>0.722</u>	<u>0.936</u>	(0.214)	0.668	<u>(0.238)</u>	0.838	(-0.739)
	G3			<u>(0.083)</u>	<u>(-0.091)</u>	(-0.169)	(-0.191)	(-0.172)	<u>(0.073)</u>	(0.066)
	G4			(0.737)	(0.732)	(0.511)	(0.720)	(0.800)	(0.634)	(-0.673)
	G5			(0.872)	0.885	(0.519)	(0.659)	<u>0.960</u>	(0.584)	(-0.682)
Fe(F2)	G1				0.863	(0.132)	(0.327)	(0.457)	(-0.150)	(-0.114)
	G2				<u>0.648</u>	(0.111)	(0.488)	(-0.015)	0.578	(-0.410)
	G3				0.763	(0.023)	(0.209)	(0.009)	0.747	-0.735
	G4				<u>0.989</u>	(0.595)	0.928	0.993	(0.455)	(-0.722)
	G5				<u>0.964</u>	(0.102)	(0.492)	<u>(0.729)</u>	(0.380)	(-0.514)

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

^c Nombre de données insuffisant pour calculer r.

semblent associés, pour les groupes G4 et G5, aux oxydes de fer par adsorption spécifique (voir les valeurs de r pour les couples Cu(F2) - Fe(F3) et Fe(F2) - Fe(F3)); ces deux métaux semblent également associés, pour le groupe G4 uniquement, à des carbonates et à des sulfures. Il est cependant difficile d'expliquer que ces deux métaux soient associés à des sulfures à la surface des sédiments, et à des oxydes de fer en profondeur.

6.1.3 Fraction 3

L'attaque à chaud des sédiments avec la solution d'hydrochlorure d'hydroxylamine réduit des oxydes de fer et de manganèse et libère les métaux qui y étaient associés (Chester et Hughes, 1967; Tessier et al., 1980, 1982); les métaux traces qu'on mesure dans l'extrait sont généralement ceux qui étaient associés à ces oxydes. Par ailleurs, une partie des métaux associés à des sulfures pourrait également être libérée dans cette fraction si on considère le pH relativement bas ($\text{pH} \approx 2$) lors de l'extraction; de plus, l'attaque de certaines argiles ne peut être exclue, même si elle semble généralement peu importante (Tessier et al., 1979, 1982). Finalement, la libération de métaux liés à la matière organique par complexation ne peut être exclue.

Pour les groupes G1 et G2, le zinc semble associé surtout à des oxydes de fer, tel que prévu, et, également à des carbonates (Tableau 6.3). On n'observe aucune corrélation pour le cuivre et le plomb dans G1; par contre, ces deux métaux semblent associés aux oxydes de fer dans G2. Le fer semble en partie associé à des carbonates. Les associations de certains métaux (Pb, Zn, Fe) à des carbonates pourrait être expliquée par une protection de ces carbonates (par une couche d'oxydes de fer ou de manganèse?) qui leur aurait permis de résister jusqu'à l'attaque avec l'agent réducteur. Les corrélations de Cu, Pb, Zn et Fe avec Al observées pour G2 pourraient s'expliquer par une attaque d'aluminosilicates ou encore, par le recouvrement de ces aluminosilicates par des oxydes de fer si la quantité d'oxydes de fer retenue par les sédiments dépendait des quantités d'aluminosilicates. Pour le groupe

Tableau 6.3: Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 3^a.

	Groupe ^b	Pb(F3)	Zn(F3)	Fe(F3)	C _{org.}	C _{inorg.}	S	Al	Si
Cu (F3)	G1	<u>0.910</u>	0.640	(0.357)	(-0.021)	(0.478)	(-0.024)	(0.374)	(-0.273)
	G2	<u>0.882</u>	0.679	0.708	(-0.009)	(0.437)	(0.470)	0.739	-0.582
	G3	- ^c	(0.593)	(-0.373)	(-0.279)	(-0.246)	(-0.024)	(-0.239)	(0.275)
	G4	(0.402)	(0.554)	(0.344)	0.933	(0.667)	(0.396)	0.925	-0.895
	G5	0.983	<u>0.992</u>	0.953	(0.422)	(0.678)	0.914	(0.589)	(-0.694)
Pb (F3)	G1		(0.493)	(0.103)	(0.089)	(0.501)	(0.008)	(0.439)	(-0.315)
	G2		<u>0.757</u>	<u>0.736</u>	(0.285)	(0.631)	(0.287)	<u>0.752</u>	<u>-0.740</u>
	G3		-	-	-	-	-	-	-
	G4		(0.810)	0.931	(0.549)	(0.872)	0.970	(0.533)	(-0.710)
	G5		<u>0.998</u>	(0.874)	(0.261)	(0.533)	(0.940)	(0.391)	(-0.886)
Zn (F3)	G1			0.791	(0.500)	0.815	0.580	(0.454)	-0.624
	G2			<u>0.988</u>	(0.148)	<u>0.665</u>	(0.127)	0.918	-0.783
	G3			(0.190)	(0.238)	(0.159)	(-0.160)	(0.282)	(-0.193)
	G4			(0.580)	(0.540)	(0.629)	(0.658)	(0.718)	(-0.678)
	G5			0.923	(0.443)	(0.635)	0.936	(0.545)	(-0.647)
Fe (F3)	G1				(0.222)	0.594	(0.352)	(0.209)	(-0.422)
	G2				(0.112)	0.667	(0.103)	0.939	-0.798
	G3				(0.384)	(0.418)	(0.130)	<u>0.937</u>	<u>-0.957</u>
	G4				(0.498)	(0.869)	0.980	(0.362)	(-0.640)
	G5				(0.272)	(0.665)	(0.806)	(0.539)	(-0.619)

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

^c Nombre de données insuffisant pour calculer r.

G3, on n'observe aucune corrélation pour le cuivre, le plomb et le zinc.

Pour les groupes G4 et G5, le cuivre en surface (G4) semble lié au carbone organique alors qu'en profondeur (G5), il semble plutôt lié aux oxydes de fer et à des sulfures, tout comme le zinc. On ne trouve aucune corrélation pour le zinc dans le groupe G4 et le plomb dans le groupe G5; par contre, le plomb dans G4 semble associé à des oxydes de fer et à des sulfures.

6.1.4 Fraction 4

Les concentrations de métaux traces mesurées dans l'extrait 4 proviennent généralement de l'oxydation de la matière organique et des sulfures qui ont résisté aux attaques précédentes. Les réactifs utilisés attaquent également en partie des aluminosilicates tel la chlorite des micas et des smectites.

Pour les groupes de stations G1 et G2, le cuivre apparaît, tel que prévu, associé avec la matière organique et des sulfures et, également, avec des carbonates (Tableau 6.4). On n'observe aucune corrélation pour le plomb dans le groupe G2; par contre, il semble associé à des carbonates et des aluminosilicates pour le groupe G1. Le zinc semble associé avec la matière organique (G1), des carbonates (G1 et G2), des sulfures (G1) et des aluminosilicates (G1 et G2). Pour sa part, le fer semble associé, dans le groupe G2, à la matière organique, à des carbonates et des sulfures. Pour le groupe G3, on n'observe aucune corrélation pour le cuivre et le plomb; par contre, le zinc et le fer semblent associés à la matière organique et à des carbonates. Il semble cependant improbable que des carbonates aient résisté aux attaques précédentes, ce qui fait que ces corrélations n'ont probablement pas de signification physique.

On n'observe aucune corrélation pour le cuivre et le plomb dans le groupe G5; par contre, pour G4, ces deux métaux semblent associés à des

Tableau 6.4: Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 4^a.

	Groupe ^b	Pb(F4)	Zn(F4)	Fe(F4)	C _{org.}	C _{inorg.}	S	Al	Si
Cu (F 4)	G1	(0.461)	0.810	(0.014)	0.640	0.684	0.786	(0.288)	(-0.550)
	G2	(0.674)	0.607	0.883	0.835	0.681	0.824	(0.232)	(-0.557)
	G3	- ^c	(-0.202)	(-0.118)	(-0.126)	(-0.051)	(0.070)	(-0.211)	(0.194)
	G4	0.991	(0.618)	(0.855)	(0.512)	(0.864)	0.979	(0.478)	(-0.676)
	G5	-	0.949	(0.698)	(0.121)	(0.490)	(0.741)	(0.389)	(-0.534)
Pb (F 4)	G1		0.718	(0.044)	(0.106)	0.687	(-0.024)	0.639	(-0.301)
	G2		(0.672)	(0.463)	(0.335)	(0.510)	(0.471)	(0.211)	(-0.716)
	G3		-	-	-	-	-	-	-
	G4		(0.223)	(0.856)	(-0.327)	(0.862)	0.983	(-0.642)	(-0.659)
	G5		-	-	-	-	-	-	-
Zn (F 4)	G1			(0.002)	0.773	0.907	0.699	0.708	-0.787
	G2			0.705	(0.410)	0.820	(0.368)	0.863	-0.875
	G3			0.705	0.805	0.775	(0.129)	(0.628)	-0.653
	G4			(0.589)	(0.597)	(0.551)	(0.506)	(0.804)	(-0.696)
	G5			0.886	(0.384)	(0.611)	0.909	(0.515)	(-0.625)
Fe (F 4)	G1				(-0.210)	(-0.018)	(-0.102)	(0.226)	(-0.064)
	G2				0.889	0.833	0.812	(0.361)	-0.708
	G3				0.809	0.840	(0.623)	(0.503)	(-0.597)
	G4				(0.864)	0.998	0.907	(0.764)	0.935
	G5				(0.737)	(0.734)	0.996	(0.671)	(-0.706)

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

^c Nombre de données insuffisant pour calculer r.

sulfures. Le zinc semble également associé à des sulfures pour le groupe G5. Enfin, le fer semble aussi associé à des sulfures (G4 et G5) et à des carbonates (G4).

6.1.5 Fraction 5

Les métaux traces retrouvés dans cette fraction proviennent généralement d'aluminosilicates, de sulfures ou d'oxydes de fer et de manganèse résistants, ainsi que la matière organique réfractaire (Tessier et al., 1979; 1982). Le Tableau 6.5 montre peu de corrélations avec le soufre, suggérant que les métaux traces dans cette fraction sont peu associés à des sulfures. Les nombreuses corrélations négatives avec le silicium indiquent une dilution des minéraux contenant des métaux traces avec des oxydes de silice (par exemple du quartz). Il existe quelques corrélations entre les métaux traces et le carbone inorganique; il est cependant difficile d'imaginer que des carbonates aient pu résister aux attaques précédentes, ce qui fait que ces corrélations n'ont probablement pas de signification physique.

Les valeurs de r élevées entre Fe(F5) et Al et faibles entre Fe(F5) et S suggèrent que le fer provient surtout de la dissolution d'aluminosilicates. Les corrélations qu'on observe entre d'une part le cuivre, le plomb, le zinc et, d'autre part le fer peuvent alors être interprétés par une origine commune de tous ces métaux, qui serait les aluminosilicates; ceci est confirmé par les valeurs élevées de r qu'on observe pour le cuivre, le plomb et le zinc avec l'aluminium.

6.2 Répartition des métaux entre les différentes fractions

Lorsqu'un métal est introduit dans le milieu aquatique en solution ou sous forme particulaire, il tend à se répartir entre l'eau et les diverses phases géochimiques. La répartition est fonction du type de métal et de la forme sous laquelle il existe en solution, des concentrations des phases géochimiques présentes et de conditions environnementales de l'eau ambiante. Oakley et al. (1981) ont développé un

Tableau 6.5: Matrice de corrélations pour les métaux traces mesurés dans la fraction 5^a.

	Groupe ^b	Pb(F5)	Zn(F5)	Fe(F5)	C _{org.}	C _{inorg.}	S	Al	Si
Cu (F5)	G1	<u>0.965</u>	<u>0.930</u>	<u>0.736</u>	0.625	<u>0.900</u>	0.573	<u>0.683</u>	<u>-0.771</u>
	G2	<u>0.921</u>	<u>0.953</u>	<u>0.719</u>	(0.461)	<u>0.816</u>	(0.435)	<u>0.817</u>	<u>-0.855</u>
	G3	(0.413)	<u>0.878</u>	<u>0.878</u>	(0.270)	(0.242)	(-0.002)	<u>0.884</u>	<u>-0.850</u>
	G4	<u>0.939</u>	<u>0.926</u>	<u>0.975</u>	(0.868)	<u>0.951</u>	(0.867)	<u>0.843</u>	<u>-0.953</u>
	G5	(0.868)	<u>0.984</u>	(0.676)	(0.366)	(0.692)	(0.868)	(0.602)	(-0.709)
Pb(F5)	G1		<u>0.905</u>	<u>0.700</u>	0.642	<u>0.876</u>	0.569	<u>0.628</u>	<u>-0.750</u>
	G2		<u>0.848</u>	<u>0.625</u>	(0.527)	<u>0.811</u>	(0.488)	<u>0.725</u>	<u>-0.763</u>
	G3		(0.101)	(0.018)	(0.266)	(0.187)	(-0.269)	(0.000)	(0.069)
	G4		(0.773)	(0.848)	(0.690)	<u>0.955</u>	<u>0.985</u>	(0.611)	(-0.817)
	G5		(0.859)	(0.437)	(-0.065)	(0.457)	(0.508)	(0.370)	(-0.514)
Zn(F5)	G1			<u>0.876</u>	0.619	<u>0.922</u>	(0.454)	<u>0.875</u>	<u>-0.837</u>
	G2			<u>0.867</u>	(0.347)	<u>0.738</u>	(0.253)	<u>0.895</u>	<u>-0.902</u>
	G3			<u>0.961</u>	(0.426)	(0.439)	(0.151)	<u>0.961</u>	<u>-0.953</u>
	G4			<u>0.929</u>	(0.825)	(0.767)	(0.655)	<u>0.904</u>	<u>-0.894</u>
	G5			(0.776)	(0.444)	(0.794)	(0.858)	(0.720)	(-0.810)
Fe(F5)	G1				<u>0.771</u>	<u>0.876</u>	0.600	<u>0.853</u>	<u>-0.876</u>
	G2				(0.218)	<u>0.607</u>	(0.138)	<u>0.844</u>	<u>-0.907</u>
	G3				(0.275)	(0.301)	(0.135)	<u>0.990</u>	<u>-0.979</u>
	G4				0.950	<u>0.918</u>	(0.753)	<u>0.933</u>	<u>-0.993</u>
	G5				(0.827)	<u>0.948</u>	(0.768)	<u>0.980</u>	<u>-0.995</u>

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

modèle théorique pour calculer la répartition d'un métal entre différentes phases géochimiques. Ce modèle est basé sur des constantes d'équilibre conditionnelles pour l'adsorption; la réaction générale suivante peut être écrite pour l'équilibre entre un métal, M, et une phase solide:



La constante K_{AD} s'exprime:

$$K_{AD} = \frac{[MS]}{[M_T] \{S_T\}} \quad (6.2)$$

où $[M_T]$ est la concentration totale en solution du métal M, $\{S_T\}$ est la concentration totale de la phase solide, $[MS]$ est la concentration du métal associé au solide, et K_{AD} est la constante d'équilibre conditionnelle pour l'adsorption. Ces auteurs ont déterminé les valeurs de K_{AD} pour l'adsorption de Cu et Cd sur les quatre phases géochimiques suivantes: bentonite, oxydes de fer et de manganèse amorphes, acides humiques. Par ailleurs, Oakley et al. (1980) ont déterminé que la vitesse de répartition d'un métal entre des phases géochimiques (acides humiques, argiles, sulfures de fer) était relativement rapide; l'équilibre était établi à l'intérieur de 2-5 jours. De plus, la répartition du métal à l'équilibre était indépendante de la forme sous laquelle le métal était introduit (associé aux acides humiques, aux argiles ou aux sulfures de fer).

L'équation (6.2) s'écrit:

$$[MS] = K_{AD} [M_T] \{S_T\} \quad (6.3)$$

La concentration totale $[M_{ST}]$ du métal (en solution et associé au solide) s'écrit:

$$[M_{ST}] = [M_T] + K_{AD} [M_T] \{S_T\} \quad (6.4)$$

Si on généralise pour k solides différents:

$$[M_{ST}] = [M_T] \left(1 + \sum^k K_{AD}(k) \{S_T(k)\} \right) \quad (6.5)$$

La fraction du métal associé à une phase solide $S(1)$ particulière s'écrit donc:

$$\frac{[MS(1)]}{[M_{ST}]} = \frac{K_{AD}(1) \{S_T(1)\}}{1 + \sum^k K_{AD}(k) \{S_T(k)\}} \quad (6.6)$$

Si on fait l'hypothèse que les métaux extraits dans les fractions F1 à F5, c'est-à-dire $M(F1) \dots M(F5)$ étaient associés à des phases solides particulières $S(1)$ à $S(5)$, l'équation (6.6) peut s'écrire:

$$\frac{[M(F1)]}{[M_{ST}]} = \frac{K_{AD}(1) \{S_T(1)\}}{1 + \sum^k K_{AD}(k) \{S_T(k)\}} \quad (6.7)$$

$$\frac{[M(F5)]}{[M_{ST}]} = \frac{K_{AD}(5) \{S_T(5)\}}{1 + \sum^k K_{AD}(k) \{S_T(k)\}} \quad (6.8)$$

En divisant l'équation (6.7) par la relation (6.8), on obtient:

$$[M(F1)] = \frac{K_{AD}(1)}{K_{AD}(5)} \cdot \frac{\{S_T(1)\}}{\{S_T(5)\}} \cdot [M(F5)] \quad (6.9)$$

L'équation (6.9) indique qu'on devrait obtenir un bon coefficient de corrélation entre $[M(F1)]$ et $[M(F5)]$ si: i) le modèle est valable; ii) le rapport $K_{AD}(1)\{S_T(1)\}/K_{AD}(5)\{S_T(5)\}$ est le même pour toutes les stations. Le même raisonnement peut être suivi pour toutes les combinaisons des fractions F1 à F5.

Dans les Tableaux 6.6 à 6.9 sont présentées les matrices de corrélations entre les fractions pour le cuivre, le plomb, le zinc et le fer. Ces tableaux ne montrent aucune corrélation de Cu(F1) et Pb(F1) et que peu de corrélations de Zn(F1) et Fe(F1) avec ces mêmes métaux dans les autres fractions. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette situation. Tout d'abord, mentionnons que, contrairement aux autres fractions, on ne peut parler d'une phase solide unique pour la fraction 1; plusieurs phases solides sont chargées et peuvent donc adsorber électrostatiquement M(F1), ce qui suggère que $\{S_T(1)\}$ et $K_{AD}(1)$ peuvent varier beaucoup d'une station à l'autre. D'autre part, des phénomènes cinétiques peuvent expliquer partiellement cette situation: d'une part, M(F1) est sans doute rapidement en équilibre avec l'eau ambiante (en contact avec les sédiments) et est donc soumis aux conditions changeantes de cette dernière, alors que, d'autre part, M(F2), M(F3), M(F4) et M(F5) n'atteignent un équilibre que beaucoup plus lentement (2-5 jours?) et représentent une intégration dans le temps.

On observe de nombreuses corrélations entre d'une part Cu(F2) et d'autre part Cu(F3), Cu(F4) et Cu(F5); ce n'est pas le cas de Pb(F2), qui n'est corrélié qu'avec Pb(F3) et Pb(F5) pour le groupe G1. Par ailleurs, Zn(F2) est généralement corrélié avec Zn(F3), moins souvent avec Zn(F4) et peu souvent avec Zn(F5). Pour sa part, Fe(F2) est généralement corrélié avec Fe(F3) et peu souvent avec Fe(F4) et Fe(F5). De façon générale, on observe que M(F2) est fortement corrélié à M(F3). Cette situation n'est pas surprenante si on suppose que M(F2) provient surtout de l'adsorption spécifique de M sur des oxydes de fer, et que M(F3) était occlus dans ces mêmes oxydes. On a donc une situation où $\{S_T(2)\} = \{S_T(3)\}$.

Le zinc dans la fraction 3 est généralement corrélié avec Zn(F4) et Zn(F5), ce qui est vrai également pour le plomb. Au contraire, Cu(F3) et Fe(F3) montrent moins de corrélations avec ces mêmes métaux dans les fractions 4 et 5. On peut expliquer les cas où on n'observe pas de corrélations par des variations importantes du rapport $K_{AD}(3)\{S_T(3)\}/K_{AD}(4)\{S_T(4)\}$ entre les stations; $S_T(3)$ représente ici

Tableau 6.6: Matrice de corrélations pour le cuivre dans les différentes fractions^a.

	Groupe ^b	Cu (F 2)	Cu (F 3)	Cu (F 4)	Cu (F 5)
Cu (F 1)	G1	(0.449)	(0.132)	(0.387)	(0.295)
	G2	(0.098)	(-0.183)	(0.288)	(-0.195)
	G3	- ^c	-	-	-
	G4	(0.913)	(-0.718)	(0.899)	(0.914)
	G5	-	-	-	-
Cu (F 2)	G1		<u>0.884</u>	<u>0.638</u>	<u>0.834</u>
	G2		<u>0.791</u>	<u>0.740</u>	<u>0.900</u>
	G3		<u>0.781</u>	(0.532)	(0.202)
	G4		(0.386)	<u>0.997</u>	<u>0.878</u>
	G5		<u>0.950</u>	<u>1.000</u>	<u>0.967</u>
Cu (F 3)	G1			(0.522)	<u>0.722</u>
	G2			(0.291)	<u>0.830</u>
	G3			<u>0.865</u>	(0.007)
	G4			(0.355)	(0.780)
	G5			<u>0.948</u>	<u>0.991</u>
Cu (F 4)	G1				<u>0.844</u>
	G2				<u>0.678</u>
	G3				(0.132)
	G4				(0.857)
	G5				<u>0.965</u>

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

^c Nombre de données insuffisant pour calculer r .

Tableau 6.7: Matrice de corrélations pour le plomb dans les différentes fractions^a.

Groupe ^b		Pb(F 2)	Pb(F 3)	Pb(F 4)	Pb(F 5)
Pb(F 1)	G1	-	-	-	-
	G2	0.960	(0.864)	-	(0.925)
	G3	- ^c	-	-	-
	G4	(0.829)	(0.807)	(0.770)	(0.801)
	G5	-	-	-	-
Pb(F 2)	G1		0.698	(0.534)	0.780
	G2		(0.456)	(0.557)	(0.477)
	G3		-	-	-
	G4		(0.821)	(0.539)	(0.778)
	G5		(0.987)	-	(0.352)
Pb(F 3)	G1			0.806	0.769
	G2			<u>0.883</u>	<u>0.906</u>
	G3			-	-
	G4			0.982	0.971
	G5			-	(0.625)
Pb(F 4)	G1				0.860
	G2				<u>0.886</u>
	G3				-
	G4				0.994
	G5				-

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

^c Nombre de données insuffisant pour calculer r.

Tableau 6.8: Matrice de corrélations pour le zinc dans les différentes fractions^a.

	Groupe ^b	Zn (F2)	Zn (F3)	Zn (F4)	Zn (F5)
Zn (F1)	G1	<u>0.809</u>	0.719	(0.429)	(0.282)
	G2	<u>0.665</u>	(0.544)	(0.514)	(0.344)
	G3	(0.727)	(0.296)	(0.041)	(-0.114)
	G4	0.920	(0.800)	(0.647)	(0.672)
	G5	<u>0.966</u>	0.944	0.920	(0.799)
Zn (F2)	G1		<u>0.894</u>	<u>0.687</u>	(0.450)
	G2		<u>0.968</u>	<u>0.877</u>	0.777
	G3		<u>0.810</u>	(0.185)	(0.057)
	G4		<u>0.970</u>	0.887	(0.836)
	G5		<u>0.995</u>	<u>0.985</u>	0.911
Zn (F3)	G1			0.836	0.743
	G2			<u>0.929</u>	<u>0.876</u>
	G3			(0.543)	(0.336)
	G4			<u>0.971</u>	0.892
	G5			<u>0.997</u>	0.926
Zn (F4)	G1				0.882
	G2				<u>0.938</u>
	G3				<u>0.751</u>
	G4				0.920
	G5				0.932

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

Tableau 6.9: Matrice de corrélations pour le fer dans les différentes fractions^a.

	Groupe ^b	Fe(F2)	Fe(F3)	Fe(F4)	Fe(F5)
Fe(F1)	G1	<u>0.779</u>	0.577	(-0.009)	(-0.019)
	G2	(0.228)	(0.734)	(0.303)	(0.594)
	G3	(0.148)	(0.437)	(0.228)	(0.360)
	G4	<u>0.997</u>	<u>0.994</u>	(0.920)	(0.919)
	G5	<u>0.892</u>	<u>0.906</u>	0.934	(0.610)
Fe(F2)	G1		<u>0.863</u>	(0.026)	(0.108)
	G2		<u>0.648</u>	(0.333)	(0.311)
	G3		<u>0.763</u>	(0.260)	<u>0.793</u>
	G4		<u>0.989</u>	0.906	(0.744)
	G5		<u>0.964</u>	(0.685)	(0.464)
Fe(F3)	G1			(0.126)	(0.400)
	G2			(0.468)	<u>0.800</u>
	G3			(0.534)	<u>0.967</u>
	G4			(0.840)	(0.669)
	G5			(0.761)	(0.580)
Fe(F4)	G1				(0.005)
	G2				(0.415)
	G3				(0.480)
	G4				0.938
	G5				(0.733)

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).

^b Voir le texte, section 6.1 pour la définition des groupes.

probablement les oxydes de fer et de manganèse alors que $S_T(4)$ représente surtout la matière organique et les sulfures. Dans le cas de la matière organique, il faut prendre en compte les variations de concentration et de nature (p.e. débris végétaux ou animaux, acides humiques, etc.).

On observe généralement des corrélations entre Pb(F4) et Pb(F5), de même qu'entre Zn(F4) et Zn(F5). Les corrélations entre Cu(F4) et Cu(F5) sont cependant moins nombreuses. Par ailleurs, Fe(F4) et Fe(F5) sont peu corrélés. Encore ici, des variations de K_{AD} et de $\{S_T\}$ peuvent être invoquées pour expliquer des absences de corrélations. Par ailleurs, il est improbable que les métaux contenus dans la fraction 5 soient en équilibre avec ceux contenus dans les autres fractions.

Les corrélations, pour un métal donné, entre les différentes fractions ont été interprétées ici en se basant sur un modèle semblable à celui développé par Oakley et al. (1981) pour l'adsorption de métaux tracés sur différents substrats solides. Mentionnons cependant qu'on aurait pu les expliquer par un manque de sélectivité des réactifs utilisés pour le lessivage des différentes fractions. La vérification rigoureuse de l'applicabilité d'un tel modèle, et la détermination des valeurs de K_{AD} dans le milieu naturel s'avèrerait sûrement un pas très important pour la modélisation du comportement des métaux traces dans le milieu aquatique. Le fait qu'on trouve souvent des droites passant par l'origine (en accord avec l'équation (6.9)) lorsqu'on trace la concentration d'un métal dans une fraction en fonction de la concentration de ce même métal dans une autre fraction suggère que le modèle utilisé présente un certain intérêt (voir les Figures 6.3 et 6.4).

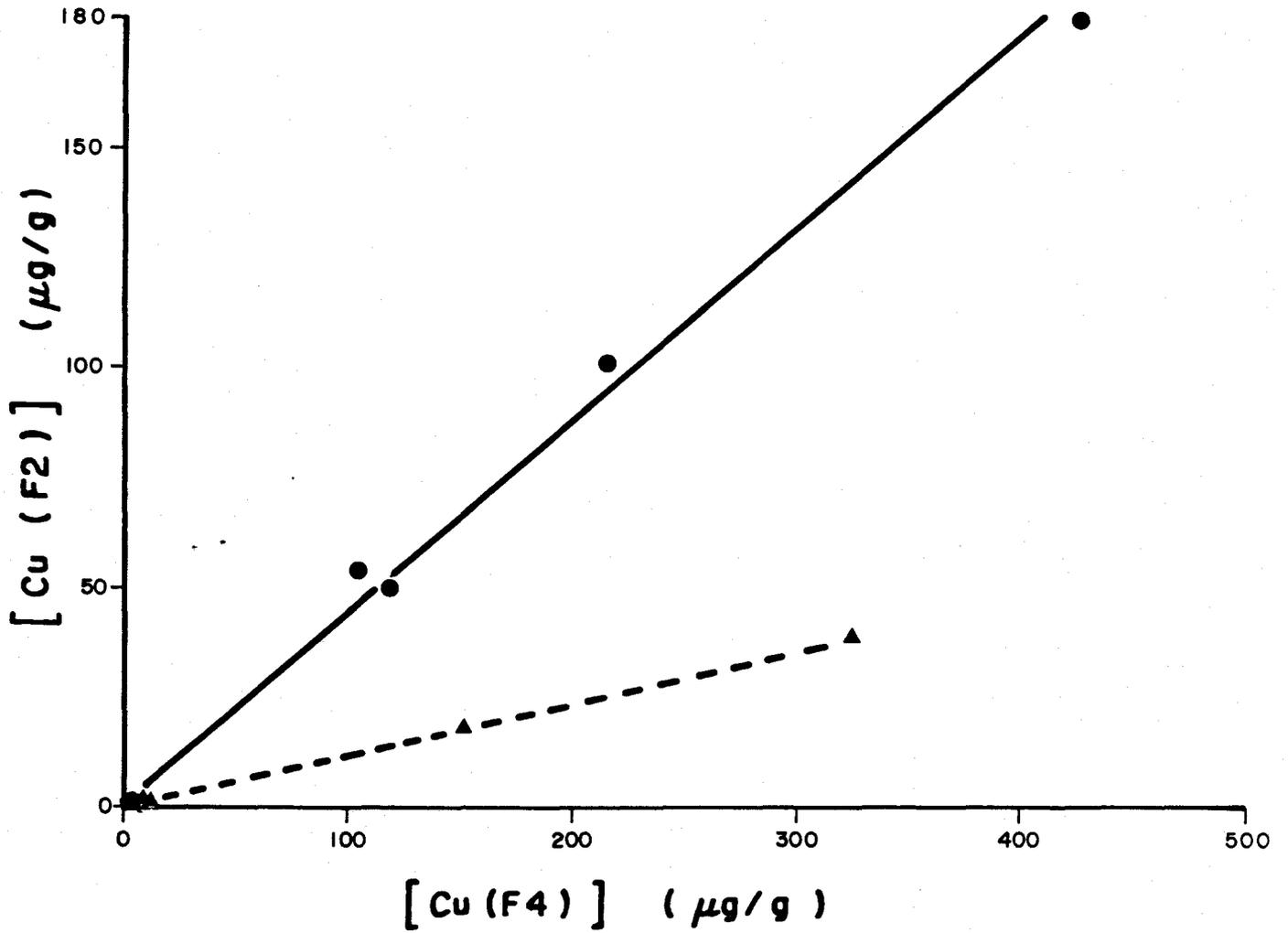


Figure 6.3: Concentrations de cuivre dans la fraction 2 en fonction de la concentration de cuivre dans la fraction 4 pour les groupes de stations G5 (—) et G6 (---).

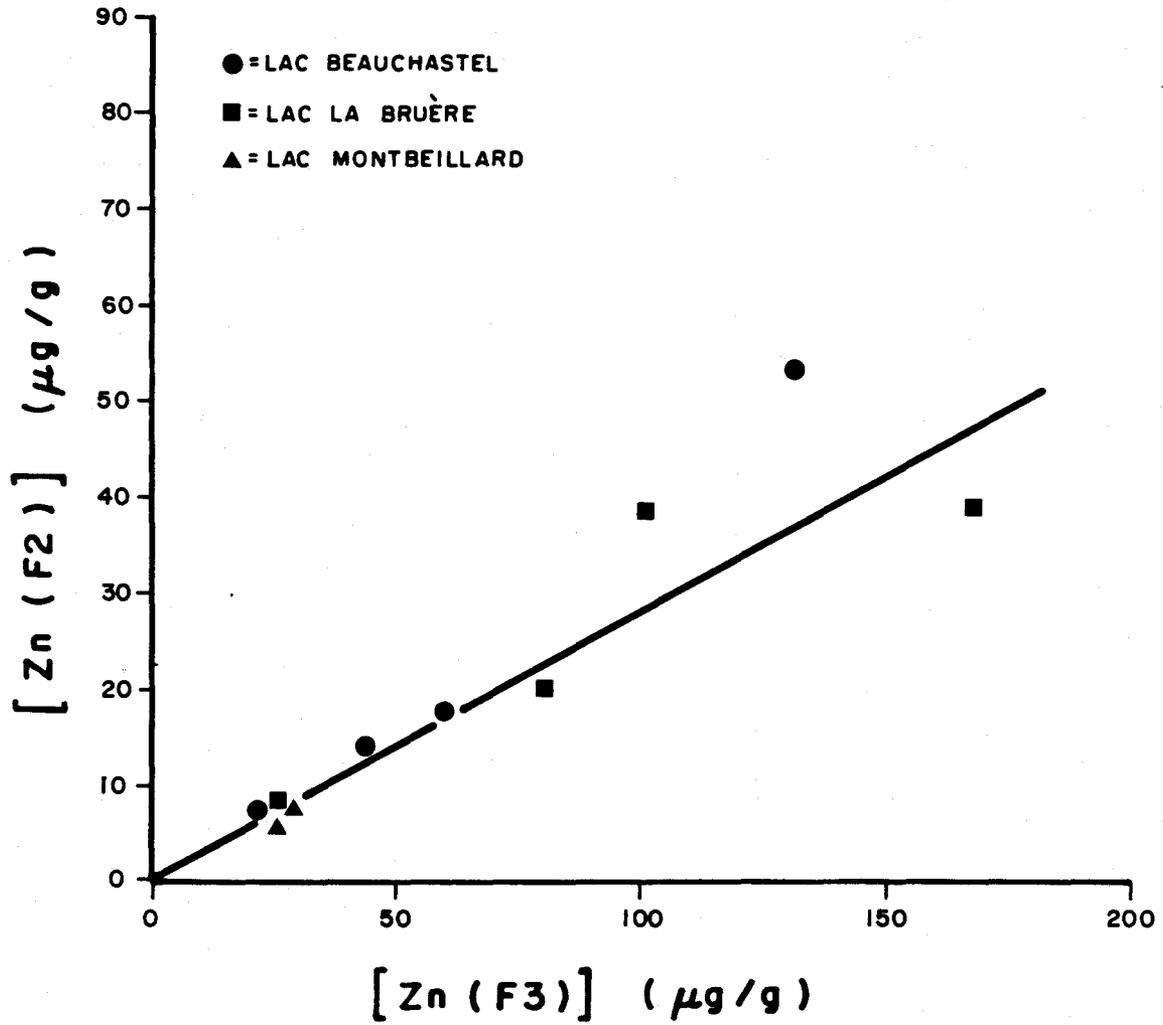


Figure 6.4: Concentrations de zinc dans la fraction 2 en fonction de la concentration de zinc dans la fraction 3 pour le groupe de stations G2.

6.3 Métaux traces dans les bivalves

6.3.1 Variabilité spatiale des concentrations de métaux dans les bivalves

Pour un organe et un métal donnés, on veut déterminer si les valeurs moyennes des concentrations du métal obtenues à chaque station présentent des différences significatives. L'analyse de variance à une modalité, qui permet d'effectuer la comparaison simultanée de plusieurs moyennes, a été appliquée pour chacune des espèces de bivalves dans le cas de chaque série relative à un métal dans un organe donné. Lorsque l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée, il est possible de comparer les moyennes entre elles à l'aide de la méthode de comparaisons multiples de Scheffé ($\alpha = 0.05$). Les Tableaux 6.10 et 6.11 présentent le classement, par ordre croissant, des valeurs moyennes des concentrations de métaux respectivement pour Elliptio complanata et Anodonta grandis; les sous-groupes de moyennes non significativement différentes au niveau $\alpha = 0.05$ sont identifiés. Si on considère le cuivre dans le Tableau 6.10:

- on obtient pour le pied CBAEDGF, ce qui signifie que pour les sept stations représentées par ces lettres, les moyennes (des concentrations de cuivre dans le pied) considérées simultanément ne sont pas significativement différentes.
- on obtient pour les branchies CBAEDG-GF, ce qui signifie qu'on a deux sous-groupes homogènes de concentrations de cuivre dans cet organe. La méthode de Scheffé indique que les moyennes aux stations représentées par les lettres C, B, A, E, D et G ne sont pas significativement différentes entre elles, ce qui est vrai également pour le deuxième sous-groupe (les stations représentées par G et F ne sont pas significativement différentes entre elles). Par contre, la station BR-01 (F) est significativement différente de toutes les autres, sauf BR-06 (G).

Tableau 6.10: Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans chaque organe de Elliptio complanata: classement par ordre croissant des stations^a selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque organe et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$).

Organe	Cu	Pb ^c	Zn	Fe	Mn
Pied	CBAEDGF		ABDF CEG	AGBDF CE	GCDF E
Muscles	CABDEG-EGF		BADFCG-FCGE	ABDGF -BDGF EC	AF DGCE
M. visc.	ABDECGF	CBAGF	BADCFGE	GFADBCE	GF ADEC
Foie	CBADEFG	FB	DBA-BACF -CFGE	ABFGDCE	AGF CDE
Branchies	CBAEDG-GF	CBEA-EAGF	ABCDGF -BCDGF E	ABDGF C-BDGF CE	AGCF ED
Manteau	BCAEDGF	DABCEF -ABCEFG	BADCFGE	FADGB-CE	FDGAC-CE
Organisme ^b	BACDE-CDEG-GF		ABCDFG-CDFGE	AFDBG-CE	DGF C-GF CE

- ^a Les stations sont A: MO-01; B: MO-02; C: MO-03; D: BE-03; E: BE-16; F: BR-01; G: BR-06.
- ^b Concentration moyenne dans les chairs, telles que reconstituées avec l'équation (5.1).
- ^c Plusieurs stations présentent des concentrations inférieures à la limite de sensibilité et ne sont donc pas prises en compte.

Tableau 6.11: Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans chaque organe de *Anodonta grandis*: classement par ordre croissant des stations^a selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque organe et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$).

Organe	Cu	Pb ^c	Zn	Fe	Mn
Pied	DLCAJEKGRHI	EB	CLJGKA EFDHBI	KGCRAF HDEJLI	IAJKDF ELHB
Muscles	GCDAFEJKLBIH	FEBD	CKGIJLHF BAE- KGIJLHFRAED	LKAEGCDF JIBH	JKFEDAIBLH
Masse viscérale	CADGEF BJILKH	FLEAIBKH	CGALJRIKDE- GALJRIKDEF -KDEFH	CIJKALGEHB-EHRF - HBF D	ICJAEL KGHF D- CJAEL KGHF DB
Foie	CDAGBEHLF -DAGBEHLF J- BEHLFJI- IK	GABFDEKH	CGDBJAL ? -GDBJALIEKH- BJALIEKHF	KGALJICBDEH- GALJICBDEHF	JIKLADEBFH
Branchies	DBAEHCFGLI-HCFGLIJK	DFAEGBCHIKL-EGBCHIKLJ	CBADKIGJE-BADKIGJEL- IGJELF -FH	KCJDGABIEL - JDGABIELH-ELHF	DKICABJLEGHF
Manteau	DGAEBFC KJHLI	FRELADIKH	GCDBKJAEILF -ILFH	JGCIKBLDEF -FH	GDKCEAJBFLIH
Oeufs	GBAFDL -BAFDLJ-LJK	FGBDAJLK	DGBAFJLK	GDAJLBF K	DGABFLJK
Organisme ^b	GDABCFEHLJI-CFEHLJIK	-	GCRDAKJIFLE-H	GCJKADRILEF -KADRILEFH	DKAFBJILE-KAFBJILEH

^a Les stations sont A: MO-01; B: MO-02; C: MO-03; D: BE-01; E: BE-03; F: BE-11; G: BE-15; H: BE-16; I: BR-01; J: BR-04; K: BR-06; L: BR-11.

^b Concentration moyenne dans les chairs, telles que reconstituées avec l'équation (5.1).

^c Plusieurs stations présentent des concentrations inférieures à la limite de sensibilité et ne sont donc pas prises en compte.

Le Tableau 6.10 indique que les concentrations de cuivre dans le pied, la masse viscérale, le foie et le manteau de Elliptio complanata ne montrent pas de différences significatives entre stations. Par contre, pour les muscles, les branchies et surtout pour l'organisme reconstitué, la comparaison multiple fait ressortir des différences entre des sous-groupes de stations; les valeurs élevées à la station BR-01 sont ainsi mises en évidence. Pour le plomb dans la masse viscérale et le foie, aucune différence significative ne ressort, alors que pour ce métal dans les branchies et le manteau, la comparaison des moyennes sépare deux sous-groupes de stations et fait ressortir les valeurs élevées aux stations BR-01 (branchies) et BR-06 (branchies et manteau). Les concentrations de zinc dans le pied, la masse viscérale et le manteau ne sont pas significativement différentes aux diverses stations; par contre, elles présentent deux sous-groupes en ce qui concerne les muscles, les branchies et l'organisme reconstitué, et trois sous-groupes en ce qui concerne le foie. La comparaison multiple met notamment en évidence les valeurs élevées à la station BE-16.

Pour le fer dans le pied, la masse viscérale et le foie de Elliptio complanata, l'application de la méthode de Scheffé ne révèle aucune différence significative entre stations, alors qu'elle montre deux sous-groupes de stations pour les muscles, les branchies, le manteau et l'organisme reconstitué; les valeurs élevées aux stations MO-03 et BE-16 sont notamment distinguées des autres. Finalement, en ce qui concerne le manganèse, la comparaison ne met en évidence des différences significatives entre stations que pour le manteau et l'organisme reconstitué; dans les deux cas, les valeurs élevées à la station BE-16 se distinguent des autres.

Pour le cuivre dans le pied, les muscles, la masse viscérale et le manteau de Anodonta grandis, le Tableau 6.11 n'indique aucune différence significative entre stations; par contre, pour le foie, les branchies, les oeufs et l'organisme reconstitué, la comparaison fait ressortir des différences entre des sous-groupes de stations; les valeurs élevées aux stations BR-01 (foie), BR-04 (foie, branchies, oeufs) et

surtout BR-06 (foie, branchies, oeufs, organisme reconstitué) sont mises en évidence. Pour le plomb, seules les branchies montrent des différences significatives entre stations; les valeurs élevées à la station BR-04 sont ainsi mises en évidence. Les concentrations de zinc dans le pied et les oeufs ne sont pas significativement différentes aux diverses stations; par contre, elles présentent deux sous-groupes de stations pour les muscles, le manteau et l'organisme reconstitué, trois pour la masse viscérale, le foie et quatre pour les branchies. La comparaison des moyennes met en évidence les valeurs élevées de zinc aux stations BE-01 (muscles), BE-11 (masse viscérale, foie, branchies), BE-16 (masse viscérale, foie, branchies, manteau, organisme reconstitué), BE-03 (foie), BR-06 (foie) et BR-11 (branchies).

Le Tableau 6.11 indique que les concentrations de fer dans le pied, les muscles et les oeufs de Anodonta grandis ne sont pas significativement différentes aux diverses stations; par contre, la méthode de Scheffé sépare deux sous-groupes de stations et fait ressortir les valeurs élevées de fer aux stations BE-11 (masse viscérale, foie, branchies), BE-01 (masse viscérale) et BE-16 (branchies, manteau, organisme reconstitué). Pour le manganèse, seuls la masse viscérale et l'organisme reconstitué montrent des différences significatives aux stations; les valeurs élevées aux stations MO-02 (rein) et BE-16 (organisme reconstitué) sont mises en évidence.

On note, de façon générale, que le pied et la masse viscérale pour Elliptio complanata et le pied, le muscle et les oeufs pour Anodonta grandis ne sont pas des organes qui permettent de distinguer les stations les unes des autres. Par contre, l'organisme reconstitué permet de séparer des groupes de stations pour tous les métaux où la reconstitution a pu être effectuée. En reconstituant l'organisme, on diminue, de façon générale le coefficient de variation des moyennes à chaque station, comparativement aux organes (comparer le Tableau 5.34 avec les Tableaux 5.28 à 5.33 et le Tableau 5.43 avec les Tableaux 5.36 à 5.42); ceci suggère i) que les métaux se distribuent de façon un peu différen-

te dans les individus à une même station; et/ou ii) que le prélèvement des organes n'est pas complètement sélectif.

6.3.2 Répartition des métaux dans les différents organes

Pour une station et un métal donnés, on se demande si les concentrations moyennes du métal dans différents organes présentent des différences significatives. L'analyse de variance à une modalité et la méthode de comparaison multiple de Scheffé ($\alpha = 0.05$) ont été appliqués, pour chacune des espèces de bivalves, à chaque série relative à un métal à une station donnée. Dans les Tableaux 6.12 et 6.13, on trouve le classement, par ordre croissant, des valeurs moyennes des concentrations de métaux obtenues pour chaque organe de Elliptio complanata et Anodonta grandis; les sous-groupes de moyennes non significativement différentes les unes des autres au niveau $\alpha = 0.05$ sont identifiés. Si on considère, par exemple, le cuivre dans le Tableau 6.12:

- . à la station MO-03, on obtient MPRABF, ce qui signifie qu'à cette station, les concentrations moyennes de cuivre dans le pied, les muscles, la masse viscérale, le foie, les branchies et le manteau ne sont pas significativement différentes les unes des autres.

- . à la station MO-02, on obtient MPRA-RABF, ce qui signifie qu'on a deux sous-groupes de moyennes à cette station: le premier, formé des muscles, du pied, de la masse viscérale et du manteau, et le deuxième, de la masse viscérale, du manteau, des branchies et du foie. A l'intérieur de chacun des sous-groupes, les moyennes ne sont pas significativement différentes les unes des autres. Par contre, les valeurs élevées dans les branchies et le foie sont significativement différentes de celles, plus faibles, dans les muscles et dans le pied.

Tableau 6.12: Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans les différents organes de Elliptio complanata: classement par ordre croissant des organes^a selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque station et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$).

Station	Cu	Pb ^b	Zn	Fe	Mn
M001	MPRA-PRAF B	RAB	MRF P-F PA-B	MPF RB-A	MF RAB
M002	MPRA-RABF	RBAF	MR-F P-PA-B	MPF RB-A	
M003	MPRABF	RBA	MRPF -PFA-FAB	PMRF -RF B-A	PMF R-AB
BE03	MPR-FA-B		MRF PA-B	PMRF -RF B-A	PMF R-A-B
BE16	PMRBF -MRBFA	BA	MRPF AB	PMRF -MRF B-A	PMF R-AB
BR01	PRMFA-FAB	PRF -FA-AB	MRPFA-B	PMRF -BA	PMF R-A-B
BR06	PMRFA-RFAB	R-BA	MRPF -A-B	PMRF B-A	PMF R-A-B

^a P: pied; M: muscles; R: masse viscérale; F: foie; B: branchie; A: manteau.

^b Plusieurs organes présentent des concentrations inférieures à la limite de sensibilité et ne sont donc pas pris en compte.

Tableau 6.13: Analyse de variance des concentrations des métaux traces dans les différents organes de Anodonta grandis: classement par ordre croissant des organes^a selon leurs valeurs moyennes obtenues pour chaque station et chaque métal et détermination des groupes de moyennes non significativement différentes à l'aide de la méthode de Scheffé ($\alpha = 0.05$).

Station	Cu	Pb ^b	Zn	Fe	Mn
MO-01	MROPAF-B	ARFAB	OMRPF A-B	OMF PAR-B	PMF ORA-B
MO-02	MORAF P-B	OARF M-RF MB-MBP	OMR-MRF AP-B	OMPFA-R-B	MOF PRA-B
MO-03	MRPFA-B		MRPFA-B	MPF RA-B	RA-B
BE-01	MAPROF-B	OABFM	OMRFP A-B	OMPAF -BR	PMOF RA-B
BE-03	MRPAF-B	RAMFBP	MRPFA-B	MPRAF-B	MPF RA-B
BE-11	MORPA-ORPAF-B	ORAMFB	OMPRFA-B	MOPAF R-B	MPOF RA-B
BE-15	MOARFP-B	OF-B	OMARPF-B	OMPFA-R-B	ORA-B
BE-16	MRFPA-B	RAF B	MPRFA-B	MPF RA-B	MPF RA-B
BR-01	MRPFA-B	RA-B	MRFPA-B	MFARP-B	PMF RA-B
BR-04	MRPOFA-B	OB	MORPFA-B	OMF APR-B	MPF ROA-B
BR-06	MRPOAF-B	ROAF-OAF B	MPROAF-OAF B	MPF OARB	MPF ROA-B
BR-11	MPROFA-B	ROAB	MOPRFA-B	MOF PRA-B	PMF ROA-B

^a P = pied; M: muscles; R: masse viscérale; F: foie; B: branchies; A: manteau; O: oeufs.

^b Plusieurs organes présentent des concentrations inférieures à la limite de sensibilité et ne sont donc pas pris en compte.

Les valeurs des coefficients de corrélation linéaire (r) ont également été calculés pour chaque métal, entre les teneurs en métal dans chaque organe de Elliptio complanata (Tableau 6.14) et de Anodonta grandis (Tableau 6.15).

Les Tableaux 6.12 et 6.13 indiquent que la répartition d'un métal entre les organes de chaque bivalve est assez semblable d'une station à l'autre. Pour le cuivre, les moyennes élevées dans le manteau et surtout dans les branchies de Elliptio complanata se distinguent de celles plus faibles dans les muscles et le pied; en ce qui concerne le zinc et le fer, les moyennes dans les muscles et la masse viscérale sont généralement significativement plus faibles que celles dans le manteau et surtout dans les branchies. Pour le manganèse dans ce bivalve, les moyennes dans le manteau et surtout dans les branchies sont significativement plus élevées que celles observées dans le pied, le muscle, le foie et la masse viscérale. Le Tableau 6.13 montre que pour le cuivre, le zinc, le fer et le manganèse, les moyennes élevées dans les branchies de Anodonta grandis se distinguent nettement de celles plus faibles dans les autres organes.

Pour le zinc et le fer, le Tableau 6.14 indique que les concentrations dans les organes de Elliptio complanata sont toutes corrélées entre elles; la même situation existe pour Anodonta grandis (Tableau 6.15), sauf en ce qui concerne le pied et les oeufs. Ceci est une indication que ces deux métaux se distribuent dans les organes de chacun des bivalves. Le cuivre semble aussi se distribuer de façon un peu semblable, sauf en ce qui concerne le pied (Elliptio complanata) et le pied et le muscle (Anodonta grandis). Par contre, le plomb ne semble pas se distribuer dans les organes des deux bivalves aussi bien que les métaux précédents. En effet, pour Elliptio complanata, on n'observe une corrélation qu'entre les branchies et le manteau. Etant donné que ces deux organes montrent généralement les teneurs les plus élevées (voir le Tableau 6.12), il semble donc que le plomb y soit immobilisé. Pour Anodonta grandis, la répartition du plomb semble être plus homogène que pour Elliptio complanata, notamment entre le manteau et divers

Tableau 6.14: Matrices de corrélations entre les teneurs en métaux dans les différents organes de Elliptio complanata^a.

	Muscles	M. visc.	Foie	Branchies	Manteau
Cuivre					
Pied	0.417	(0.175)	(0.112)	<u>0.548</u>	(0.144)
Muscles		<u>0.578</u>	<u>0.558</u>	<u>0.529</u>	0.441
M. visc.			<u>0.619</u>	<u>0.382</u>	<u>0.490</u>
Foie				0.398	<u>0.472</u>
Branchies					<u>0.691</u>
Plomb					
Pied	^b	-	-	-	-
Muscles		-	-	-	-
M. visc.			(0.159)	(0.196)	(0.256)
Foie				(-0.009)	(0.313)
Branchies					<u>0.787</u>
Zinc					
Pied	0.527	0.402	<u>0.581</u>	<u>0.533</u>	0.439
Muscles		<u>0.740</u>	<u>0.769</u>	<u>0.648</u>	<u>0.738</u>
M. visc.			<u>0.651</u>	<u>0.724</u>	<u>0.806</u>
Foie				<u>0.590</u>	<u>0.600</u>
Branchies					<u>0.808</u>
Fer					
Pied	0.324	0.472	<u>0.606</u>	0.395	<u>0.502</u>
Muscles		<u>0.524</u>	<u>0.705</u>	<u>0.510</u>	<u>0.705</u>
M. visc.			<u>0.657</u>	(0.136)	<u>0.532</u>
Foie				<u>0.507</u>	<u>0.540</u>
Branchies					<u>0.510</u>
Manganèse					
Pied	(0.208)	(-0.007)	(-0.195)	(-0.396)	(0.303)
Muscles		<u>0.544</u>	0.494	(0.200)	<u>0.647</u>
M. visc.			0.427	(0.132)	<u>0.550</u>
Foie				(0.307)	(0.338)
Branchies					(0.294)

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau 5% (entre parenthèses).

^b Nombre de données insuffisant pour calculer r.

Tableau 6.15: Matrices de corrélations entre les teneurs en métaux dans les différents organes de *Anodonta grandis*^a.

	Muscles	M. visc.	Foie	Branchies	Manteau	Oeufs
Cuivre						
Pied	(0.250)	(0.118)	(0.142)	(0.081)	0.384	(0.279)
Muscles		<u>0.456</u>	(0.200)	(0.023)	<u>0.601</u>	(0.061)
M. Visc.			<u>0.439</u>	0.306	<u>0.506</u>	0.828
Foie				<u>0.574</u>	<u>0.452</u>	<u>0.795</u>
Branchies					0.335	<u>0.538</u>
Manteau						<u>0.822</u>
Plomb						
Pied	(0.308)	(-0.342)	(0.145)	(0.540)	(0.054)	(0.930)
Muscles		0.755	(0.405)	(0.049)	0.719	(0.510)
M. Visc.			(0.328)	(0.077)	0.462	(-0.294)
Foie				(0.370)	<u>0.837</u>	(0.442)
Branchies					<u>0.462</u>	0.494
Manteau						(0.428)
Zinc						
Pied	<u>0.371</u>	0.316	(0.218)	(0.084)	(0.225)	(-0.051)
Muscles		<u>0.433</u>	0.337	(0.082)	0.266	(-0.167)
M. Visc.			<u>0.700</u>	0.599	0.680	(0.262)
Foie				<u>0.519</u>	<u>0.551</u>	0.442
Branchies					<u>0.660</u>	(0.301)
Manteau						(0.400)
Fer						
Pied	(0.025)	(-0.044)	(-0.045)	(0.096)	(0.001)	(0.032)
Muscles		<u>0.446</u>	0.284	(0.092)	0.396	(0.021)
M. Visc.			<u>0.684</u>	0.405	<u>0.458</u>	(0.148)
Foie				<u>0.763</u>	<u>0.655</u>	(0.153)
Branchies					<u>0.682</u>	(0.260)
Manteau						<u>0.656</u>
Manganèse						
Pied	(0.173)	0.390	(0.177)	(0.023)	(0.100)	(-0.006)
Muscles		(0.194)	<u>0.373</u>	(0.100)	0.721	(-0.150)
M. Visc.			<u>0.510</u>	(0.203)	(0.100)	(-0.293)
Foie				0.361	<u>0.507</u>	(-0.279)
Branchies					<u>0.272</u>	(0.055)
Manteau						(-0.085)

^a Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles non significativement différentes de zéro au niveau 5% (entre parenthèses).

organes (branchies, foie, masse viscérale, muscles). Les fortes concentrations de manganèse dans les branchies (Tableaux 6.12 et 6.13) ne sont à peu près pas corrélées avec celles dans les autres organes (Tableaux 6.14 et 6.15); ceci suggère que le manganèse qu'on retrouve dans les branchies provient directement du milieu extérieur et qu'il est immobilisé dans cet organe. Par contre, les corrélations qu'on observe entre les concentrations de manganèse dans la masse viscérale, dans le foie et dans d'autres organes suggèrent que le manganèse qu'on retrouve dans ces différents organes provient de l'assimilation par une voie commune, probablement le tractus intestinal.

De façon générale, le manteau, et surtout les branchies sont les organes qui présentent les concentrations de métaux les plus élevées. D'après Coombs (1980), les branchies et le système digestif sont les deux principales voies d'entrée des métaux traces dans plusieurs bivalves marins. Il semble que les métaux traces particuliers sont introduits dans les branchies par endocytose, entreposés à l'intérieur des cellules dans des vésicules, sous forme de granules (George et Pirie, 1980; George et al., 1978), et excrétés ultérieurement de l'organisme par exocytose. En ce qui a trait au manteau, mentionnons que des granules extra-cellulaires ont été identifiées sur le manteau de Anodonta cygnea (Simkiss, 1979); ces granules contenaient entre autres Zn, Fe et Mn. Par ailleurs, le pied et le muscle présentent habituellement les concentrations les plus faibles, ce qui s'explique par le fait qu'il s'agit d'organes qui ne constituent pas des voies d'entrée des métaux et qui ne sont pas impliqués dans l'excrétion.

6.3.3 Relations entre la spéciation des métaux dans les sédiments et leur accumulation dans les bivalves

Pour tenter de mettre en évidence les relations entre la spéciation des métaux traces dans les sédiments et leur accumulation dans les deux espèces de bivalves, on a déterminé les coefficients de corrélation linéaire (r) suivants:

- pour chacun des métaux entre, d'une part, le métal dans un organe (ou dans l'organisme reconstitué) et, d'autre part, le même métal dans les différentes fractions de lessivage (F1 à F5) des sédiments ou dans leur somme (S2 à S5); par exemple, Cu (pied) - Cu(F1);
- pour Cu, Pb et Zn entre, d'une part, l'un de ces métaux dans un organe (ou dans l'organisme reconstitué) et, d'autre part, le rapport de ce métal sur le fer dans les différentes fractions (F1 à F5) des sédiments ou dans leur somme (S2 à S5); par exemple, Cu (pied) - Cu(F1)/Fe(F1).

Pour tous ces calculs, la fraction granulométrique $< 70 \mu\text{m}$ a été utilisée. Les valeurs de r ont été calculées séparément pour chaque espèce de bivalve et les valeurs moyennes à chaque station, plutôt que les valeurs individuelles de chaque mollusque, ont été utilisées pour le calcul; cette façon de procéder nous semblait la plus appropriée, étant donné qu'habituellement l'analyse chimique de mollusques se fait sur un échantillon composite de plusieurs individus prélevés à une station. Finalement, mentionnons que tous les individus à une même station ont été utilisés pour effectuer les moyennes, ce qui implique que la variabilité biologique peut être élevée; en effet, le nombre d'individus analysés à chaque station n'était pas assez élevé pour minimiser cette variabilité biologique due, par exemple à l'âge des organismes ou à leur sexe. Les valeurs des coefficients de corrélation, le nombre de valeurs utilisées et la probabilité de la distribution de Student sont donnés dans les Tableaux 6.16 à 6.22 pour Elliptio complanata et dans les Tableaux 6.23 à 6.29 pour Anodonta grandis. Les résultats sont discutés individuellement pour les deux espèces de bivalves.

Elliptio complanata

Le Tableau 6.16 indique des corrélations entre, d'une part, Cu(F2) ou Cu(F3) dans les sédiments et, d'autre part, les teneurs en cuivre

Tableau 6.16 : Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de *Hydrobia complanata* et le cuivre dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	Cu(F1)	Cu(F2)	Cu(F3)	Cu(F4)	Cu(F5)	Cu(S2)	Cu(S3)	Cu(S4)	Cu(S5)
PI	.6591 (5) P= .226	.8425** (8) P= .009	.8383** (8) P= .009	.5730 (8) P= .138	.6677 (8) P= .070	.8458** (8) P= .008	.8634** (8) P= .006	.7445* (8) P= .034	.7295* (8) P= .040
MU	.8498 (5) P= .068	.6086 (8) P= .109	.4655 (8) P= .245	.5181 (8) P= .188	.5483 (8) P= .159	.6129 (8) P= .106	.5563 (8) P= .152	.5723 (8) P= .138	.5707 (8) P= .140
MV	.1732 (5) P= .781	.8259* (8) P= .012	.9613** (8) P= .000	.5606 (8) P= .148	.7266* (8) P= .041	.8264* (8) P= .011	.9131** (8) P= .002	.7591* (8) P= .029	.7568* (8) P= .030
FO	.7888 (5) P= .113	.8099* (8) P= .015	.6898 (8) P= .058	.6450 (8) P= .084	.6411 (8) P= .087	.8146* (8) P= .014	.7740* (8) P= .024	.7491* (8) P= .032	.7254* (8) P= .042
BR	.3544 (5) P= .558	.7918* (8) P= .019	.9152** (8) P= .001	.4197 (8) P= .301	.5655 (8) P= .144	.7946* (8) P= .018	.8735** (8) P= .005	.6537 (8) P= .079	.6346 (8) P= .091
MA	.2890 (5) P= .637	.9221** (8) P= .001	.9265** (8) P= .001	.7786* (8) P= .023	.8679** (8) P= .005	.9221** (8) P= .001	.9474** (8) P= .000	.9102** (8) P= .002	.9065** (8) P= .002
Organisme	.3546 (5) P= .558	.8747** (8) P= .004	.9421** (8) P= .000	.6137 (8) P= .106	.7407* (8) P= .036	.8765** (8) P= .004	.9306** (8) P= .001	.8000* (8) P= .017	.7905* (8) P= .020

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau; organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.17 : Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de Elliptio complanata et le plomb dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	Pb(F1)	Pb(F2)	Pb(F3)	Pb(F4)	Pb(F5)	Pb(S2)	Pb(S3)	Pb(S4)	Pb(S5)
PI	99.0000 (0) P=99.000	99.0000 (1) P=99.000							
MU	99.0000 (0) P=99.000	99.0000 (1) P=99.000							
MV	99.0000 (1) P=99.000	.3341 (8) P= .419	.2909 (8) P= .485	.2646 (6) P= .612	.2019 (8) P= .632	.3412 (8) P= .408	.3107 (8) P= .454	.2884 (8) P= .489	.2762 (8) P= .508
FO	99.0000 (1) P=99.000	-.3035 (7) P= .508	-.0862 (7) P= .854	.7861 (5) P= .115	-.2379 (7) P= .607	-.3076 (7) P= .502	-.1362 (7) P= .771	-.1337 (7) P= .775	-.1599 (7) P= .732
BR	99.0000 (1) P=99.000	.6475 (8) P= .083	.8733** (8) P= .005	.6170 (6) P= .192	.5107 (8) P= .196	.6625 (8) P= .073	.8560** (8) P= .007	.8226* (8) P= .012	.7735* (8) P= .024
MA	99.0000 (1) P=99.000	.5447 (8) P= .163	.6311 (8) P= .093	.3203 (6) P= .536	.4241 (8) P= .295	.5705 (8) P= .140	.6381 (8) P= .089	.5963 (8) P= .119	.5726 (8) P= .138

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau.

Tableau 6.18 : Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de *Elliptio complanata* et le zinc dans les différentes fractions de lessivage des sédiments. ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	Zn(F1)	Zn(F2)	Zn(F3)	Zn(F4)	Zn(F5)	Zn(S2)	Zn(S3)	Zn(S4)	Zn(S5)
PI	.7534* (8) P= .031	.6897 (8) P= .058	.7458* (8) P= .034	.5991 (8) P= .117	.6476 (8) P= .083	.7078* (8) P= .050	.7447* (8) P= .034	.7378* (8) P= .037	.7421* (8) P= .035
MU	.5480 (8) P= .160	.5862 (8) P= .127	.6638 (8) P= .073	.7839* (8) P= .021	.6878 (8) P= .059	.5808 (8) P= .131	.6475 (8) P= .083	.6708 (8) P= .069	.6921 (8) P= .057
MV	.5061 (8) P= .201	.5449 (8) P= .163	.5941 (8) P= .120	.7522* (8) P= .031	.6291 (8) P= .095	.5391 (8) P= .168	.5855 (8) P= .127	.6114 (8) P= .107	.6312 (8) P= .093
FO	.3546 (8) P= .389	.3958 (8) P= .332	.5782 (8) P= .133	.7370* (8) P= .037	.7656* (8) P= .027	.3887 (8) P= .341	.5276 (8) P= .179	.5575 (8) P= .151	.6095 (8) P= .109
BR	.7931* (8) P= .019	.7530* (8) P= .031	.8449** (8) P= .008	.8017* (8) P= .017	.7489* (8) P= .033	.7661* (8) P= .027	.8325** (8) P= .010	.8395** (8) P= .009	.8465** (8) P= .008
MA	.5232 (8) P= .183	.6377 (8) P= .089	.6064 (8) P= .111	.8293* (8) P= .011	.6375 (8) P= .089	.6155 (8) P= .104	.6180 (8) P= .103	.6492 (8) P= .082	.6649 (8) P= .072
Organisme	.6194 (8) P= .101	.6696 (8) P= .069	.7200* (8) P= .044	.8594** (8) P= .006	.7403* (8) P= .036	.6620 (8) P= .074	.7123* (8) P= .047	.7376* (8) P= .037	.7582* (8) P= .029

a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau; organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.19 : Matrice de corrélations entre le fer dans les organes de *Elliptio complanata* et le fer dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	Fe(F1)	Fe(F2)	Fe(F3)	Fe(F4)	Fe(F5)	Fe(S2)	Fe(S3)	Fe(S4)	Fe(S5)
PI	-.0282 (8) P= .947	.1454 (8) P= .731	.2862 (8) P= .492	-.2367 (8) P= .572	.8162* (8) P= .013	.1440 (8) P= .734	.2724 (8) P= .514	.2215 (8) P= .598	.7433* (8) P= .035
MU	.1627 (8) P= .700	-.0814 (8) P= .848	.0210 (8) P= .961	-.2305 (8) P= .583	.4886 (8) P= .219	-.0792 (8) P= .852	.0077 (8) P= .986	-.0328 (8) P= .939	.3988 (8) P= .328
MV	.2156 (8) P= .608	-.0849 (8) P= .842	-.1372 (8) P= .746	-.3720 (8) P= .364	.4068 (8) P= .317	-.0822 (8) P= .847	-.1324 (8) P= .755	-.1926 (8) P= .648	.2860 (8) P= .492
FO	.3460 (8) P= .401	.2436 (8) P= .561	.3884 (8) P= .342	-.1705 (8) P= .686	.8378** (8) P= .009	.2451 (8) P= .558	.3765 (8) P= .358	.3334 (8) P= .420	.7926* (8) P= .019
BR	-.0044 (8) P= .991	-.0012 (8) P= .998	.3169 (8) P= .444	.1792 (8) P= .671	.8198* (8) P= .013	-.0012 (8) P= .998	.2796 (8) P= .502	.3010 (8) P= .469	.7685* (8) P= .026
MA	.1813 (8) P= .667	-.1347 (8) P= .751	-.1060 (8) P= .803	-.4420 (8) P= .273	.5339 (8) P= .173	-.1319 (8) P= .756	-.1116 (8) P= .792	-.1848 (8) P= .661	.3943 (8) P= .334
Organisme	.1780 (8) P= .673	-.1003 (8) P= .813	-.0423 (8) P= .920	-.3683 (8) P= .369	.6107 (8) P= .108	-.0978 (8) P= .818	-.0509 (8) P= .905	-.1133 (8) P= .789	.4783 (8) P= .231

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau; organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.20 : Matrice de corrélation entre le cuivre dans les organes de *Elliptio complanata* et le rapport {cuivre/fer} dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	Cu(F1) Fe(F1)	Cu(F2) Fe(F2)	Cu(F3) Fe(F3)	Cu(F4) Fe(F4)	Cu(F5) Fe(F5)	Cu(S2) Fe(S2)	Cu(S3) Fe(S3)	Cu(S4) Fe(S4)	Cu(S5) Fe(S5)
PI	.3772 (5) P= .531	.9681** (8) P= .000	.8896** (8) P= .003	.2164 (8) P= .607	.7994** (8) P= .017	.9681** (8) P= .000	.9431** (8) P= .000	.8001* (8) P= .017	.8144* (8) P= .014
MU	.7190 (5) P= .171	.7102* (8) P= .048	.5348 (8) P= .172	.3379 (8) P= .413	.6402 (8) P= .087	.7167* (8) P= .045	.6596 (8) P= .075	.6442 (8) P= .085	.6392 (8) P= .088
MV	-.0712 (5) P= .909	.9252** (8) P= .001	.9612** (8) P= .000	.1552 (8) P= .714	.7969* (8) P= .018	.9204** (8) P= .001	.9344** (8) P= .001	.7722* (8) P= .025	.7867* (8) P= .021
FO	.1003 (5) P= .872	.8279* (8) P= .011	.7159* (8) P= .046	.3964 (8) P= .331	.7734* (8) P= .024	.8317** (8) P= .010	.8348** (8) P= .010	.8332** (8) P= .010	.8200* (8) P= .013
BR	.4051 (5) P= .499	.9289** (8) P= .001	.9607** (8) P= .000	-.0358 (8) P= .933	.7105* (8) P= .048	.9334** (8) P= .001	.9361** (8) P= .001	.6647 (8) P= .072	.7169* (8) P= .045
MA	.1358 (5) P= .828	.9000** (8) P= .002	.9078** (8) P= .002	.4183 (8) P= .302	.9162** (8) P= .001	.9011** (8) P= .002	.9548** (8) P= .000	.9173** (8) P= .001	.9194** (8) P= .001
Organisme	.2640 (5) P= .668	.9615** (8) P= .000	.9653** (8) P= .000	.2024 (8) P= .631	.8377** (8) P= .009	.9639** (8) P= .000	.9780** (8) P= .000	.8213* (8) P= .012	.8406** (8) P= .009

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau; organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.21 : Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de *Elliptio complanata* et le rapport {plomb/fer} dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	$\frac{\text{Pb}(F1)}{\text{Fe}(F1)}$	$\frac{\text{Pb}(F2)}{\text{Fe}(F2)}$	$\frac{\text{Pb}(F3)}{\text{Fe}(F3)}$	$\frac{\text{Pb}(F4)}{\text{Fe}(F4)}$	$\frac{\text{Pb}(F5)}{\text{Fe}(F5)}$	$\frac{\text{Pb}(S2)}{\text{Fe}(S2)}$	$\frac{\text{Pb}(S3)}{\text{Fe}(S3)}$	$\frac{\text{Pb}(S4)}{\text{Fe}(S4)}$	$\frac{\text{Pb}(S5)}{\text{Fe}(S5)}$
PI	99.0000 (0) P=99.000	99.0000 (1) P=99.000							
MU	99.0000 (0) P=99.000	99.0000 (1) P=99.000							
MV	99.0000 (1) P=99.000	.7913* (8) P= .019	.4818 (8) P= .227	.2128 (6) P= .686	.1595 (8) P= .706	.7948* (8) P= .018	.5325 (8) P= .174	.4665 (8) P= .244	.3147 (8) P= .448
FO	99.0000 (1) P=99.000	-.1340 (7) P= .775	-.1211 (7) P= .796	.3610 (5) P= .551	-.2998 (7) P= .514	-.1826 (7) P= .695	-.1815 (7) P= .697	-.1622 (7) P= .728	-.1936 (7) P= .678
BR	99.0000 (1) P=99.000	.8933** (8) P= .003	.9716** (8) P= .000	.1874 (6) P= .722	.6513 (8) P= .080	.9140** (8) P= .001	.9694** (8) P= .000	.9177** (8) P= .001	.8660** (8) P= .005
MA	99.0000 (1) P=99.000	.7493* (8) P= .032	.7368* (8) P= .037	.1143 (6) P= .829	.5113 (8) P= .195	.7753* (8) P= .024	.7573* (8) P= .030	.6903 (8) P= .058	.6506 (8) P= .081

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau.

Tableau 6.22 : Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de Elliptio complanata et le rapport {zinc/fer} dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($F < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe ^b	Zn(F1) Fe(F1)	Zn(F2) Fe(F2)	Zn(F3) Fe(F3)	Zn(F4) Fe(F4)	Zn(F5) Fe(F5)	Zn(S2) Fe(S2)	Zn(S3) Fe(S3)	Zn(S4) Fe(S4)	Zn(S5) Fe(S5)
PI	.5865 (8) P= .126	.5534 (8) P= .155	.7410* (8) P= .035	.4726 (8) P= .237	.6787 (8) P= .064	.6270 (8) P= .096	.7556* (8) P= .030	.7350* (8) P= .038	.7785* (8) P= .023
MU	.6826 (8) P= .062	.7674* (8) P= .026	.7787* (8) P= .023	.7844* (8) P= .021	.5798 (8) P= .132	.7701* (8) P= .025	.7791* (8) P= .023	.7848* (8) P= .021	.6391 (8) P= .088
MV	.6519 (8) P= .080	.6913 (8) P= .058	.7214* (8) P= .043	.8298* (8) P= .011	.4962 (8) P= .211	.7099* (8) P= .049	.7309* (8) P= .039	.7466* (8) P= .033	.5701 (8) P= .140
FO	.6105 (8) P= .108	.8841** (8) P= .004	.7347* (8) P= .038	.6630 (8) P= .073	.7026 (8) P= .052	.8636* (8) P= .006	.7107* (8) P= .048	.7184* (8) P= .045	.5603 (8) P= .148
BR	.8669** (8) P= .005	.6633 (8) P= .073	.8936** (8) P= .003	.6651 (8) P= .072	.7229* (8) P= .043	.7398* (8) P= .036	.8939** (8) P= .003	.8672** (8) P= .005	.8399** (8) P= .009
MA	.4675 (8) P= .243	.6325 (8) P= .092	.6718 (8) P= .068	.9602** (8) P= .000	.3946 (8) P= .333	.6163 (8) P= .104	.6985 (8) P= .054	.7401* (8) P= .036	.5460 (8) P= .162
Organisme	.6905 (8) P= .058	.7213* (8) P= .043	.8074* (8) P= .015	.8768** (8) P= .004	.5991 (8) P= .124	.7427* (8) P= .035	.9173* (8) P= .013	.8308* (8) P= .011	.6929 (8) P= .062

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b PI: pied; MU: muscles; MV: masse viscérale; FO: foie; BR: branchies; MA: manteau; organisme; ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.23: Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de *Anodonta grandis* et le cuivre dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Cu(F1)	Cu(F2)	Cu(F3)	Cu(F4)	Cu(F5)	Cu(S2)	Cu(S3)	Cu(S4)	Cu(S5)
Pied	.1998 (8) P= .635	.0330 (12) P= .919	-.1579 (12) P= .624	-.0955 (12) P= .768	.1065 (12) P= .742	.0373 (12) P= .908	-.0544 (12) P= .867	-.0876 (12) P= .787	-.0352 (12) P= .913
Muscle	-.5363 (8) P= .171	.1677 (12) P= .607	.1637 (12) P= .611	.1270 (12) P= .694	.3897 (12) P= .210	.1633 (12) P= .612	.1682 (12) P= .601	.1601 (12) P= .619	.2262 (12) P= .480
Masse viscérale	-.1038 (8) P= .807	.4978 (12) P= .100	.3391 (12) P= .281	.5469 (12) P= .066	.7418** (12) P= .006	.4944 (12) P= .102	.4349 (12) P= .158	.5579 (12) P= .059	.6175* (12) P= .032
Foie	.1096 (8) P= .796	.6311* (12) P= .028	.4883 (12) P= .107	.3136 (12) P= .321	.4527 (12) P= .139	.6316* (12) P= .028	.5817* (12) P= .047	.4711 (12) P= .122	.4733 (12) P= .120
Branchies	.3140 (8) P= .449	.7085** (12) P= .010	.6041* (12) P= .037	.2960 (12) P= .350	.4613 (12) P= .131	.7112** (12) P= .010	.6808* (12) P= .015	.5047 (12) P= .094	.5005 (12) P= .097
Manteau	-.3193 (8) P= .441	.4651 (12) P= .128	.4897 (12) P= .106	.2351 (12) P= .462	.5165 (12) P= .086	.4609 (12) P= .132	.4879 (12) P= .108	.3767 (12) P= .227	.4213 (12) P= .173
Oeufs	-.0528 (7) P= .911	.5549 (10) P= .096	.5152 (10) P= .127	.4205 (10) P= .226	.5071 (10) P= .135	.5533 (10) P= .097	.5478 (10) P= .101	.5046 (10) P= .137	.5109 (10) P= .131
Organisme ^b	-.0682 (8) P= .873	.6016* (12) P= .039	.5324 (12) P= .075	.3193 (12) P= .312	.5058 (12) P= .093	.5990* (12) P= .040	.5847* (12) P= .046	.4763 (12) P= .118	.4918 (12) P= .104

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b Organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.24: Matrice de corrélations entre le plomb dans les organes de Anodonta grandis et le plomb dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Pb(F1)	Pb(F2)	Pb(F3)	Pb(F4)	Pb(F5)	Pb(S2)	Pb(S3)	Pb(S4)	Pb(S5)
Pied	.99,0000 (0) P=.99,000	-.1491 (5) P=.611	.3398 (5) P=.576	-.9093 (4) P=.091	.3603 (5) P=.551	-.1441 (5) P=.811	.1217 (5) P=.845	.1139 (5) P=.855	.2113 (5) P=.733
Muscle	.99,0000 (0) P=.99,000	.8647* (7) P=.012	-.0431 (7) P=.927	.2329 (7) P=.615	.8071* (7) P=.028	.8647* (7) P=.012	.3798 (7) P=.401	.3799 (7) P=.401	.5253 (7) P=.226
Masse viscérale	.99,0000 (1) P=.99,000	.3770 (9) P=.317	-.1855 (9) P=.633	.0136 (8) P=.975	.3551 (9) P=.348	.3809 (9) P=.312	-.0695 (9) P=.859	-.0404 (9) P=.918	.0429 (9) P=.913
Foie	.99,0000 (1) P=.99,000	.5292 (10) P=.116	.0203 (10) P=.956	-.0263 (8) P=.951	.4660 (10) P=.175	.5380 (10) P=.109	.1448 (10) P=.690	.1462 (10) P=.687	.2209 (10) P=.540
Branchies	.99,0000 (1) P=.99,000	.5836* (12) P=.046	.7811** (12) P=.003	.5031 (10) P=.138	.6057* (12) P=.037	.5944* (12) P=.042	.7794** (12) P=.003	.7515** (12) P=.005	.7382** (12) P=.006
Manteau	.99,0000 (1) P=.99,000	.5770* (12) P=.049	.0771 (12) P=.812	.1497 (10) P=.680	.4237 (12) P=.170	.5836* (12) P=.046	.1987 (12) P=.536	.1998 (12) P=.534	.2532 (12) P=.427
Oeufs	.99,0000 (1) P=.99,000	.5807 (10) P=.078	.5206 (10) P=.118	.2625 (8) P=.530	.4844 (10) P=.156	.5879 (10) P=.074	.5583 (10) P=.093	.5336 (10) P=.112	.5299 (10) P=.115

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

Tableau 6.25: Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de Anodonta grandis et le zinc dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Zn(F1)	Zn(F2)	Zn(F3)	Zn(F4)	Zn(F5)	Zn(S2)	Zn(S3)	Zn(S4)	Zn(S5)
Pied	.0309 (12) P= .924	.1105 (12) P= .732	.0817 (12) P= .801	.0757 (12) P= .815	.0509 (12) P= .875	.0857 (12) P= .791	.0860 (12) P= .790	.0865 (12) P= .789	.0847 (12) P= .793
Muscle	.1746 (12) P= .587	.3862 (12) P= .215	.1657 (12) P= .607	.0250 (12) P= .939	.2312 (12) P= .470	.3249 (12) P= .303	.2323 (12) P= .468	.2164 (12) P= .499	.1536 (12) P= .634
Masse viscérale	.1367 (12) P= .667	.5201 (12) P= .083	.5314 (12) P= .075	.6459* (12) P= .023	.4314 (12) P= .161	.4006 (12) P= .197	.4998 (12) P= .098	.5227 (12) P= .081	.5320 (12) P= .075
Foie	.0021 (12) P= .995	.3818 (12) P= .221	.5292 (12) P= .077	.5096 (12) P= .091	.4269 (12) P= .166	.2560 (12) P= .422	.4432 (12) P= .149	.4573 (12) P= .135	.4735 (12) P= .120
Branchies	.2058 (12) P= .521	.5639 (12) P= .056	.7077** (12) P= .010	.8319** (12) P= .001	.6925* (12) P= .013	.4556 (12) P= .137	.6358* (12) P= .026	.6659* (12) P= .018	.7009* (12) P= .011
Manteau	-.1301 (12) P= .687	.2722 (12) P= .342	.4021 (12) P= .195	.7008* (12) P= .011	.5667 (12) P= .055	.1323 (12) P= .682	.3129 (12) P= .322	.3558 (12) P= .256	.4065 (12) P= .190
Oeufs	-.2324 (10) P= .518	-.0838 (10) P= .818	.2153 (10) P= .550	.3123 (10) P= .380	.4357 (10) P= .208	-.1462 (10) P= .667	.0846 (10) P= .816	.1029 (10) P= .777	.1585 (10) P= .662
Organisme ^b	-.0430 (12) P= .845	.3818 (12) P= .221	.4941 (12) P= .103	.7493** (12) P= .005	.6152* (12) P= .033	.2388 (12) P= .455	.4136 (12) P= .181	.4533 (12) P= .139	.5005 (12) P= .097

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b Organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.26: Matrice de corrélations entre le fer dans les organes de *Anodonta grandis* et le fer dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Fe(F1)	Fe(F2)	Fe(F3)	Fe(F4)	Fe(F5)	Fe(S2)	Fe(S3)	Fe(S4)	Fe(S5)
Pied	-.3212 (12) P= .309	-.1851 (12) P= .565	-.0955 (12) P= .768	.8662** (12) P= .000	.0063 (12) P= .965	-.1889 (12) P= .557	-.1116 (12) P= .730	-.0039 (12) P= .940	.0037 (12) P= .991
Muscle	-.0733 (12) P= .821	-.0825 (12) P= .799	.0000 (12) P= 1,000	.1869 (12) P= .561	.3294 (12) P= .296	-.0825 (12) P= .799	-.0122 (12) P= .970	.0107 (12) P= .974	.2700 (12) P= .396
Masse viscérale	.3155 (12) P= .318	.3794 (12) P= .224	.3907 (12) P= .209	-.1391 (12) P= .666	.2206 (12) P= .491	.3791 (12) P= .224	.3985 (12) P= .199	.3715 (12) P= .234	.3129 (12) P= .322
Foie	.0550 (12) P= .865	.3458 (12) P= .271	.4712 (12) P= .122	-.1670 (12) P= .604	.4711 (12) P= .122	.3401 (12) P= .279	.4632 (12) P= .129	.4312 (12) P= .162	.5368 (12) P= .072
Branchies	-.1398 (12) P= .665	.1506 (12) P= .640	.4586 (12) P= .134	.0485 (12) P= .881	.6192* (12) P= .032	.1443 (12) P= .655	.4231 (12) P= .171	.4163 (12) P= .176	.0518* (12) P= .022
Manteau	-.1179 (12) P= .715	.1353 (12) P= .675	.2717 (12) P= .393	-.2063 (12) P= .520	.7311** (12) P= .007	.1298 (12) P= .688	.2572 (12) P= .420	.2257 (12) P= .481	.6724* (12) P= .017
Oeufs	-.5965 (10) P= .069	-.5711 (10) P= .085	-.1312 (10) P= .718	-.2225 (10) P= .537	.3743 (10) P= .287	-.5735 (10) P= .083	-.1992 (10) P= .581	-.2008 (10) P= .578	.1731 (10) P= .633
Organisme ^b	-.2759 (12) P= .385	.0702 (12) P= .828	.2633 (12) P= .408	-.0258 (12) P= .937	.7124** (12) P= .009	.0623 (12) P= .847	.2399 (12) P= .453	.2307 (12) P= .471	.6591* (12) P= .020

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b Organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.27: Matrice de corrélations entre le cuivre dans les organes de *Anodonta grandis* et le rapport {cuivre/fer} dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Cu(F1) Fe(F1)	Cu(F2) Fe(F2)	Cu(F3) Fe(F3)	Cu(F4) Fe(F4)	Cu(F5) Fe(F5)	Cu(S2) Fe(S2)	Cu(S3) Fe(S3)	Cu(S4) Fe(S4)	Cu(S5) Fe(S5)
Pied	.5578 (8) P= .151	.0618 (12) P= .849	-.1244 (12) P= .699	.0277 (12) P= .932	.0243 (12) P= .940	.0752 (12) P= .816	-.0066 (12) P= .984	.0636 (12) P= .844	-.0910 (12) P= .779
Muscle	.4322 (8) P= .285	.4347 (12) P= .158	.2809 (12) P= .376	.2398 (12) P= .453	.2557 (12) P= .423	.4426 (12) P= .150	.3246 (12) P= .303	.3022 (12) P= .340	.1581 (12) P= .624
Masse viscérale	.1603 (8) P= .704	.5633 (12) P= .057	.3761 (12) P= .228	.6777* (12) P= .015	.5971* (12) P= .040	.5671 (12) P= .055	.5235 (12) P= .081	.6883* (12) P= .013	.5285 (12) P= .077
Foie	.4771 (8) P= .232	.7213* (12) P= .008	.5709 (12) P= .053	.2612 (12) P= .412	.5649 (12) P= .056	.7292** (12) P= .007	.7089** (12) P= .010	.6060* (12) P= .037	.5556 (12) P= .061
Branchies	.2635 (8) P= .528	.8341** (12) P= .001	.7182** (12) P= .009	.2063 (12) P= .520	.6360* (12) P= .026	.8353** (12) P= .001	.8285** (12) P= .001	.6664* (12) P= .018	.6244* (12) P= .030
Manteau	.6473 (8) P= .083	.8120** (12) P= .001	.6651* (12) P= .018	.2430 (12) P= .447	.4755 (12) P= .118	.8152** (12) P= .001	.7041* (12) P= .011	.5620 (12) P= .057	.4136 (12) P= .181
Oeufs	.5211 (7) P= .230	.8943** (10) P= .000	.7484* (10) P= .013	.6621* (10) P= .037	.5844 (10) P= .076	.8979** (10) P= .000	.8102** (10) P= .004	.7745** (10) P= .009	.6093 (10) P= .061
Organisme ^b	.5315 (8) P= .175	.9013** (12) P= .000	.7233** (12) P= .008	.3189 (12) P= .312	.5824* (12) P= .047	.9034** (12) P= .000	.8195** (12) P= .001	.7058** (12) P= .010	.5707 (12) P= .053

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b Organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

Tableau 6.28: Matrice de corrélation entre le plomb dans les organes de *Anodonta grandis* et le rapport {plomb/fer} dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Pb(F1) Fe(F1)	Pb(F2) Fe(F2)	Pb(F3) Fe(F3)	Pb(F4) Fe(F4)	Pb(F5) Fe(F5)	Pb(S2) Fe(S2)	Pb(S3) Fe(S3)	Pb(S4) Fe(S4)	Pb(S5) Fe(S5)
Pied	.99,0000 (0) P=99,000	-.4938 (5) P= .398	-.4571 (5) P= .439	-.6266 (4) P= .373	.3982 (5) P= .507	-.4993 (5) P= .392	-.4591 (5) P= .437	-.3251 (5) P= .594	.0858 (5) P= .891
Muscle	.99,0000 (0) P=99,000	.5784 (7) P= .174	.1394 (7) P= .766	.0820 (7) P= .091	.5819 (7) P= .348	.5817 (7) P= .171	.3840 (7) P= .395	.4268 (7) P= .340	.2394 (7) P= .605
Masse viscérale	.99,0000 (1) P=99,000	.0251 (9) P= .949	-.2089 (9) P= .540	.5042 (8) P= .203	.0035 (9) P= .993	.0346 (9) P= .930	-.1030 (9) P= .792	-.0472 (9) P= .904	-.1330 (9) P= .733
Foie	.99,0000 (1) P=99,000	.1850 (10) P= .609	.0356 (10) P= .922	.5474 (8) P= .160	.3146 (10) P= .376	.2050 (10) P= .570	.1519 (10) P= .675	.1842 (10) P= .610	.1516 (10) P= .676
Branchies	.99,0000 (1) P=99,000	.7289** (12) P= .007	.8693** (12) P= .000	.5297 (10) P= .115	.7132** (12) P= .009	.7365** (12) P= .006	.8696** (12) P= .000	.8792** (12) P= .000	.8319** (12) P= .001
Manteau	.99,0000 (1) P=99,000	.3554 (12) P= .257	.1312 (12) P= .684	.5380 (10) P= .109	.1946 (12) P= .544	.3688 (12) P= .238	.2436 (12) P= .446	.2606 (12) P= .413	.1582 (12) P= .623
Oeufs	.99,0000 (1) P=99,000	.3323 (10) P= .348	.5120 (10) P= .130	.4376 (8) P= .278	.5443 (10) P= .104	.3532 (10) P= .317	.5240 (10) P= .120	.5286 (10) P= .116	.5723 (10) P= .084

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

Tableau 6.29: Matrice de corrélations entre le zinc dans les organes de *Anodonta grandis* et le rapport {zinc/fer} dans les différentes fractions de lessivage des sédiments ($f < 70 \mu\text{m}$)^a.

Organe	Zn(F1) Fe(F1)	Zn(F2) Fe(F2)	Zn(F3) Fe(F3)	Zn(F4) Fe(F4)	Zn(F5) Fe(F5)	Zn(S2) Fe(S2)	Zn(S3) Fe(S3)	Zn(S4) Fe(S4)	Zn(S5) Fe(S5)
Pied	.5792 (12) P= .224	-.2803 (12) P= .378	.0505 (12) P= .876	.0457 (12) P= .868	.0012 (12) P= .997	-.1911 (12) P= .552	.0600 (12) P= .853	.0285 (12) P= .930	.0597 (12) P= .854
Muscle	-.0413 (12) P= .899	-.2891 (12) P= .362	.0850 (12) P= .793	-.0301 (12) P= .926	-.2388 (12) P= .455	-.2143 (12) P= .504	.1578 (12) P= .624	.1422 (12) P= .659	.2185 (12) P= .495
Masse viscérale	.4143 (12) P= .181	.3210 (12) P= .309	.5213 (12) P= .082	.7379** (12) P= .006	.2114 (12) P= .510	.3543 (12) P= .259	.5345 (12) P= .073	.5673 (12) P= .054	.4272 (12) P= .166
Foie	.5736 (12) P= .051	.3655 (12) P= .243	.5343 (12) P= .074	.4806 (12) P= .114	.3356 (12) P= .286	.4186 (12) P= .176	.4943 (12) P= .102	.5018 (12) P= .096	.4133 (12) P= .182
Branchies	.5130 (12) P= .088	.5432 (12) P= .068	.6921* (12) P= .013	.8099** (12) P= .001	.4905 (12) P= .105	.5693 (12) P= .053	.6717* (12) P= .017	.7060* (12) P= .010	.5675 (12) P= .054
Manteau	.5595 (12) P= .059	.5262 (12) P= .079	.5399 (12) P= .070	.8307** (12) P= .001	.3158 (12) P= .317	.5044 (12) P= .094	.4876 (12) P= .108	.5317 (12) P= .075	.2598 (12) P= .415
Oeufs	.7462* (10) P= .013	.7948** (10) P= .006	.5204 (10) P= .123	.6575* (10) P= .039	.5431 (10) P= .105	.7883** (10) P= .007	.4132 (10) P= .235	.4335 (10) P= .211	.2081 (10) P= .564
Organisme ^b	.5444 (12) P= .067	.5473 (12) P= .066	.6110* (12) P= .035	.8715** (12) P= .000	.3726 (12) P= .233	.5250 (12) P= .080	.5675 (12) P= .054	.6108* (12) P= .035	.3613 (12) P= .248

^a Le tableau montre le coefficient de corrélation, le nombre de valeurs utilisées (entre parenthèses) et la probabilité de la variable de Student (P). Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (**) et 5% (*) sont identifiées.

^b Organisme: ensemble des chairs, reconstitué avec l'équation (5.1).

dans à peu près tous les organes de Elliptio complanata, ce qui suggère que le cuivre dans les fractions 2 et 3 est disponible à ce bivalve; ces nombreuses corrélations concordent avec la répartition observée pour ce métal dans les différents organes de cet organisme (voir la section 6.3.2). Les coefficients de corrélation entre Cu(F2) - Cu (organisme) ou Cu(F3) - Cu (organisme) sont, de façon presque générale, plus élevés qu'entre Cu(F2) ou Cu(F3) et les organes individuels. Les valeurs de r augmentent également en divisant Cu(F2) et Cu(F3) respectivement par Fe(F2) et Fe(F3) (comparer les valeurs de r pour Cu(F2) - Cu (organisme) ou Cu(F3) - Cu (organisme) du Tableau 6.16 avec celles de $\frac{\text{Cu(F2)}}{\text{Fe(F2)}} - \text{Cu (organisme)}$ ou $\frac{\text{Cu(F3)}}{\text{Fe(F3)}} - \text{Cu (organisme)}$ du Tableau 6.20). Finalement, le Tableau 6.20 indique que la valeur de r la plus élevée est obtenue pour $\frac{\text{Cu(S3)}}{\text{Fe(S3)}} - \text{Cu (organisme)}$; cette dernière relation est présentée à la Figure 6.5.

Ces faits suggèrent que l'emploi de $\text{NH}_2\text{OH.HCl} - \text{HOAc}$ (hydrochlorure d'hydroxylamine - acide acétique) permettrait d'évaluer la fraction du cuivre particulaire disponible à Elliptio complanata; il s'agirait alors de mesurer les concentrations de cuivre et de fer dans l'extrait. Pour obtenir une confirmation des résultats obtenus ici il serait cependant nécessaire de répéter ces mesures dans un ou plusieurs autres milieux. Rappelons que l'emploi de $\text{NH}_2\text{OH.HCl} - \text{HOAc}$ comme seuls réactifs d'attaque des sédiments devrait permettre de libérer la somme des métaux dans les fractions F1, F2 et F3.

Le cas du plomb est moins clair que celui du cuivre. Plusieurs valeurs des concentrations de Pb dans les sédiments ou dans les organes étaient plus petites que les limites de détection, ce qui a empêché le calcul de certaines valeurs de r ; plusieurs autres étaient près de la limite de détection (donc entachées d'une grande erreur), ce qui peut influencer les valeurs de r . De plus, étant donné que les teneurs de plomb dans certains organes étaient plus faibles que la limite de détection, il devenait impossible de reconstituer la concentration dans l'organisme avec l'équation (5.1). Le Tableau 6.17 indique que les

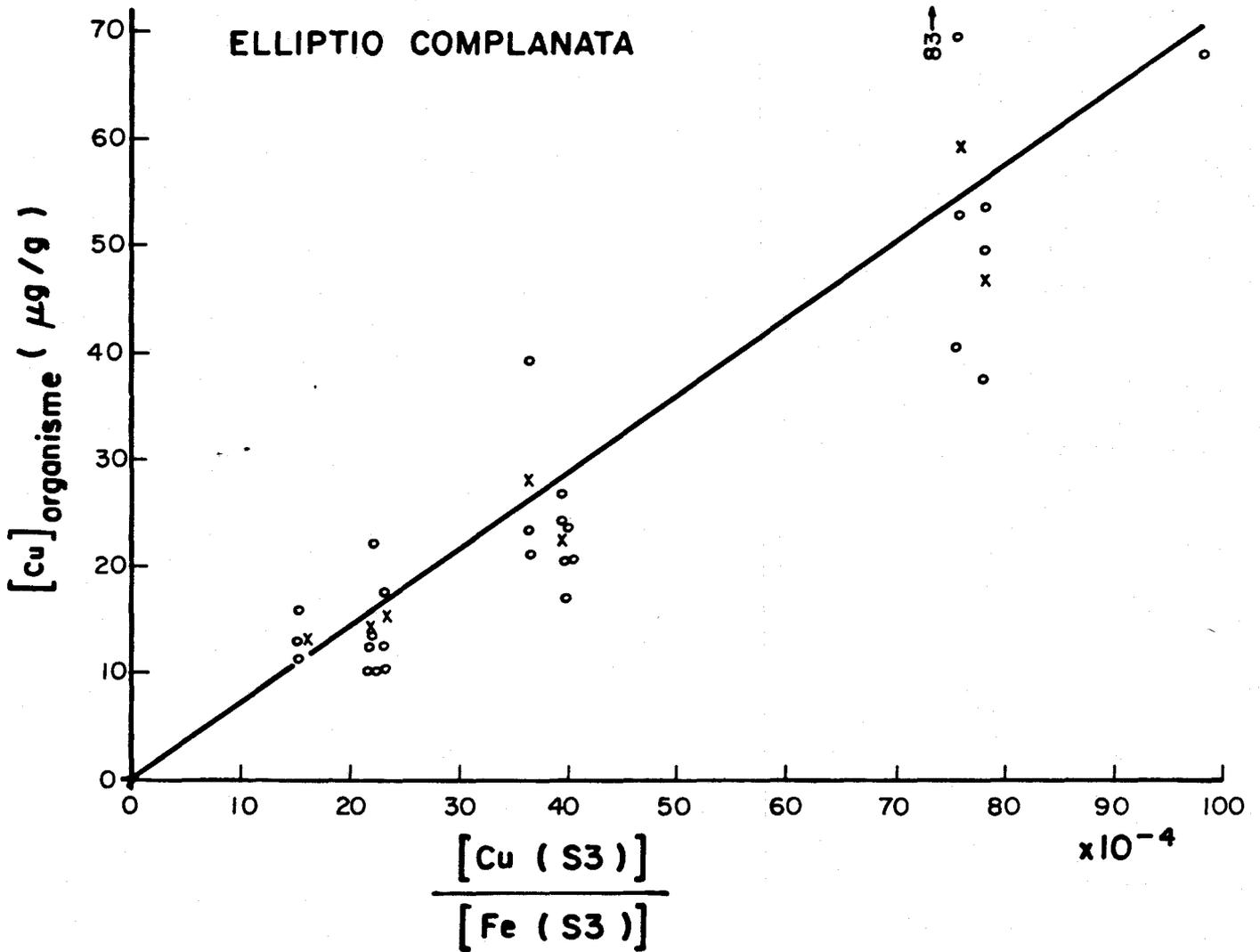


Figure 6.5: Relation entre la teneur en cuivre dans *Elliptio complanata* (reconstituée avec l'équation (5.1)) et le rapport $\frac{[Cu(S3)]}{[Fe(S3)]}$ dans les sédiments (o: organismes individuels; X: valeur moyenne pour tous les organismes à une station).

seules corrélations sont obtenues pour les branchies de Elliptio complanata avec Pb(F3), Pb(S3), Pb(S4) et Pb(S5); le fait de diviser les concentrations de plomb dans le sédiment par celles de fer augmente de façon générale les valeurs de r (comparer les Tableaux 6.17 et 6.21). On retrouve alors des coefficients de corrélation significativement différents de zéro pour $\frac{Pb(F2)}{Fe(F2)}$ (masse viscérale, branchies, manteau) et pour $\frac{Pb(F3)}{Fe(F3)}$ (branchies, manteau). De façon générale, le Tableau 6.21 indique que les valeurs de r augmentent lorsqu'on considère les rapports $\frac{Pb(S2)}{Fe(S2)}$ ou $\frac{Pb(S3)}{Fe(S3)}$ dans les sédiments au lieu de $\frac{Pb(F2)}{Fe(F2)}$ ou $\frac{Pb(F3)}{Fe(F3)}$. La valeur la plus élevée de r est obtenue pour $\frac{Pb(S3)}{Fe(S3)}$ - Pb (branchies); cette dernière relation est présentée à la Figure 6.6. Encore ici, il semble que le fer dans les sédiments joue un rôle important sur l'accumulation des métaux par ces bivalves.

Le Tableau 6.18 indique que des corrélations entre les organes et Zn(F1) (pied, branchies), Zn(F2) (branchies), Zn(F3) (pied, branchies), Zn(F4) (muscle, masse viscérale, foie, branchies, manteau), ainsi que Zn(F5) (foie, branchies) sont obtenues; des corrélations sont également obtenues entre l'organisme reconstitué et Zn(F3), Zn(F4) et Zn(F5). De façon quasi générale, les valeurs de r sont augmentées lorsqu'on divise les concentrations de zinc dans les sédiments par celles de fer correspondantes (comparer les Tableaux 6.18 et 6.22). Les valeurs de r sont souvent plus élevées lorsqu'on considère l'organisme reconstitué plutôt que les organes individuels. Pour l'organisme entier, les relations avec $\{Zn(F4)/Fe(F4)\}$ et avec $\{Zn(S3)/Fe(S3)\}$, qui semblent intéressantes, sont présentées sur les Figures 6.7 et 6.8. La Figure 6.7 indique que la forte valeur de r observée entre $\{Zn(F4)/Fe(F4)\}$ et l'organisme reconstitué est probablement influencée beaucoup par la station BE-16 qui montre des valeurs situées à l'extrême droite du graphique; la relation entre $\{Zn(S3)/Fe(S3)\}$ et l'organisme (Figure 6.8) semble nettement meilleure.

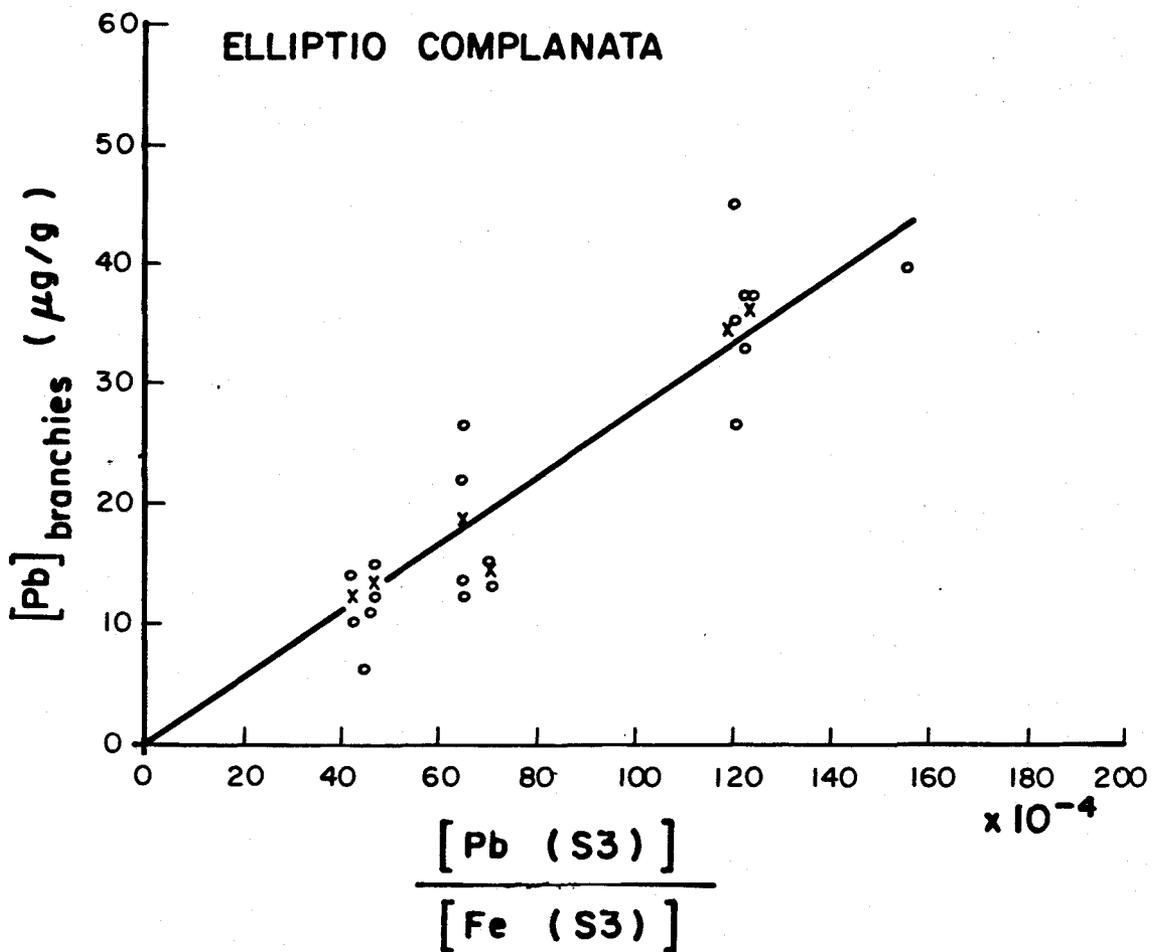


Figure 6.6: Relation entre la teneur en plomb dans les branchies de *Elliptio complanata* et le rapport $\{[Pb(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments (o: organismes individuels; X: valeur moyenne pour tous les organismes à une station).

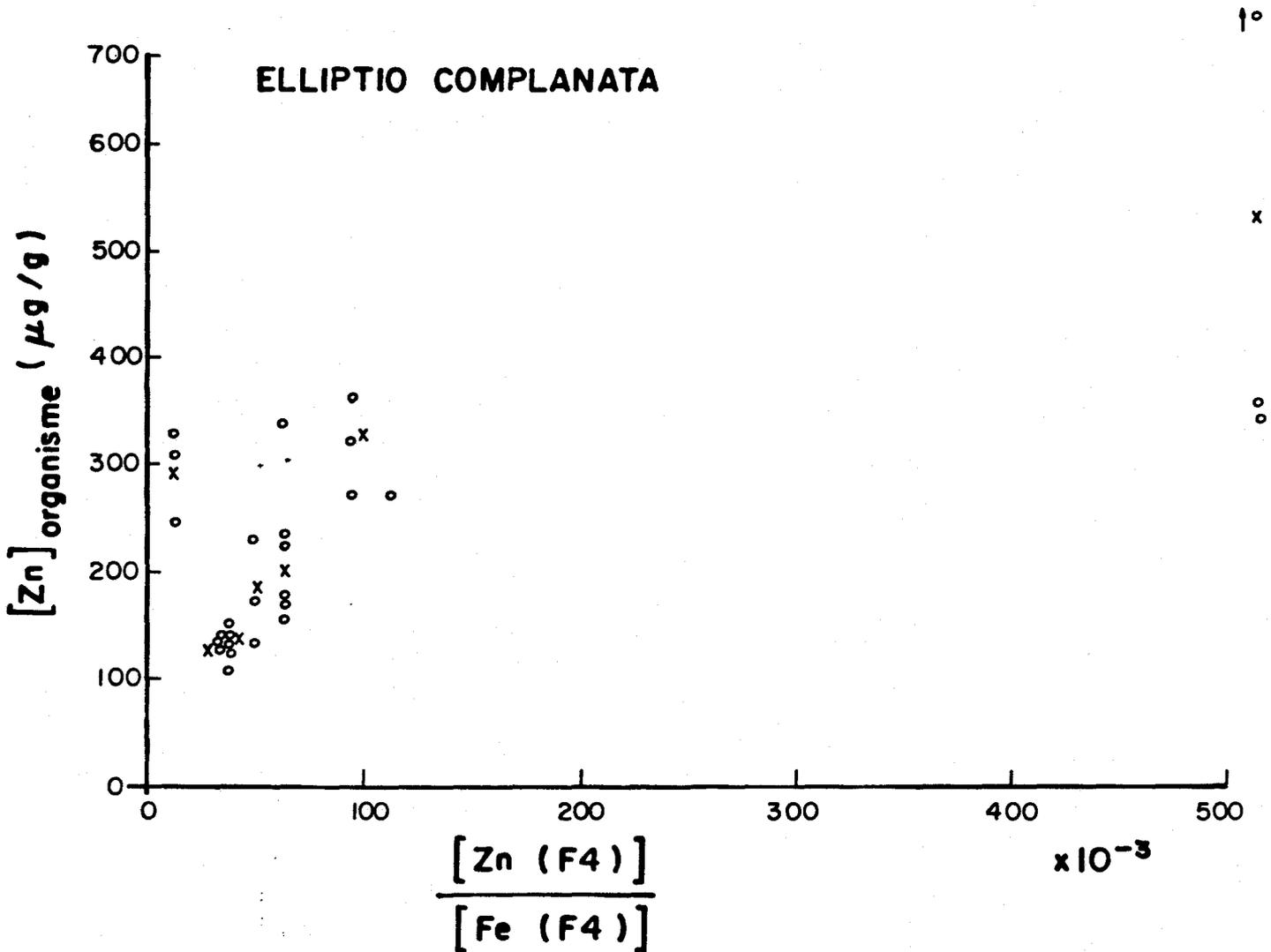


Figure 6.7: Relation entre la teneur en zinc dans *Elliptio complanata* (reconstituée avec l'équation (5.1)) et le rapport $\frac{[Zn(F4)]}{[Fe(F4)]}$ dans les sédiments (o: organismes individuels; X: valeur moyenne pour tous les organismes à une station).

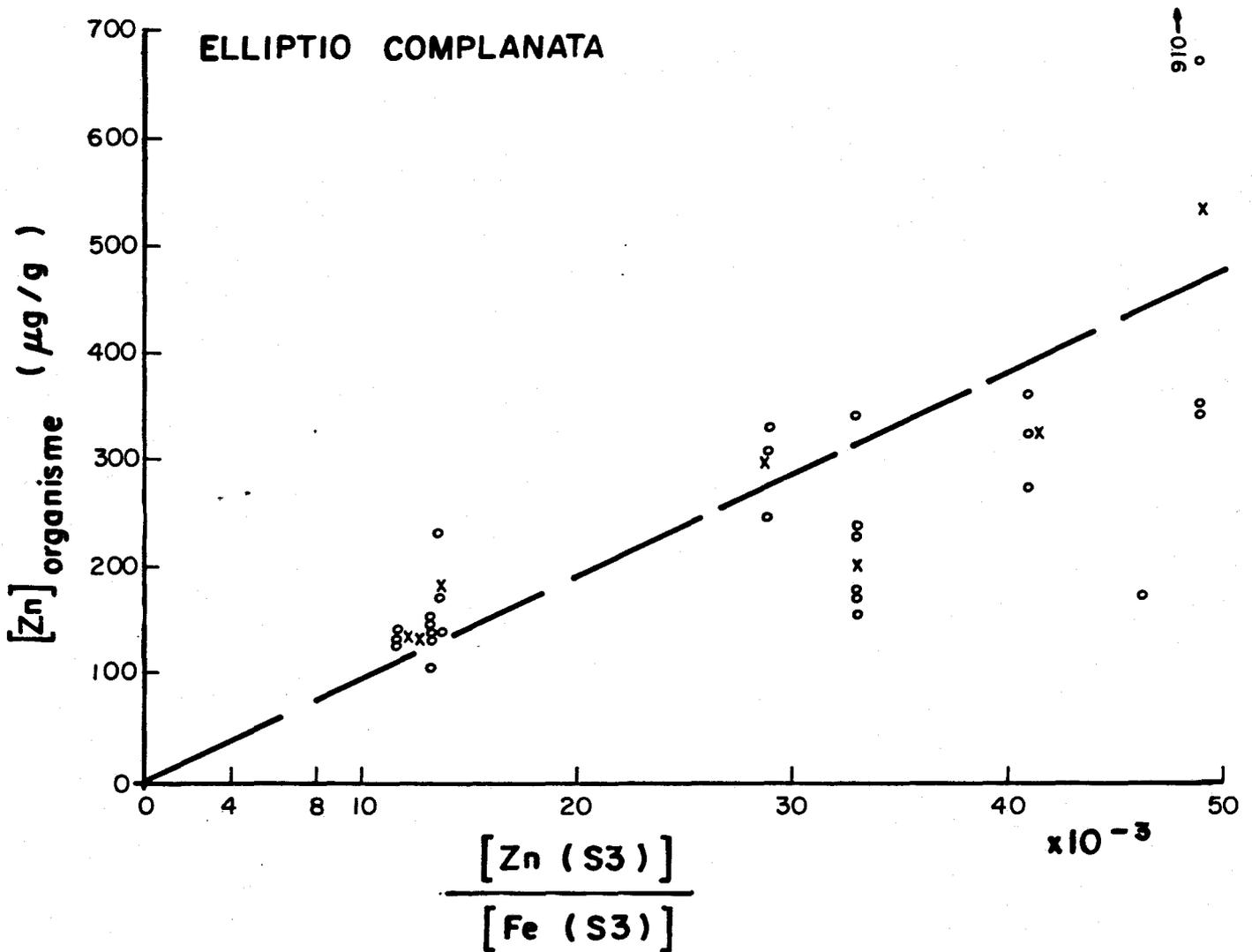


Figure 6.8: Relation entre la teneur en zinc dans *Elliptio complanata* (reconstituée avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[\text{Zn}(\text{S3})]/[\text{Fe}(\text{S3})]\}$ dans les sédiments (●: organismes individuels; X: valeur moyenne pour tous les organismes à une station).

Anodonta grandis

Les corrélations entre, d'une part, les concentrations de cuivre dans les sédiments et, d'autre part, les teneurs en cuivre dans les organes de Anodonta grandis (Tableau 6.23) sont beaucoup moins nombreuses que dans le cas de Elliptio complanata (Tableau 6.16). Les valeurs de r augmentent cependant beaucoup lorsqu'on divise les concentrations de cuivre dans les sédiments par celles de fer (comparer les Tableaux 6.23 et 6.27); on retrouve alors beaucoup de valeurs de r significativement différentes de zéro entre, d'une part, Cu(F2) ou CU(F3) et, d'autre part, les organes (ou l'organisme reconstitué) de Anodonta grandis. D'autre part, les valeurs de r augmentent généralement lorsqu'on considère les rapports $\{Cu(S2)/Fe(S2)\}$ ou $\{Cu(S3)/Fe(S3)\}$ plutôt que $\{Cu(F2)/Fe(F2)\}$ ou $\{Cu(F3)/Fe(F3)\}$; on n'atteint cependant pas les valeurs élevées de r obtenues pour Elliptio complanata (comparer les Tableaux 6.20 et 6.27). Ces différences apparentes de comportement peuvent être en partie expliquées à partir des Figures 6.9 et 6.10 où on montre les relations entre les teneurs en cuivre dans les organismes reconstitués et le rapport $\{Cu(S3)/Fe(S3)\}$ dans les sédiments. La Figure 6.9 montre tous les organismes qui ont été analysés; on y observe: i) une différence marquée entre les organismes mâles (valeurs élevées) et femelles (valeurs plus faibles); ii) une variabilité importante entre individus de même sexe à certaines stations. La Figure 6.10 montre, par contre, une amélioration nette des relations $[Cu]$ dans les organismes - $\{[Cu(S3)]/[Fe(S3)]\}$ pour les individus mâles et femelles lorsqu'on se limite à une classe d'âge (entre 5 et 6 ans). Mentionnons que les différences entre mâles et femelles s'expliquent en grande partie par la présence d'oeufs dans les femelles; les oeufs ont une teneur en cuivre plus faibles que plusieurs autres organes et leur poids est de l'ordre de 50% du poids des parties molles de l'organisme. Les teneurs en cuivre dans les différents organes peuvent également être différentes pour les mâles et les femelles; le nombre des spécimens analysés à chaque station est cependant insuffisant pour permettre d'identifier de telles différences.

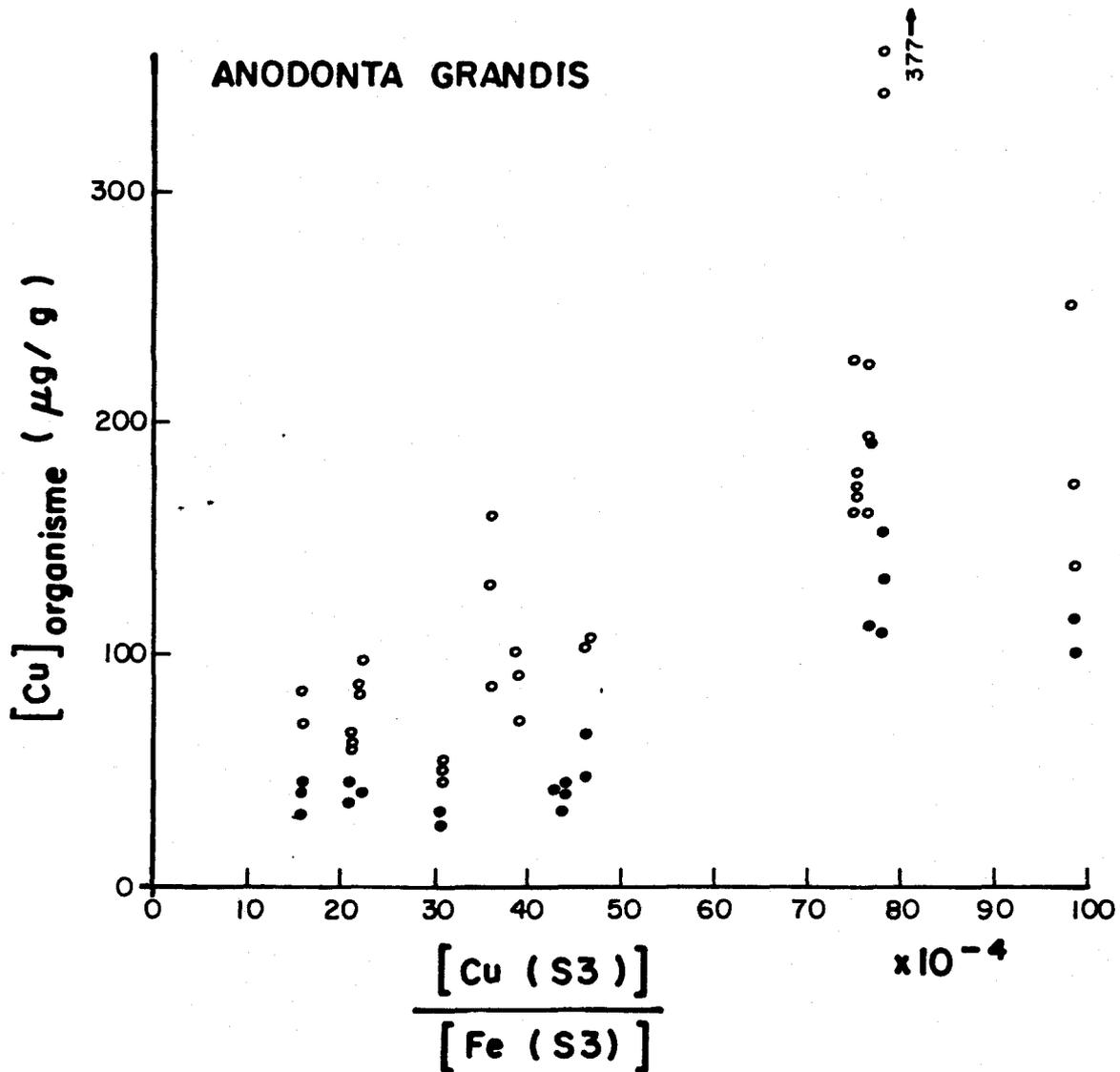


Figure 6.9: Relation entre les teneurs en cuivre dans *Anodonta grandis* (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\frac{[Cu(S3)]}{[Fe(S3)]}$ dans les sédiments (○: mâles; ●: femelles).

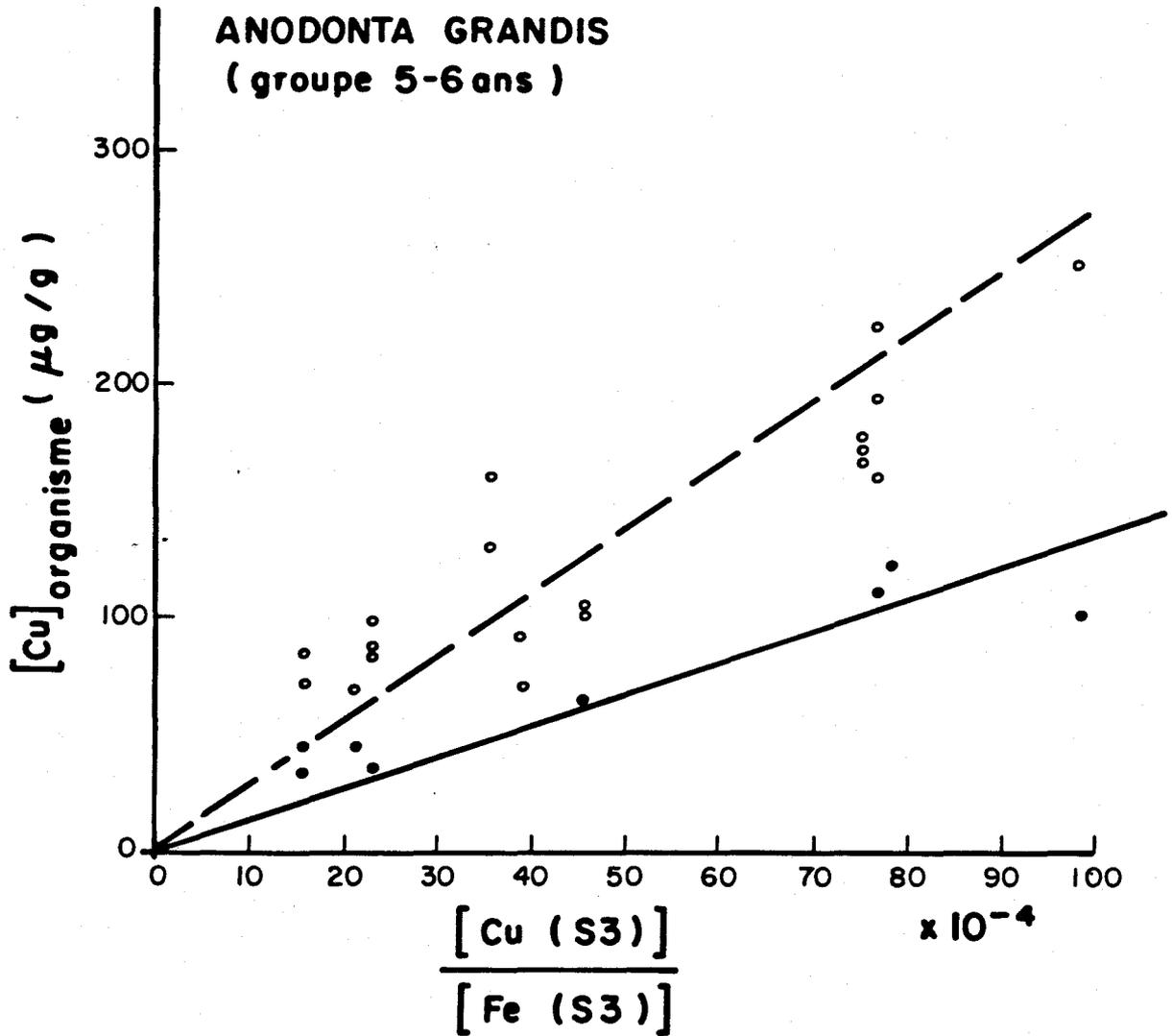


Figure 6.10: Relations entre les teneurs en cuivre dans *Anodonta grandis* pour la classe d'âge 5-6 ans (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\frac{[Cu(S3)]}{[Fe(S3)]}$ dans les sédiments (○: mâles; ●: femelles).

Comme pour Elliptio complanata, les concentrations faibles de Pb dans certains organes de Anodonta grandis ou dans certains fractions des sédiments rendent l'interprétation des résultats plus compliquée. Les branchies semblent être l'organe qui présente le plus de corrélations (Tableau 6.24); les valeurs de r augmentent dans tous les cas lorsqu'on divise la concentration de plomb dans les sédiments par celle du fer (comparer les Tableaux 6.24 et 6.28). Les Figures 6.11 et 6.12 montrent les relations entre les teneurs en plomb dans les branchies de Anodonta grandis et le rapport $\{[Pb(S3)]/[Fe(S3)]\}$. La variabilité aux stations est diminuée lorsqu'on ne considère qu'une classe d'âge (5-6 ans). De plus, d'après les deux figures, il semble que les femelles accumulent un peu plus de plomb dans les branchies que les mâles.

Les corrélations entre les teneurs en zinc dans les organes et les sédiments sont moins nombreuses pour Anodonta grandis que pour Elliptio complanata (comparer les Tableaux 6.18 et 6.25); cependant, pour les deux organismes, les corrélations avec Zn(F4) sont les plus nombreuses. De façon quasi générale, les valeurs de r sont augmentées lorsqu'on divise les concentrations de zinc dans les sédiments par celles de fer correspondantes (comparer les Tableaux 6.25 et 6.29). Pour l'organisme entier, la relation avec $\{Zn(S3)/Fe(S3)\}$, qui s'avère intéressante pour les autres métaux est présentée sur la Figure 6.13; on y constate une grande variabilité et c'est ce qui explique la valeur relativement faible du coefficient de corrélation ($r = 0.568$; $P = 0.054$). La variabilité est cependant diminuée lorsqu'on considère la classe d'âge 5-6 ans (Figure 6.14) et on semble identifier deux relations: l'une pour les mâles et l'autre pour les femelles. Comme dans le cas de Elliptio complanata, la relation entre le zinc dans l'organisme et le rapport $\{Zn(F4)/Fe(F4)\}$ semble fortement influencée par une valeur élevée de ce rapport à la station BE-16.

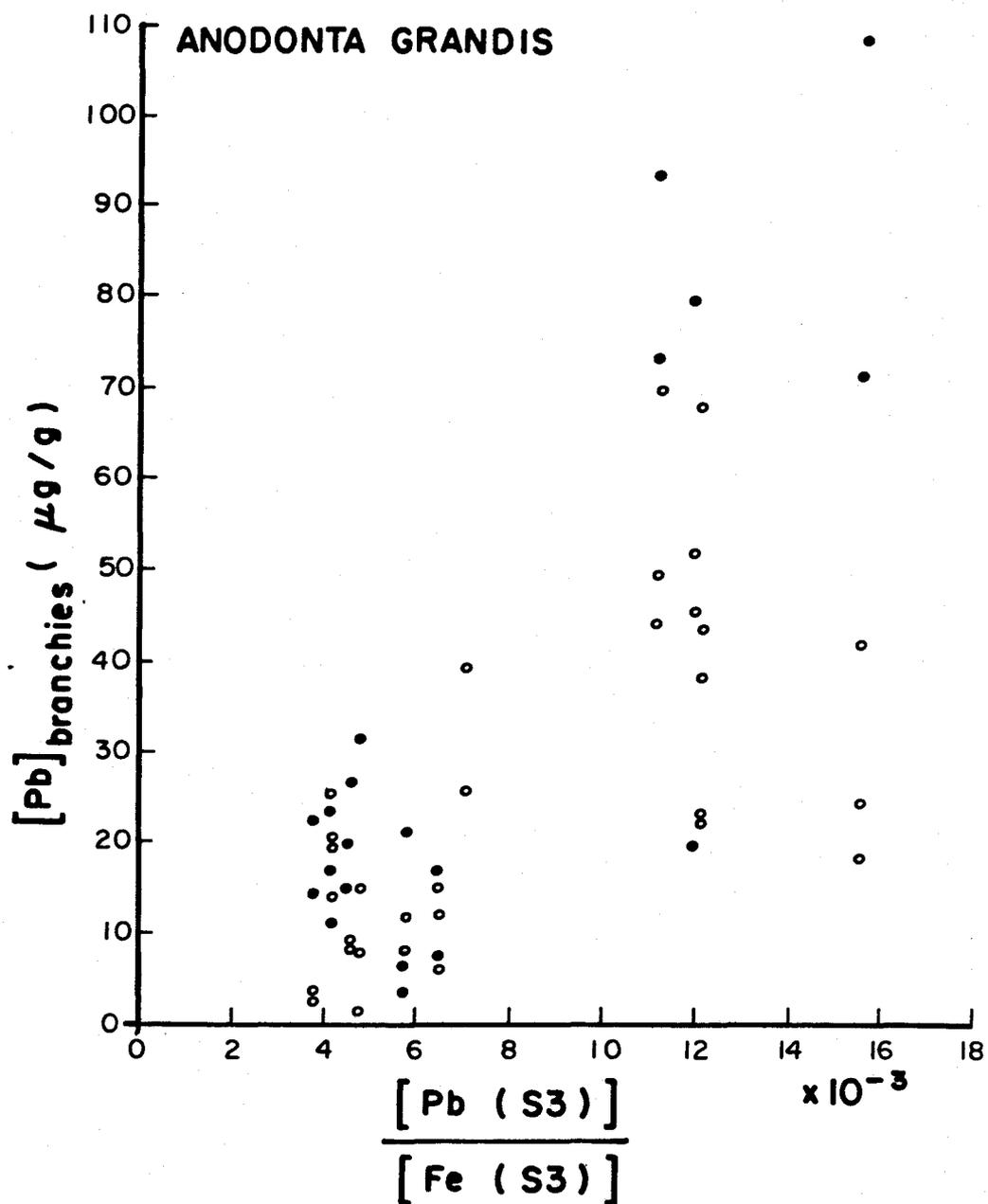


Figure 6.11: Relation entre les teneurs en plomb dans les branchies de *Anodonta grandis* et le rapport $\{[Pb(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments (o: mâles; ●: femelles).

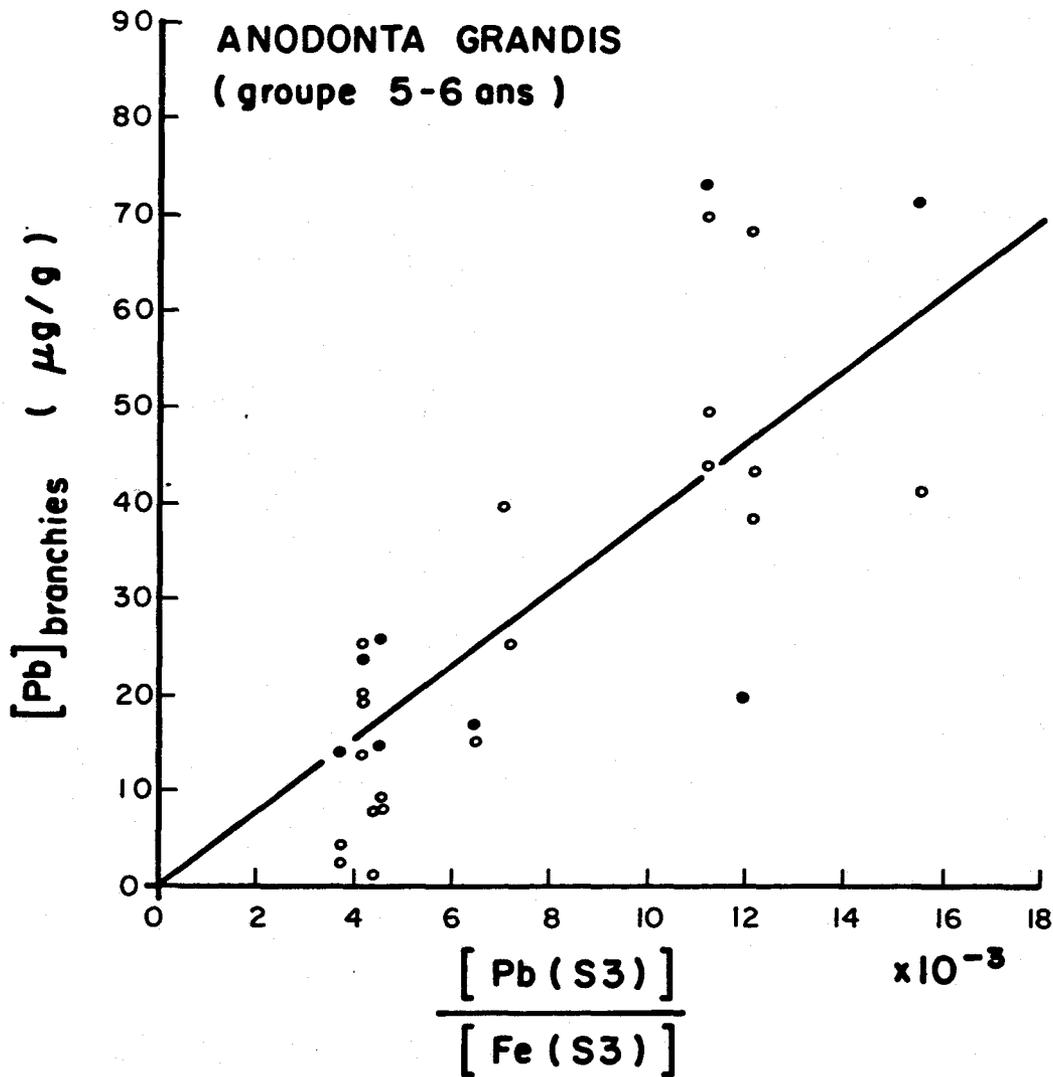


Figure 6.12: Relation entre les teneurs en plomb dans les branchies de *Anodonta grandis* pour la classe d'âge 5-6 ans et le rapport $\{[\text{Pb}(\text{S3})]/[\text{Fe}(\text{S3})]\}$ dans les sédiments (o: mâles; ●: femelles).

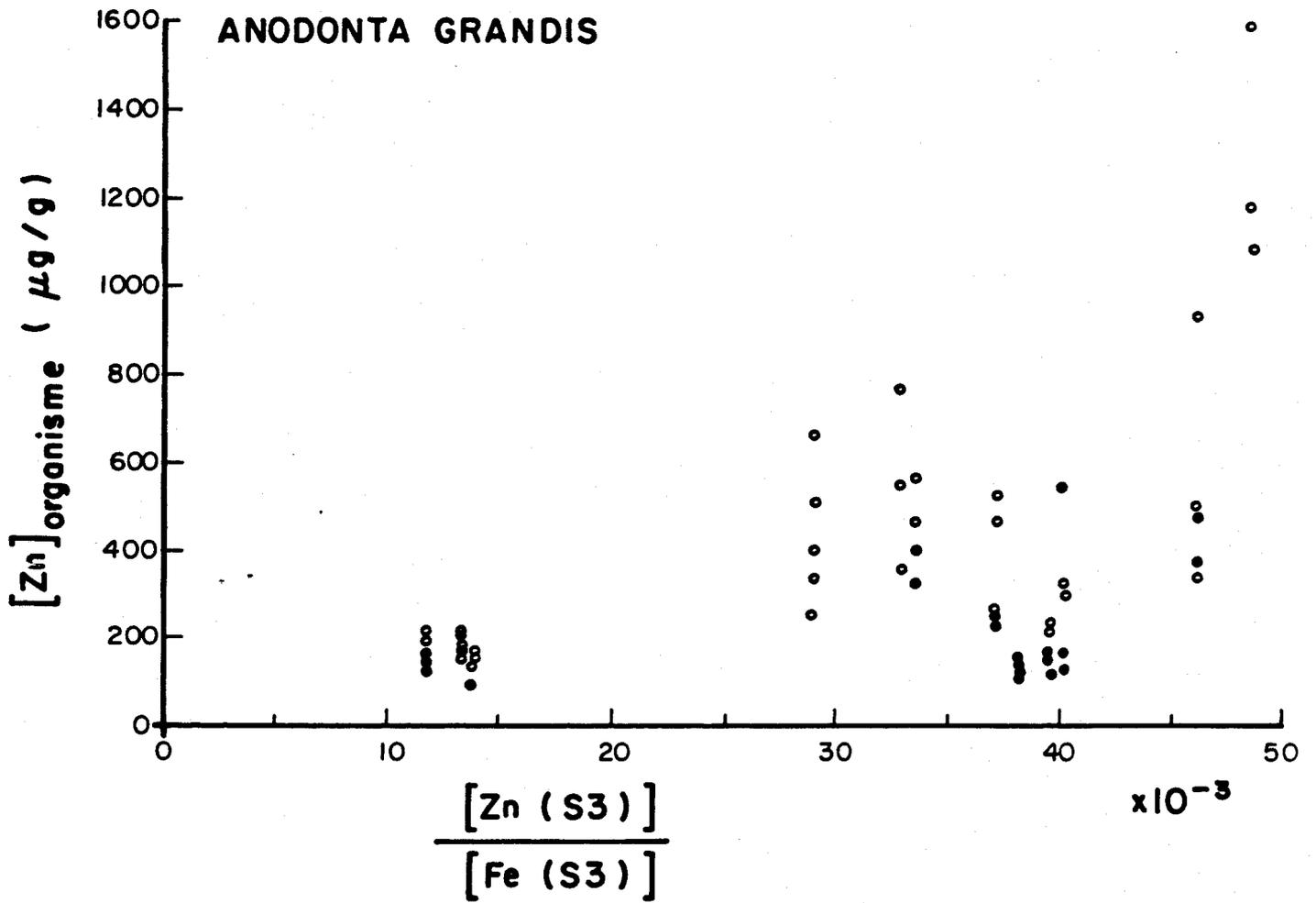


Figure 6.13: Relation entre les teneurs en zinc dans *Anodonta grandis* (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Zn(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments (o: mâles; ●: femelles).

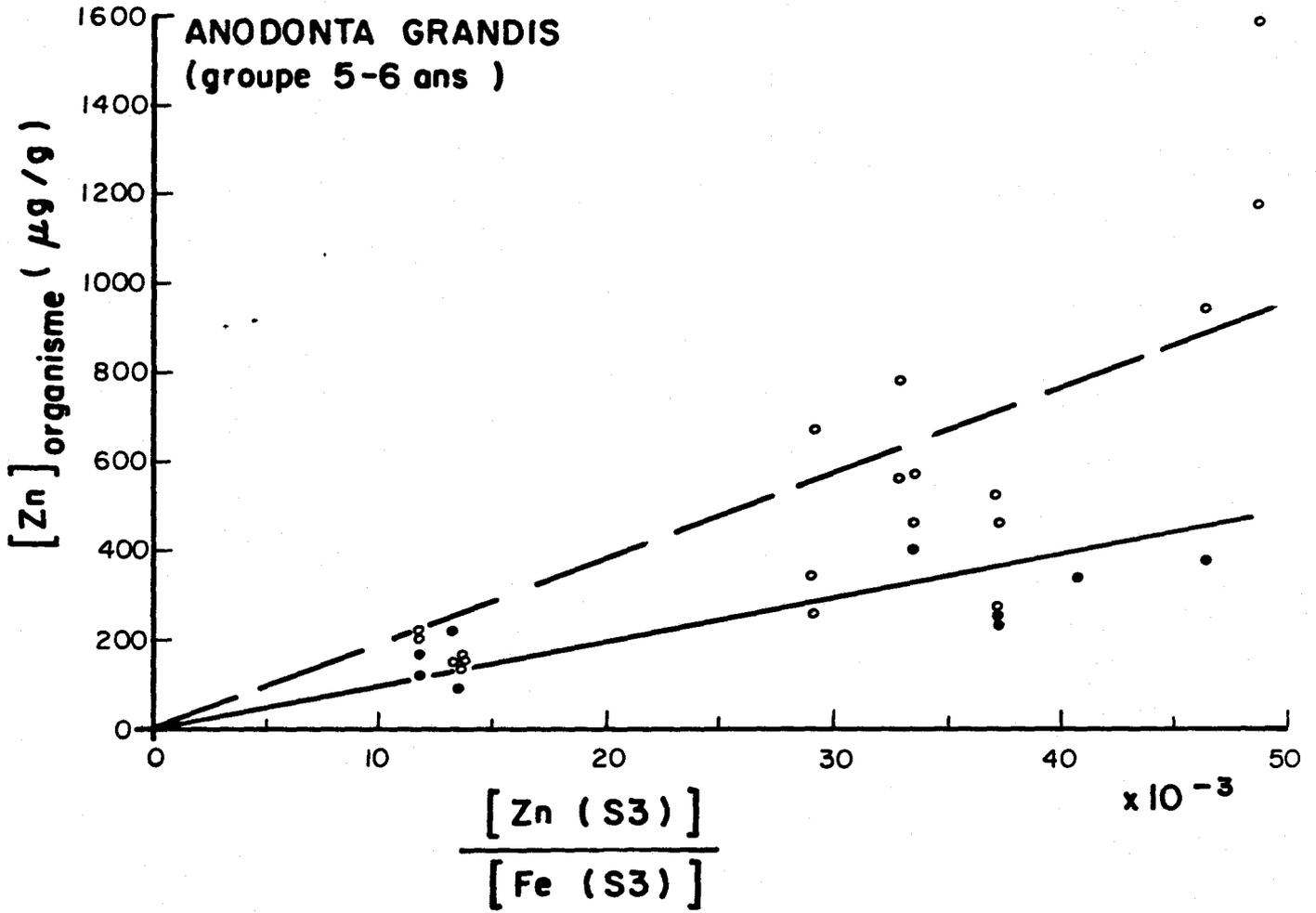


Figure 6.14: Relation entre les teneurs en zinc dans *Anodonta grandis* pour la classe d'âge 5-6 ans (reconstituées avec l'équation (5.1)) et le rapport $\{[Zn(S3)]/[Fe(S3)]\}$ dans les sédiments (o: mâles; •: femelles).

SYNTHESE

Pour éviter des répétitions, quelques commentaires communs aux deux espèces de bivalves étudiées dans ce travail sont regroupées ici, sous une rubrique commune.

- i) En considérant la partie de l'étude portant sur les relations entre la spéciation des métaux trace particulières et leur accumulation dans les bivalves, on doit être conscient des limitations de l'étude entreprise. En effet, seulement deux espèces d'organismes benthiques ont été considérées et ce, dans une seule région géographique. De plus, étant donné le temps à notre disposition pour compléter l'étude, il est évident que tous les traitements statistiques ou mathématiques possibles n'ont pu être appliqués sur les données concernant ces bivalves; au seul chapitre des corrélations linéaires, toutes les possibilités n'ont pu être exploitées. Mentionnons, par ailleurs, que le nombre d'individus analysés à chaque station constitue également une limite pour certaines analyses mathématiques ou statistiques. Finalement, soulignons que l'observation de corrélations n'implique pas nécessairement des relations de cause à effet. Malgré ces limitations, plusieurs constatations intéressantes se dégagent du travail.

- ii) Des relations importantes sont mises en évidence entre les teneurs d'un métal dans les bivalves (ou dans leurs organes) et les concentrations de ce métal dans différentes fractions géochimiques des sédiments. L'identification de ces relations $[M (\text{organisme})] - [M (\text{sédiments})]$ constitue une étape importante dans le processus d'évaluation de la fraction des métaux traces particulières qui est disponible aux organismes biologiques; les résultats de cette étude renforcent l'idée que seulement une partie des métaux traces particulières est accessible aux organismes benthiques (Jenne et Luoma, 1977). De plus, les résultats laissent entrevoir la possibilité d'utiliser des réactifs chimiques (p.e. $\text{NH}_2\text{OH.HCl} - \text{HOAc}$) pour ex-

traire des sédiments la fraction des métaux traces qui pourrait être accessible aux organismes biologiques; une fois bien identifiée la fraction des métaux biodisponible, on peut penser à définir sur une base rationnelle des normes pour les métaux traces dans les sédiments (p.e. pour les rejets industriels, pour le dragage et la disposition des résidus de dragage). Les résultats présentent également de l'intérêt dans l'optique de l'installation d'un réseau de "monitoring" des métaux traces en se servant de bivalves pour estimer les concentrations de métaux disponibles aux organismes biologiques (c.f. programme "Mussel Watch"; NRC, 1980). Pour envisager un tel réseau, il est absolument nécessaire de bien connaître les relations $[M(\text{organisme})] - [M(\text{sédiment et/ou eau})]$ et d'évaluer les facteurs qui influencent ces relations.

- iii) Les relations $[M(\text{organismes})] - [M(\text{sédiments})]$ qui ont été identifiées dans cette étude peuvent être améliorées si on s'applique à diminuer la variabilité biologique inhérente à chaque station; on constate en effet, à chaque station, des écarts-types importants qui ne sont pas dus uniquement à la variabilité analytique. Dans ce travail, on a mis en évidence des variations non négligeables de teneurs en métaux traces en fonction du sexe et de l'âge pour Anodonta grandis. D'autres variables importantes à considérer sont les dimensions (p.e. longueur), l'indice de condition et la saison du prélèvement. Etant donné le faible nombre d'individus analysés à chaque station, les données actuelles ne nous permettent pas de quantifier ces variations; il n'en demeure pas moins qu'il est essentiel de les connaître, dans l'éventualité de l'instauration d'un réseau de monitoring, si on veut générer des résultats interprétables. Les travaux les plus poussés dans ce domaine sont ceux de Boyden (1974; 1977); cet auteur a étudié en détail la relation entre la quantité de métal accumulée, Q_M , dans plusieurs bivalves marins en fonction de leur poids P . Boyden a trouvé que l'équation

$$Q_M = a p^b \quad (6.10)$$

expliquait bien la relation et que la valeur de b variait avec le métal et l'organisme étudié; des variations saisonnières étaient également identifiées. De tels travaux sur les bivalves d'eau douce n'ont cependant pas encore été effectués à notre connaissance.

- iv) Les résultats obtenus ici mettent en évidence le rôle protecteur que joue le fer présent dans les sédiments (probablement les oxydes de fer), tel que suggéré par Luoma et Bryan (1978). En effet, les meilleures relations sont généralement observées lorsqu'on divise les concentrations de métal dans les sédiments par celles du fer. Ces résultats peuvent s'expliquer de diverses façons. Par exemple, si l'ingestion des solides est une source importante de métaux traces pour le bivalve, on peut penser à deux types de compétition dans le système digestif de l'animal: a) compétition, entre Fe et le métal libérés simultanément des sédiments, pour les sites de réaction dans le système digestif; b) compétition entre les oxydes de fer (non digérés dans le tractus) et les sites de réactions dans le tractus pour le métal libéré des sédiments. Les résultats peuvent également s'expliquer même dans l'éventualité où les bivalves captent les métaux surtout à partir de la solution, si on invoque un modèle semblable à celui de Oakley (1981). En effet, ce modèle (voir la section 6.2) suggère qu'il y a équilibre entre différentes phases des sédiments et l'eau ambiante et que la concentration de métal en solution est alors inversement proportionnelle à la concentration de substrats solides qui peuvent retenir le métal (en l'occurrence ici les oxydes de fer). Dans cette optique, les oxydes de fer ne seraient probablement pas les seuls substrats capables de jouer un rôle protecteur; il s'agit là d'un aspect qui mériterait d'être étudié et qui permettrait probablement d'améliorer les relations $[M \text{ (organismes)}] - [M \text{ (sédiments)}]$. Finalement, rappelons que ces relations ne permettent pas de déterminer

par quel mécanisme (ingestion des solides -vs- absorption à partir de la solution) les métaux ont été accumulés dans les bivalves.

6.4 Bioaccumulation de métaux dans Nuphar variegatum - discussion des résultats et vérification des relations plantes/sédiments.

6.4.1 Distribution des métaux dans N. variegatum

Comparaison avec la littérature

Une revue de la littérature scientifique récente (>1968) nous a permis d'identifier un nombre limité de travaux où on avait déterminé les concentrations de métaux traces dans les nénuphars (lis d'étang: N. variegatum ou d'autres espèces). Les résultats de cette compilation sont présentés dans le Tableau 6.30. Les travaux de Hutchinson et al. (1975) et ceux de Franzin et McFarlane (1981) sont probablement les plus pertinents pour la présente étude, ayant été réalisés dans des régions influencées par des activités minières. A l'examen du tableau, on constate que les teneurs en Cu et Zn dans les plantes récoltées dans la région de Rouyn-Noranda sont comparables à celles trouvées dans d'autres milieux contaminés.*

Les résultats déjà présentés dans les sections 4.7 et 5.7 (Tableaux 4.2, 5.25, 5.26 et 5.27) montrent que la distribution des divers métaux traces dans N. variegatum est loin d'être homogène dans la plante. En effet, pour une plante donnée, ou encore pour un échantillon composite représentant un site particulier, les concentrations des métaux traces sont généralement plus élevées dans les tiges que dans les rhizomes. Comme l'illustrent les Tableaux 6.31A et B, le rapport T/R (tige/ rhizome) varie considérablement, mais ce n'est qu'à certaines stations qu'il est inférieur à 1.0. Les résultats de Hutchinson et al. (1975) pour des plantes prélevées à 8 sites dans la Baie de Wanapitei montrent une variabilité semblable: le rapport T/R y varie

* Note: N. variegatum ayant généralement des teneurs en métaux traces assez faibles par rapport à d'autres plantes aquatiques (Adams et al., 1973; Hutchinson et al., 1975; Franzin et McFarlane, 1981), on pourrait s'attendre à trouver des concentrations plus élevées dans les 4 autres espèces récoltées.

Tableau 6.30: Teneurs de divers métaux dans Nuphar sp.: revue de la littérature et comparaison avec les résultats de la présente étude.

Espèce	Partie de la plante	Concentration (µg/g, poids sec)				Référence	Endroit	Apports anthropiques
		Cu	Zn	Fe	Mn			
<u>N. variegatum</u>	rhizome tige	2-12 2-50	5-50 11-112	23-128 48-250	15-179 124-596	Cette étude	Rouyn-Noranda (Québec)	Cu, Pb, Zn
<u>N. variegatum</u>	rhizome tige	2-12 2-23	6-29 16-35	-	-	Hutchinson <u>et al.</u> , 1975	Wanapitei Bay (Ontario)	Cu, Ni
<u>N. variegatum</u>	tige et feuilles	4-7	11-274	69-73	174-264	Franzin et McFarlane, 1980	Divers lacs (Manitoba)	Cd, Cu, Pb, Zn
<u>N. variegatum</u>	plante entière	15-22	35-65	240->1100	100-3000	Adams <u>et al.</u> , 1973	Diverses rivières (Pennsylvania)	-
<u>N. lutea</u>	rhizome tige	17-48 28-108	-	-	-	Aulio, 1980	Rivière Kokemaenjoki (Finland)	Cu
<u>N. lutea</u>	plante entière	31	-	-	-	Petkova et Luhyarov, 1969	- (Ukraine)	-
<u>N. advena</u>	tige et feuilles	3	15-18	-	-	Mudroch, 1980	Big Creek Marsh (Ontario)	-
<u>N. advena</u>	tige feuilles	47-25 52-34	117-95 141-146	6010-1030 9240-1280	164-393 140-426	Cowgill, 1974	Linsley Pond (Connecticut)	-
<u>N. advena</u>	tige et feuilles	35	50	740	300	Boyd, 1970	Par Pond (South Carolina)	-
<u>N. advena</u>	tige feuilles	7 13	26 39	1100 1200	1000 600	Riemer et Toth, 1968	Diverses rivières (New Jersey)	-

Tableau 6.31A: Rapport tige/rhizome pour les concentrations de métaux dans Nuphar variegatum - échantillons composites.

Station	Cu	Zn	Fe	Mn
<u>Juillet</u>				
BE-01	1.67	1.57	1.86	2.95
BE-03	1.52	0.47	2.31	3.35
BE-13	1.38	2.75	1.84	4.10
BE-16	1.57	2.16	1.14	3.99
BR-01	1.80	0.70	0.82	2.87
BR-04	1.56	2.78	1.92	3.28
BR-06	1.50	1.93	1.67	2.80
BR-11	14.0	2.98	2.01	7.39
LR-09 ^α	2.40	8.45	1.21	4.39
LR-13	1.27	6.18	3.46	2.11
LR-15 ^α	2.15	3.69	1.30	2.14
LR-16	0.69	0.63	1.31	2.11
LR-17	2.54	3.67	1.68	2.68
PE-01	0.42	0.97	3.73	19.3
<u>Septembre</u>				
BE-01	0.67	1.60	3.15	4.15
BR-11	4.04	3.25	3.56	2.62
MO-01 ^α	1.16	0.79	3.32	2.71
MO-02 ^α	0.86	1.71	3.60	2.78

^α Valeur moyenne pour les plantes analysées séparément; voir le Tableau 6.31B.

Tableau 6.31B: Rapport tige/rhizome pour les concentrations de métaux dans Nuphar variegatum - échantillons individuels.

Station ^a	Cu	Zn	Fe	Mn
LR-09 01	1.57	7.44	0.74	4.71
LR-09 02	2.41	7.54	2.14	4.14
LR-09 03	3.49	7.54	0.96	2.31
LR-09 04	2.28	16.2	1.52	3.64
LR-09 05	2.25	3.49	0.70	7.13
Moyenne	<u>2.40</u>	<u>8.44</u>	<u>1.21</u>	<u>4.39</u>
Ecart-type	0.69	4.69	0.61	1.77
CV (%) ^b	29	55	50	40
LR-15 01	1.06	4.28	2.75	2.54
LR-15 02	1.74	2.57	0.85	1.85
LR-15 03	1.78	5.66	0.98	2.66
LR-15 04	4.33	3.32	0.62	2.10
LR-15 05	1.85	2.62	1.31	1.57
Moyenne	<u>2.15</u>	<u>3.69</u>	<u>1.30</u>	<u>2.14</u>
Ecart-type	1.26	1.30	0.85	0.46
CV (%) ^b	58	35	65	21
MO-01 01	0.63	0.94	5.53	2.78
MO-01 02	0.65	0.52	3.03	1.99
MO-01 03	2.21	0.69	3.57	3.25
MO-01 04	0.90	0.83	2.22	2.67
MO-01 05	1.42	0.97	2.27	2.85
Moyenne	<u>1.16</u>	<u>0.79</u>	<u>3.32</u>	<u>2.71</u>
Ecart-type	0.67	0.18	1.35	0.46
CV (%) ^b	58	23	41	17
MO-02 01	0.61	0.87	4.58	3.21
MO-02 02	0.97	2.65	4.31	2.43
MO-02 03	0.84	2.17	3.56	3.08
MO-02 04	0.72	1.71	3.30	1.80
MO-02 05	1.16	1.17	2.23	3.39
Moyenne	<u>0.86</u>	<u>1.71</u>	<u>3.60</u>	<u>2.78</u>
Ecart-type	0.21	0.72	0.93	0.66
CV (%) ^b	24	42	26	24
BE-01 01	0.80	1.44	2.64	3.78
BE-01 02	0.54	1.77	3.66	4.52

^a Les notations 01 → 05 indiquent qu'il s'agit d'échantillons individuels prélevés à la station indiquée.

^b CV: coefficient de variation.

de 3.6 à 0.4 pour le Cu et de 4.0 à 1.0 pour le Zn. Dans nos résultats, comme dans ceux de la Baie de Wanapitei, il semble se manifester une tendance vers des rapports T/R plus élevés aux stations les plus "contaminées".

Toujours au sujet des teneurs de métaux traces dans N. variegatum, il importe de se rappeler des résultats initiaux obtenus pour la distribution du Cu et du Zn à l'intérieur même du rhizome (Tableau 4.2). Aucune autre référence à ce genre de variation "longitudinale" des concentrations de métaux dans le rhizome n'a été réperée dans la littérature scientifique, ni pour Nuphar sp ni pour d'autres macrophytes possédant des rhizomes. Quelques chercheurs ont cependant signalé une telle variation pour les parties vertes (tiges) de certaines plantes émergentes. Par exemple, pour le roseau Phragmites australis, Schierup et Larsen (1981) ont noté que les teneurs en Zn dans les tiges étaient plutôt faibles pour les premiers 20 cm mais augmentaient ensuite; les métaux Cd, Cu et Pb ne montraient pas cette tendance. Par ailleurs, Mudroch et Capobianco (1978) ont trouvé le résultat contraire pour la massette (quenouille) Typha latifolia; les premiers 40 cm des tiges contenaient plus de Cu et de Ni que les sections 40-70 cm. Dans le cas présent, le gradient longitudinal des concentrations en Cu et Zn en fonction de l'âge du rhizome suggère que l'assimilation de ces éléments se produit surtout dans la partie jeune du rhizome (section 0-1 an), ou encore qu'il existe une translocation basipète de ces métaux de la tige vers le rhizome avec entreposage subséquent dans la partie nouvellement formée du rhizome.

Variation saisonnière

Une variation saisonnière des concentrations de certains métaux traces dans des macrophytes a été notée par quelques chercheurs (Tableau 6.32), mais nous n'avons pu trouver aucune étude de la variation

Tableau 6.32: Variation saisonnière des teneurs en métaux traces dans des macrophytes.

Espèce	Partie de la plante	Métal	Tendance	Référence
<u>Ceratophyllum demersum</u>	plante entière (pas de racines)	Cd, Pb	Accumulation mai → juillet, suivie de diminution	Mayes et McIntosh, 1975
<u>Elodea canadensis</u>	plante entière (avec racines)	Cd, Pb	Accumulation juin → mi-juillet, suivie de diminution	Mayes <u>et al.</u> , 1977
<u>Nymphaea odorata</u>	tige et feuilles	Cr	Stable avril → juin; diminution juin → août	Mudroch et Capobianco, 1978
<u>Myriophyllum heterophyllum</u>	tige et feuilles	Zn	Diminution avril → juin; légère augmentation juin → août	Mudroch et Capobianco, 1978
<u>Typha latifolia</u>	tiges (0-40 cm) et feuilles	Cd, Pb, Ni	Accumulation avril → juin-juillet, suivie de diminution → août	Mudroch et Capobianco, 1978
	rhizomes	Cu, Pb, Zn	Diminution avril → juillet suivie d'augmentation → septembre	Mudroch et Capobianco, 1978
<u>Equisetum arvense</u>	tiges et feuilles	Cd, Cu, Pb, Zn	Juillet = septembre	Ray et White, 1979
	rhizomes	Cd, Cu, Pb, Zn	Juillet > septembre	Ray et White, 1979
<u>Phragmites australis</u>	tiges et feuilles	Cu, Zn	assez stable juillet → octobre; diminution octobre → avril	Larsen et Schierup, 1981

chez N. variegatum. Pour les plantes immergées (quatre premières espèces dans le tableau), on note une légère tendance d'accumulation des métaux Cd, Cr, Ni et Pb au cours de la phase de croissance, suivie d'une diminution des teneurs en ces éléments vers la fin de l'été; le Zn chez Myriophyllum montre le comportement contraire. En ce qui concerne les 3 plantes émergentes (trois dernières espèces dans le tableau), les concentrations de plusieurs métaux traces (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn) dans les parties vertes de la plante (tige + feuilles) diminuent au cours de la période annuelle de croissance. Pour les parties souterraines, cependant, il y a trop peu d'études pour pouvoir déceler de tendance commune: chez Typha latifolia, les niveaux de Cu, Pb et Zn baissent d'avril à juillet mais augmentent de nouveau vers la fin de l'été (Mudroch et Capobianco, 1978) alors que dans Equisetum arvense, on rapporte une réduction des concentrations en Cd, Cu, Pb et Zn entre juillet et septembre (Ray et White, 1979: 2 prélèvements seulement).

Dans la présente étude, comme mentionné dans la section 5.7.2 (Tableau 5.27), les résultats obtenus aux mois de juillet et de septembre montrent des différences importantes pour certains métaux, en particulier dans les tiges. Les teneurs en fer (tiges et rhizomes) et en cuivre (tiges) ont diminué de manière appréciable aux deux stations étudiées, en accord avec les résultats cités ci-haut pour les plantes émergentes, mais il serait évidemment prématuré de tirer des conclusions définitives relativement à la variabilité saisonnière des teneurs en ces éléments à partir des quelques résultats rapportés ici. Dans une perspective d'employer N. variegatum comme indicateur biologique des métaux, cependant, les résultats actuels montrent clairement l'importance de prélever des spécimens au même stade de croissance. Pour cette raison, lors de l'analyse statistique des résultats, nous avons considéré séparément les plantes prélevées en juillet et celles récoltées en septembre.

Corrélations entre métaux (tiges ou rhizomes)

Dans le but de mettre en évidence des relations entre métaux (Cu, Zn, Fe, Mn), nous avons calculé des coefficients de corrélation linéaire entre métaux en nous servant soit des concentrations mesurées dans les rhizomes, soit de celles observées pour les tiges. Dans tous les cas, la représentation graphique correspondant à chaque paire de métaux fut examinée, afin d'éliminer les "fausses" corrélations où une seule station améliorerait indûment le coefficient de corrélation. De même, si l'inspection visuelle d'un graphique révélait une relation possible obscurcie par un point (c'est-à-dire une station) qui s'écartait beaucoup des autres points et affaiblissait indûment la valeur de r , on recalculait le coefficient de corrélation en supprimant cette station "aberrante". La Figure 6.15, qui montre la relation entre le cuivre et le manganèse dans les tiges de Nuphar variegatum, fournit un exemple de ce deuxième type de comportement; le point no 8, qui correspond aux plantes récoltées à la station BR-11, se différencie nettement des 21 autres points. En supprimant ce point, la valeur du coefficient de corrélation passe de -0.20 (non significatif) à -0.53 (significativement différent de zéro au niveau de 5%). A l'examen du Tableau 6.33, qui regroupe toutes les corrélations significatives observées, on constatera que c'est presque toujours la station BR-11 qui se différencie de cette manière des autres stations, aussi bien lors de l'échantillonnage de juillet que pour celui de septembre. La particularité de cette station se manifeste par des teneurs très élevées en cuivre dans les tiges de N. variegatum, mais non dans les rhizomes. Les sédiments superficiels (0-2 cm) à la station BR-11 se différencient eux aussi de ceux des autres stations, la concentration de cuivre dans la fraction F3 (oxydes de Fe, Mn) étant nettement plus élevée qu'aux autres stations (Tableau 5.12).

Considérons maintenant l'ensemble des résultats (Tableau 6.33), en examinant d'abord les relations mises en évidence dans les tiges. La corrélation positive entre Cu et Zn, observée pour les deux groupes de stations considérés (Figures 6.16 et 6.17), reflète vraisemblablement

Figure 6.15: Relation entre les teneurs de cuivre et de manganèse dans les tiges de Nuphar variegatum - stations échantillonnées en juillet.

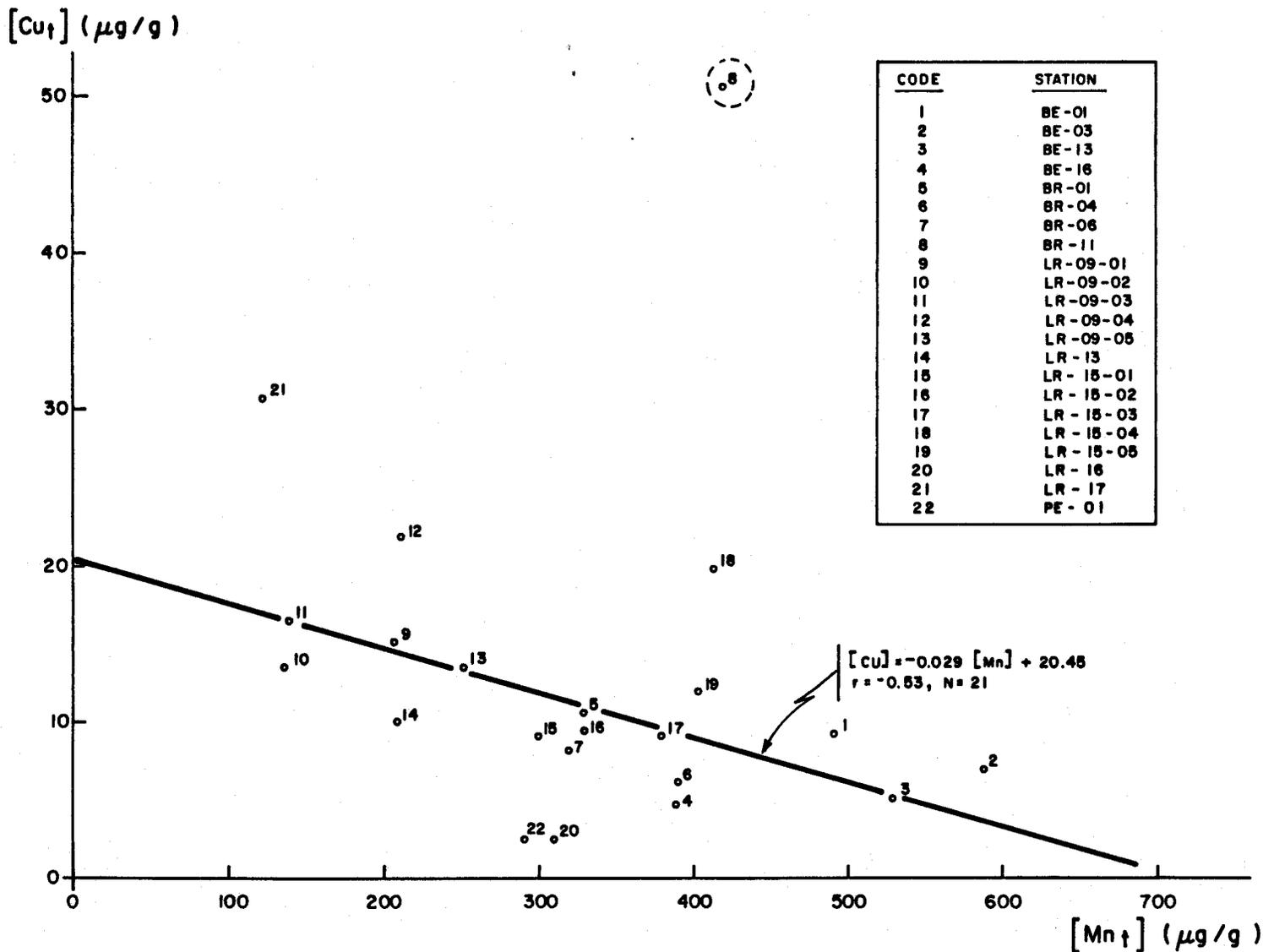


Tableau 6.33: Corrélations entre métaux dans les tiges ou dans les rhizomes de Nuphar variegatum.

Partie de la plante	Groupe de stations	Métaux	N	Stations éliminées ^a	Coefficient de corrélation ^b
tige	1 ^c	Cu, Zn	22	-	(+0.39)
			21	BR-11	<u>+0.59</u>
			20	BR-11, LR-17	<u>+0.79</u>
		Cu, Mn	22	-	(-0.20)
			21	BR-11	-0.53
		Zn, Mn	22	-	<u>-0.56</u>
rhizome	1 ^c	Zn, Mn	22	-	(+0.41)
tige	2 ^d	Cu, Zn	13	-	+0.75
			12	BR-11	<u>(+0.55)</u>
		Cu, Fe	13	-	(+0.31)
			12	BR-11	<u>+0.81</u>
		Zn, Mn	13	-	(+0.41)
			12	BR-11	<u>+0.75</u>
rhizome	2 ^d	Zn, Fe	13	-	+0.61

- ^a Après inspection visuelle des graphiques (métal x vs métal y), certaines stations furent éliminées pour fins de calcul du coefficient de corrélation (ex.: voir les figures 6.15 à 6.17).
- ^b Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles qui ne sont pas significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).
- ^c Stations BE-01, 03, 13, 16; BR-01, 04, 06, 11; LR-09-01, 02, 03, 04, 05; LR-13; LR-15-01, 02, 03, 04, 05; LR-16, 17; PE-01; échantillonnées au mois de juillet.
- ^d Stations MO-01-01, 02, 03, 04, 05; MO-02-01, 02, 03, 04, 05; BE-01-01, 02; BR-11; échantillonnées au mois de septembre.

Figure 6.16: Relation entre les teneurs de zinc et de cuivre dans les tiges de Nuphar variegatum - stations échantillonnées en juillet.

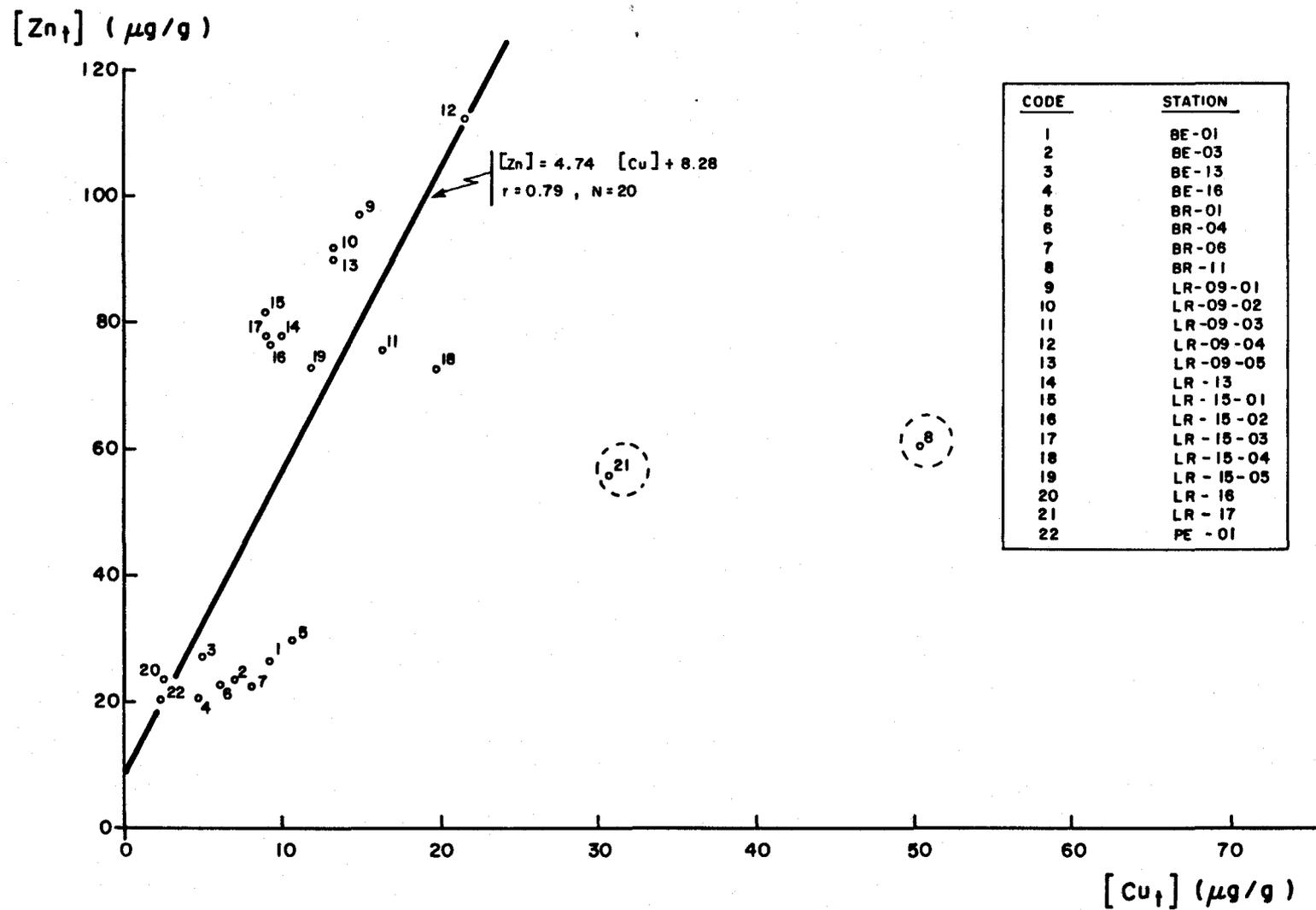
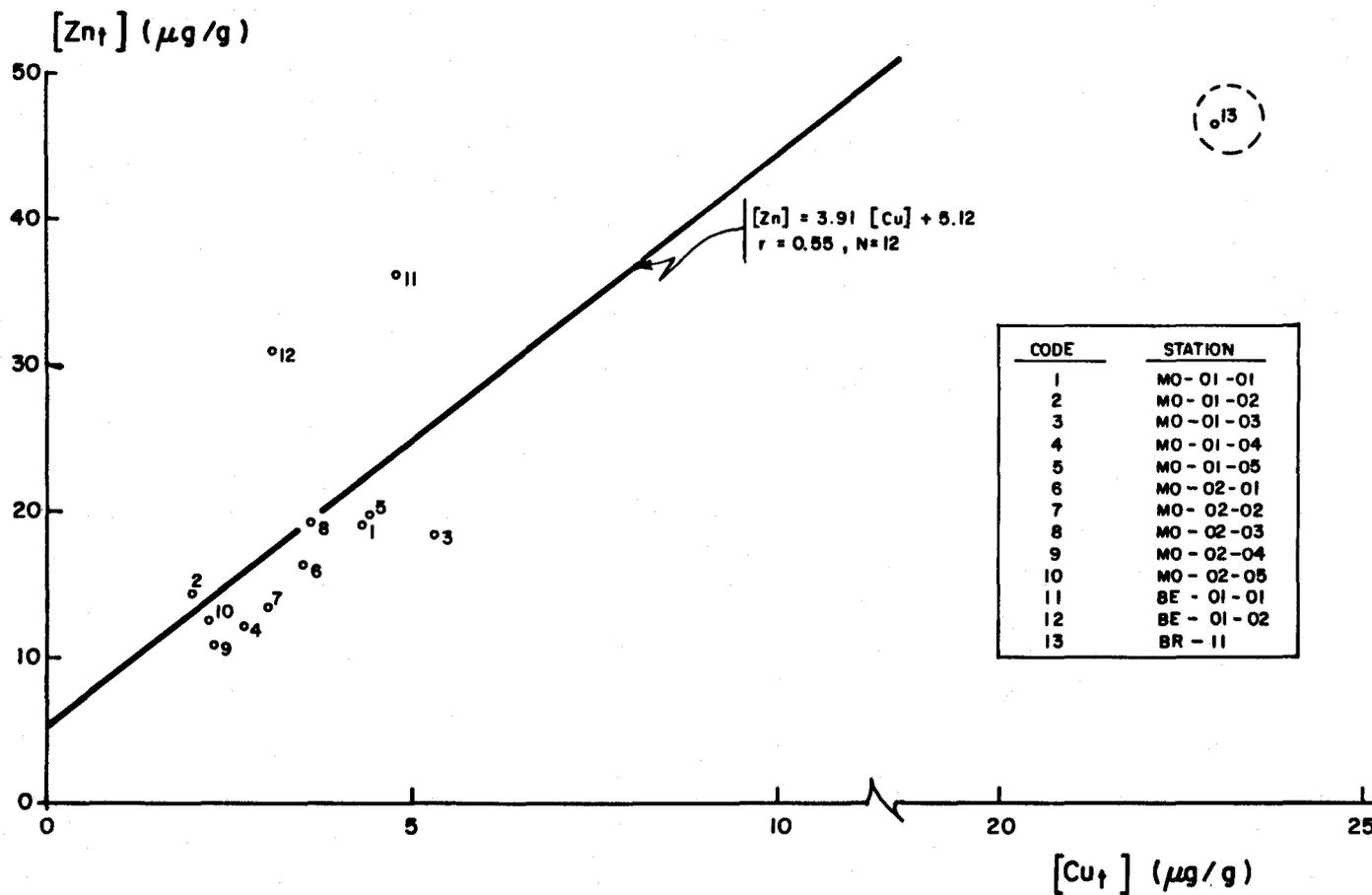


Figure 6.17: Relation entre les teneurs de zinc et de cuivre dans les tiges de Nuphar variegatum - stations échantillonnées en septembre.



la présence d'une source anthropique commune pour ces deux métaux, à savoir les activités minières dans la région (BEST, 1979). Les corrélations négatives Cu-Mn et Zn-Mn, notées pour le premier groupe de stations seulement (Figures 6.15 et 6.18), suggèrent la possibilité d'une compétition du manganèse au niveau de l'assimilation de cuivre ou de zinc (c'est-à-dire, si la disponibilité de Mn augmente, l'assimilation de Cu et/ou de Zn diminue). Ce lien entre l'assimilation de Mn, Cu et Zn demeure cependant faible et plutôt spéculatif, puisque pour les plantes prélevées en septembre au second groupe de stations, il disparaît (Cu) ou même s'inverse (Zn) - voir Tableau 6.33. Quant aux métaux trouvés dans les rhizomes, ils montrent moins de corrélations significatives entre eux que les métaux dans les tiges: les seules relations à se manifester impliquent le zinc, soit avec le manganèse (1er groupe de stations), soit avec le fer (2ème groupe de stations).

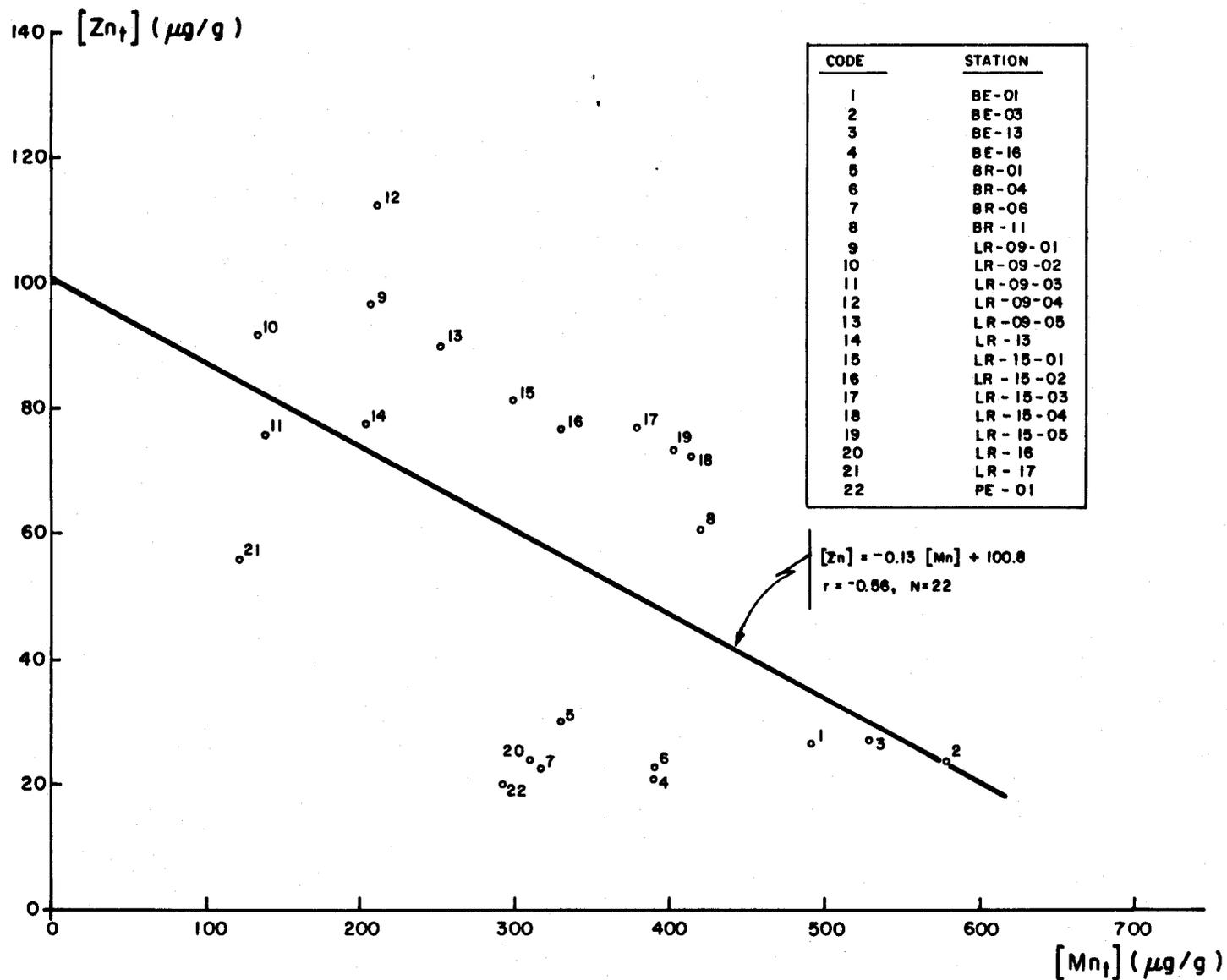
Corrélations entre les teneurs en métaux dans les rhizomes et celles dans les tiges

A l'instar de Chiaudani (1969) et de Welsh et Denny (1980), nous avons également vérifié les corrélations pour un même métal entre les rhizomes et les tiges de N. variegatum, afin de vérifier l'hypothèse voulant qu'il existe une assimilation appréciable de certains métaux par le rhizome et une translocation acropète vers les tiges. Selon le schéma simple présenté sur la Figure 6.19, le métal assimilé au niveau du rhizome, M_c , peut demeurer dans le rhizome, M_r (entreposage), ou être transporté vers la tige, M_t . Si on suppose un équilibre entre les concentrations de M_c , M_r et M_t , on aura:

$$M_c \xrightleftharpoons{K_r} M_r \quad ; \quad K_r = \frac{[M_r]}{[M_c]} \quad (6.11)$$

$$M_c \xrightleftharpoons{K_t} M_t \quad ; \quad K_t = \frac{[M_t]}{[M_c]} \quad (6.12)$$

Figure 6.18: Relation entre les teneurs de zinc et de manganèse dans les tiges de Nuphar variegatum - stations échantillonnées en septembre.



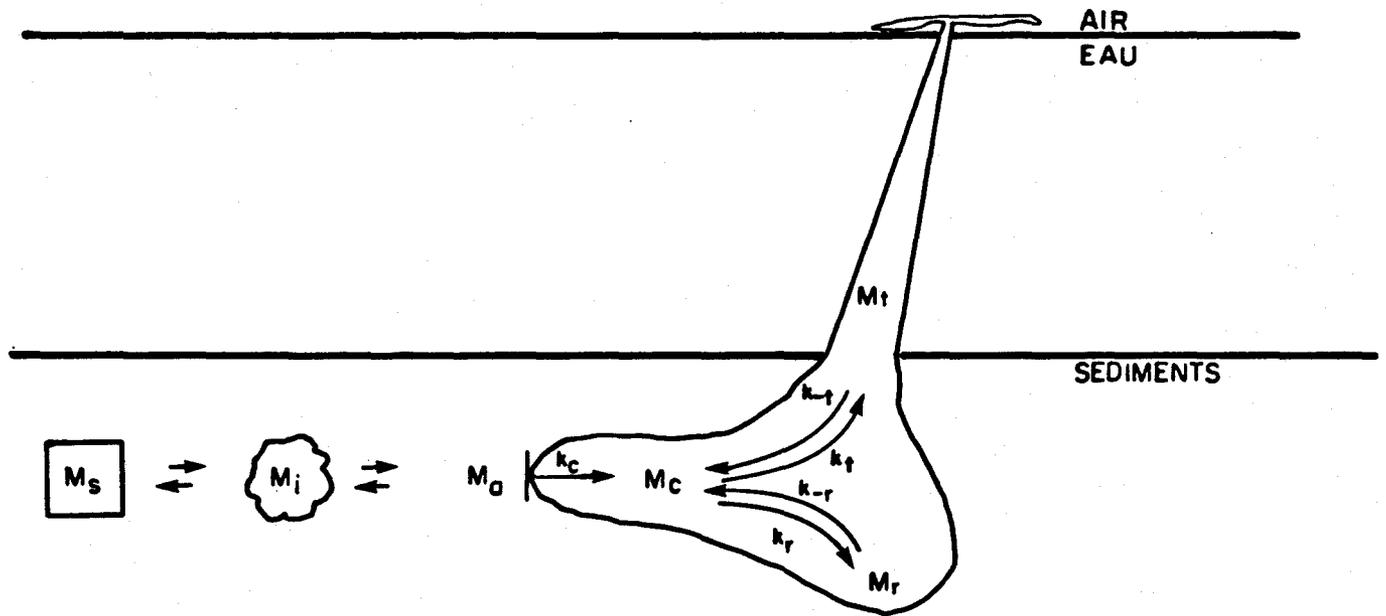


Figure 6.19: Schéma simplifié de la bioaccumulation de métaux par *Nuphar variegatum* à partir des rhizomes, M_s = métal dans les sédiments; M_i = métal dans l'eau interstitielle; M_a = métal retenu à l'extérieur du rhizome; M_c = métal cellulaire en solution dans le rhizome; M_r = métal entreposé dans le rhizome; M_t = métal entreposé dans la tige.

En combinant (6.11) et (6.12), on obtient:

$$[M_t] = \frac{K_t}{K_r} [M_r] \quad (6.13)$$

où K_t et K_r sont des constantes d'équilibre.

Si par contre, on suppose un flux continu de métal vers la plante, on peut écrire, en faisant l'hypothèse de réactions d'ordre 1:

$$v_{M_c} = \frac{d[M_c]}{dt} = k_c [M_a] \quad (6.14)$$

$$v_{M_r} = \frac{d[M_r]}{dt} = k_r [M_c] \quad (6.15)$$

$$v_{M_t} = \frac{d[M_t]}{dt} = k_t [M_c] \quad (6.16)$$

où k_c , k_r et k_t sont des constantes de vitesse. Si on fait l'hypothèse que $[M_a] = \text{cte}$ (c'est-à-dire que l'équilibre d'adsorption est atteint rapidement et que la quantité de métal assimilé par la plante est faible par rapport aux quantités disponibles dans les sédiments adjacents), l'intégration de (6.14) mène à:

$$[M_c] = k_c [M_a] t \quad (6.17)$$

En combinant (6.15), (6.16) et (6.17) et en intégrant, on obtient:

$$[M_t] = \frac{k_t}{k_r} [M_r] \quad (6.18)$$

Les équations (6.13) et (6.18) montrent que si le schéma de la Figure 6.19 est valable et si les constantes d'équilibre (ou constantes de vitesse) sont les mêmes pour chacune des plantes, on devrait observer des corrélations linéaires entre $[M_t]$ et $[M_r]$. Selon les résultats

de l'analyse statistique (Tableau 6.34), il existe des corrélations positives entre $[M_r]$ et $[M_t]$ pour le manganèse (1er et 2ème groupes de stations; Figure 6.20), le cuivre (1er groupe; Figure 6.21) et le fer (2ème groupe); le zinc se distingue par l'absence d'une telle relation. Il semble donc que le mécanisme représenté à la Figure 6.19 joue un rôle mineur, sinon qu'il est inopérant, pour le zinc.

Nous avons également voulu vérifier la possibilité d'une inhibition de la part du fer ou du manganèse sur l'assimilation des métaux traces (Cu, Zn: cf. Vorob'yev et Afanas'yeva, 1973; Lee et al., 1976). Par exemple, si les concentrations de fer ou de manganèse augmentaient dans le rhizome, ces métaux pourraient possiblement y jouer un rôle semblable à celui qu'ils jouent dans le milieu aquatique même, en retenant le cuivre et/ou le zinc assimilé (c'est-à-dire, piéger ces derniers dans le rhizome et empêcher leur transport vers la tige). Par ailleurs, s'il existait une compétition entre métaux au niveau du rhizome (M_c) pour emprunter la voie de la translocation vers la tige, des teneurs élevées de manganèse ou de fer dans le rhizome pourraient inhiber la translocation acropète de cuivre ou de zinc. En effet, au 1er groupe de stations, on observe une corrélation positive entre $([Cu_r]/[Mn_r])$ et $[Cu_t]$; à $[Cu_r]$ constante, plus il y a de manganèse dans le rhizome, moins il y a de cuivre dans la tige. Rappelons que pour ces mêmes stations le manganèse et le cuivre montrent une corrélation négative dans les tiges (Figure 6.15). La corrélation entre $([Cu_r]/[Mn_r])$ et $[Cu_t]$ n'est cependant pas meilleure que la corrélation directe entre $[Cu_r]$ et $[Cu_t]$; on ne peut donc conclure que le manganèse joue un rôle important d'inhibition. En ce qui concerne le rôle du fer, on observe une faible corrélation négative entre $([Zn_r]/[Fe_r])$ et $[Zn_t]$ pour les plantes prélevées aux sites appartenant au 1er groupe de stations. A $[Zn_r]$ constante, plus il y a de fer dans le rhizome, plus il y a de zinc dans la tige, c'est-à-dire l'inverse de ce que l'on aurait prédit selon les deux mécanismes d'inhibition proposés ci-dessus. Aucune explication physico-chimique de ce comportement ne semble s'offrir; cette relation, si elle est réelle, doit avoir une explication d'ordre biochimique ou physiologique.

Tableau 6.34: Corrélations entre les teneurs de métaux dans les tiges de Nuphar variegatum et les teneurs de métaux dans les rhizomes.

Groupe de stations	Métaux		N	Stations éliminées ^a	Coefficient de corrélation ^b
	Rhizome	Tige			
1 ^c	Mn	Mn	22	-	<u>+0.65</u>
	Cu	Cu	22	-	(+0.26)
			21	BR-11	<u>+0.72</u>
	Zn/Fe	Zn	22	-	(-0.28)
			21	LR-15-04	-0.44
	Cu/Mn	Cu	22	-	(+0.14)
			20	BR-11; PE-01	<u>+0.73</u>
	2 ^d	Fe	Fe	13	-
Mn		Mn	13	-	<u>+0.68</u>

- ^a Après inspection visuelle des graphiques (M_r vs M_t), certaines stations furent éliminées pour fins de calcul du coefficient de corrélation (ex.: voir les Figures 6.20 à 6.21).
- ^b Les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles qui ne sont pas significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses).
- ^c Stations BE-01, 03, 13, 16; BR-01, 04, 06, 11; LR-09-01, 02, 03, 04, 05; LR-13; LR-15-01, 02, 03, 04, 05; LR-16, 17; PE-01; échantillonnées au mois de juillet.
- ^d Stations MO-01-01, 02, 03, 04, 05; MO-02-01, 02, 03, 04, 05; BE-01-01, 02; BR-11; échantillonnées au mois de septembre.

Figure 6.20: Relation entre les teneurs de manganèse dans les rhizomes de *Nuphar variegatum* et les teneurs de manganèse dans les tiges - stations échantillonnées en juillet.

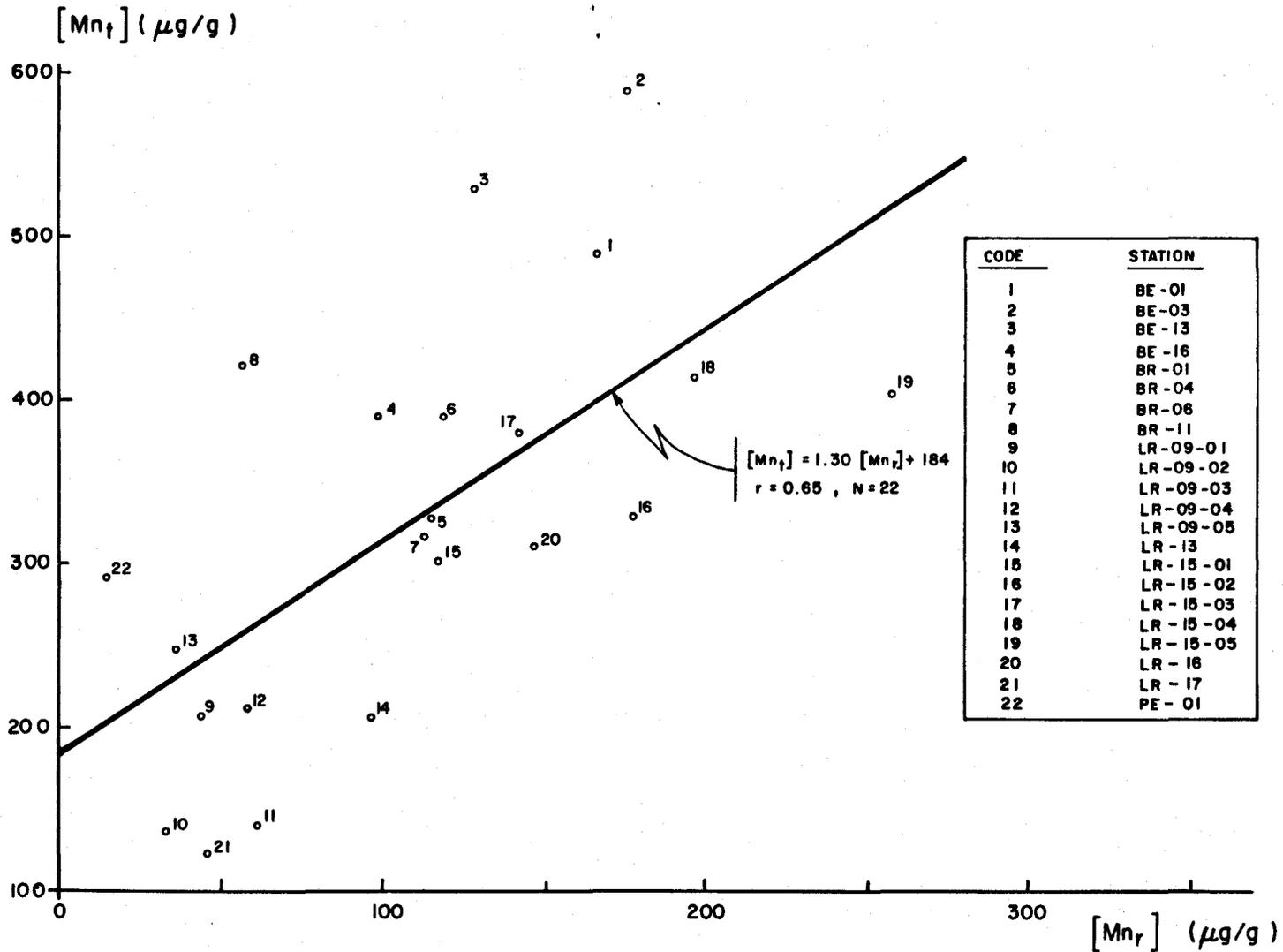
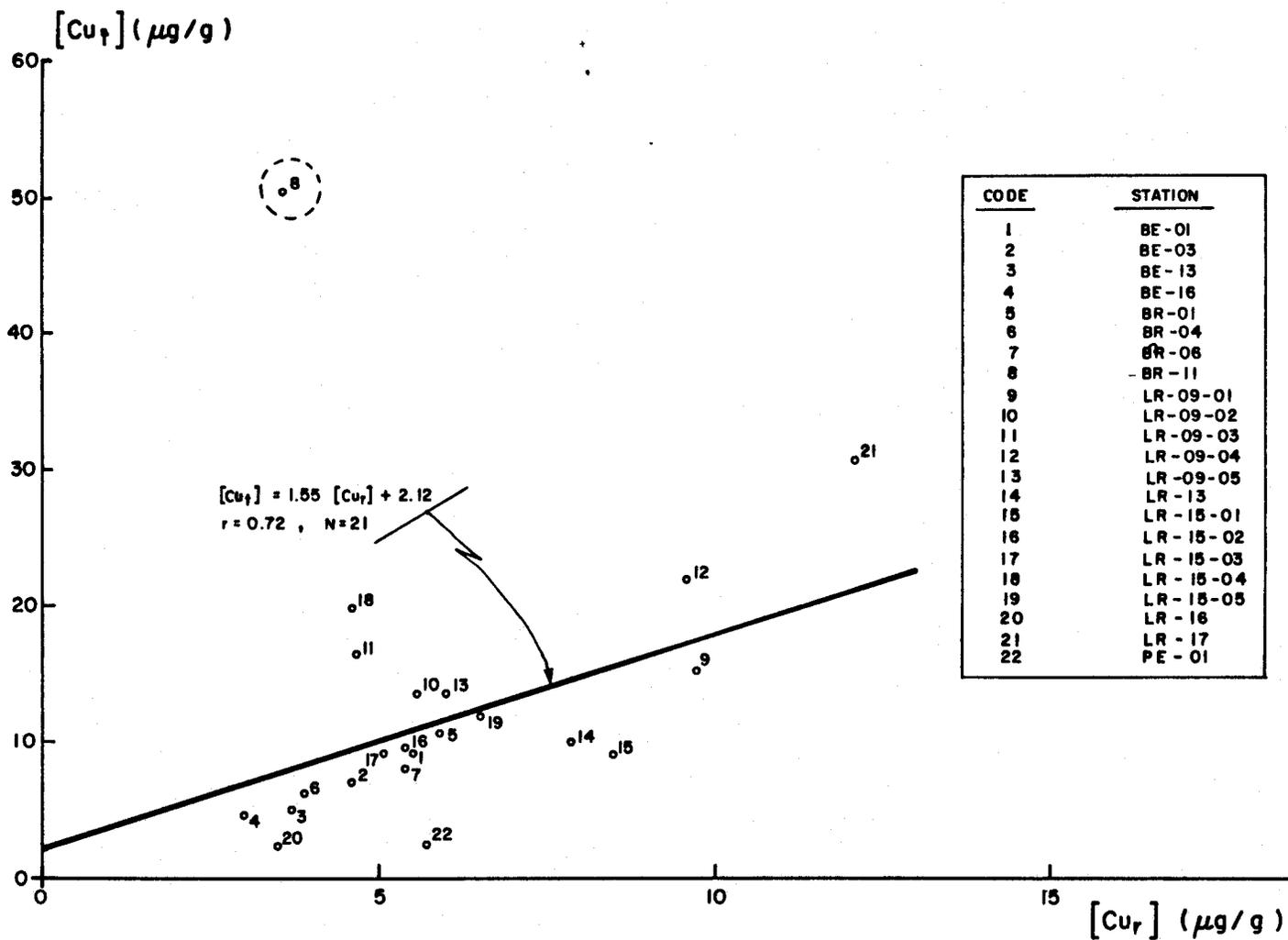


Figure 6.21: Relation entre les teneurs de cuivre dans les rhizomes de Nuphar variegatum et les teneurs de cuivre dans les tiges - stations échantillonnées en juillet.



6.4.2 Relations entre les teneurs de métaux chez N. variegatum et les concentrations de métaux dans les sédiments

Problématique

Dans cette section, on s'adresse directement à l'objectif principal de la présente étude, à savoir d'identifier des relations entre, d'une part, les teneurs de métaux dans les spécimens habitant les sédiments et, d'autre part, les concentrations et la spéciation de ces métaux dans les sédiments provenant du même site. Selon notre revue de la littérature scientifique relativement aux teneurs de métaux traces dans les plantes aquatiques, il existe un nombre appréciable de travaux où on a cherché à mettre en évidence, sur le terrain, de telles relations entre les concentrations de métaux dans les sédiments, $[M_s]$, et celles dans les plantes, $[M_p]$; des exemples de tels travaux sont présentés dans les Tableaux 6.35A (plantes immergées) et 6.35B (plantes émergentes).

Parmi les quelques études de Nuphar variegatum rapportées dans la littérature (section 6.4.1; Tableau 6.30), la seule où on a déterminé les concentrations de métaux à la fois dans les sédiments et dans la plante est celle de Hutchinson et al. (1975); comme l'indique le Tableau 6.35A, aucune relation n'a été trouvée entre les teneurs de métaux (Cu, Ni, Zn) dans la plante et les concentrations dans les sédiments. Pour les autres espèces de nénuphars qui figurent dans le Tableau 6.30, il n'y a que deux études où on a déterminé à la fois $[M_p]$ et $[M_s]$. Dans le premier cas (Mudroch, 1980) les concentrations de Cu et de Ni chez N. advena se sont avérées à peu près constantes malgré des changements importants de concentrations totales de ces éléments dans les sédiments. Dans le deuxième cas, cependant, en échantillonnant des plantes et des sédiments superficiels en amont, en face, et en aval d'une source ponctuelle de pollution (une usine de raffinage et de purification de cuivre), Aulio (1980) a trouvé une excellente corrélation positive entre la concentration de cuivre dans la plante (feuil-

Tableau 6.35A: Relations entre les teneurs en métaux de macrophytes immergés et les concentrations de ces mêmes métaux dans les sédiments provenant du même site - revue de la littérature.

Espèce	Partie de la plante	Métal	N	Relation	Référence	Remarques
<u>Nuphar variegatum</u>	feuilles, pétioles, rhizomes, racines	Cu, Ni, Zn	16	aucune	Hutchinson <u>et al.</u> , 1975	-
<u>Nuphar lutea</u>	feuilles, pétioles, rhizomes, fleurs	Cu	28 28	+ve aucune	Aulio, 1980	N = 28 mais seulement 7 sites
<u>Nuphar advena</u>	feuilles et tiges	Cu, Ni	5-10	aucune	Mudroch, 1980	N = 5 à 10 mais seulement 2 sites
<u>Nymphaea sp.</u>	racines	Cu, Ni, Zn	14 14	+ve aucune	Hutchinson <u>et al.</u> , 1975	-
<u>Nymphaea odorata</u>	feuilles	Zn Cr, Cu, Ni, Ph	8 8	-ve +ve	Mudroch et Capobianco, 1978	N = 8 mais seulement 2 sites
<u>Nymphaea odorata</u>	feuilles et tiges	Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	5	aucune	Mudroch et Capobianco, 1978	-
<u>Potamogeton crispus</u>	tiges	Pb Cu	18 16	+ve aucune	Welsh et Denny, 1980	-
<u>Potamogeton perfoliatus</u>	tiges	Pb Cu	14 13	+ve	Welsh et Denny, 1980	-
<u>Elodea canadensis</u>	tiges	Pb Cu	20 21	+ve +ve	Welsh et Denny, 1980	-
<u>Glyceria fluitans</u>	feuilles tiges	Pb Cd, Cu, Ni, Co, Zn	? ?	+ve aucune	Harding et Whitton, 1978	-
<u>Eleocharis sp.</u>	racines	Cu Ni, Zn	15 15	+ve aucune	Hutchinson <u>et al.</u> , 1975	-
<u>Myriophyllum heterophyllum</u>	feuilles	Cu Pb Cd, Co, Cr, Ni	8 8 8	+ve -ve aucune	Mudroch et Capobianco, 1978	N = 8 mais seulement 2 sites
<u>Myriophyllum exalbescens</u>	feuilles	Cd, Cu, Ph, Zn	6	aucune	Franzin et McFarlane, 1980	"souvent des résultats contradictoires"
<u>Myriophyllum alterniflorum</u>	tiges	Cu Pb	16 17	+ve +ve	Welsh et Denny, 1980	-
<u>Myriophyllum verticillatum</u>	plante entière	Cu, Co, Ni Cd, Cr, Ph, Zn	4 4	+ve aucune	Mudroch et Capobianco, 1979	-

Tableau 6.35B: Relations entre les teneurs en métaux de macrophytes émergents et les concentrations de ces mêmes métaux dans les sédiments provenant du même site - revue de la littérature.

Espèce	Partie de la plante	Métal	N	Relation	Référence	Remarques
<u>Typha latifolia</u>	racines	Cr, Cu, Ni	8	+ve	Mudroch et Capobianco, 1978	N = 8 mais seulement 2 sites
	tiges (0-40 cm)	Cu, Ni	8	+ve		
	racines (avril-juin)	Pb	8	+ve		
	racines, tiges	Cd, Co, Zn	8	aucune		
<u>Lythrum salicaria</u>	tiges et feuilles	Cu	8	-ve	Mudroch et Capobianco, 1978	N = 8 mais seulement 2 sites
		Pb, Zn	8	±		
		Cr	8	aucune		
<u>Phragmites australis</u>	rhizomes	Cu	17	+ve	Chiaudani, 1969	Rapporte l'existence apparente de 3 groupes de populations selon le rapport (tige + feuilles)/rhizome
<u>Phragmites australis</u>	rhizomes, tiges, feuilles	Cd, Cu, Pb, Zn	2	-ve	Schierup et Larsen, 1981	-
<u>Spartina alterniflora</u>	plante entière	Cd, Cu, Pb, Fe, Mn	6	aucune	Dunstan <u>et al.</u> , 1975	-

les, pétioles, rhizomes) et la concentration de cet élément dans les sédiments.

L'examen des résultats rapportés dans les Tableaux 6.35A et 6.35B pour des plantes autres que les nénuphars révèle plusieurs cas où aucune relation entre $[M_s]$ et $[M_p]$ ne se manifeste (44 cas sur 79). Dans les cas où une telle relation est effectivement présente, elle peut même s'avérer négative (6 cas sur 35: Mudroch et Capobianco, 1978; Schierup et Larsen, 1981). Les résultats rapportés par Mudroch et Capobianco (1978; 1979) constituent un bon exemple de la complexité des relations sédiments - plantes sur le terrain; après leur étude de la bioaccumulation de 7 métaux (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) dans 6 plantes différentes, ces auteurs ont conclu que l'accumulation variait d'une espèce à l'autre et d'un métal à l'autre, et qu'elle montrait une "relation complexe" avec les concentrations des métaux dans les sédiments.

Comme une des explications possibles de cette complexité apparente, à part celle voulant que dans les conditions prévalant sur le terrain la bioaccumulation de métaux directement à partir de la colonne d'eau puisse masquer les relations sédiments-plantes, mentionnons que dans la grande majorité des travaux rapportés dans les Tableaux 6.35A et 6.35B on s'est contenté de doser les concentrations totales de métaux dans les sédiments. Les travaux de Mudroch et Capobianco (1979) et d'Aulio (1980) constituent des exceptions à cette généralisation, dans le sens que ces chercheurs ont également dosé les métaux lessivés des sédiments par l'acide chlorhydrique (0.5N HCl, ~ 20°C; Agemian et Chau, 1976). Dans ces deux cas, l'introduction de cette fraction dite "échangeable" n'a pas amélioré les relations sédiments-plantes. L'acide chlorhydrique est un réactif très peu sélectif, cependant, et il nous semblait probable qu'une détermination plus complète de la spéciation des métaux particuliers permettrait de mieux comprendre comment les sédiments influencent la bioaccumulation de métaux chez les macrophytes. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente section.

En se basant sur le modèle simple de bioaccumulation déjà présenté (Figure 6.19), on peut tenter de le raffiner par l'introduction du concept de spéciation pour les métaux associés aux sédiments (Figure 6.22). Pour un métal donné, le compartiment $[M_s]$ peut être subdivisé pour tenir compte des 5 fractions "géochimiques" (section 4.3.2): M(F1) - métal échangeable; M(F2) - métal lié aux carbonates et/ou adsorbé spécifiquement; M(F3) - métal lié aux oxydes de fer et de manganèse; M(F4) - métal lié à la matière organique; M(F5) - métal résiduel lié à la matrice cristalline. Chacune de ces fractions, sauf peut-être F5, serait alors reliée au compartiment $[M_i]$, la forme de métal directement biodisponible au niveau du rhizome. Suivant l'exemple de Oakley et al. (1981), on pourrait faire l'hypothèse qu'il existe des échanges possibles entre chaque fraction, M(F1) \rightarrow M(F5) et la concentration du métal dans l'eau interstitielle, $[M_i]$ (voir la section 6.2).

$$[M_i] = \frac{[M(F1)]}{\{S_T(1)\} \cdot K_{AD}(1)} = \frac{[M(F2)]}{\{S_T(2)\} \cdot K_{AD}(2)} = \frac{[M(Fk)]}{\{S_T(k)\} \cdot K_{AD}(k)} \quad (6.19)$$

où: $[M_i]$ est la concentration du métal dans l'eau interstitielle;
 $[M(Fk)]$ est la concentration du métal dans la fraction Fk ($k = 1 \rightarrow 5$);
 $\{S_T(k)\}$ est la concentration totale de la phase solide S(k); $K_{AD}(k)$ est la constante d'équilibre conditionnelle pour l'association entre M et S(k). D'après la Figure 6.22, on écrit également:

$$M_i + S_r = M_a \quad ; \quad K_a = \frac{[M_a]}{[M_i] \{S_r\}} \quad (6.20)$$

où $[M_a]$ est la concentration de M adsorbé sur le rhizome et $\{S_r\}$ est la concentration de sites d'adsorption sur le rhizome. En substituant (6.20) dans (6.19), on obtient:

$$[M_a] = K_a \{S_r\} \frac{[M(Fk)]}{\{S_T(k)\} \cdot K_{AD}(k)} \quad (6.21)$$

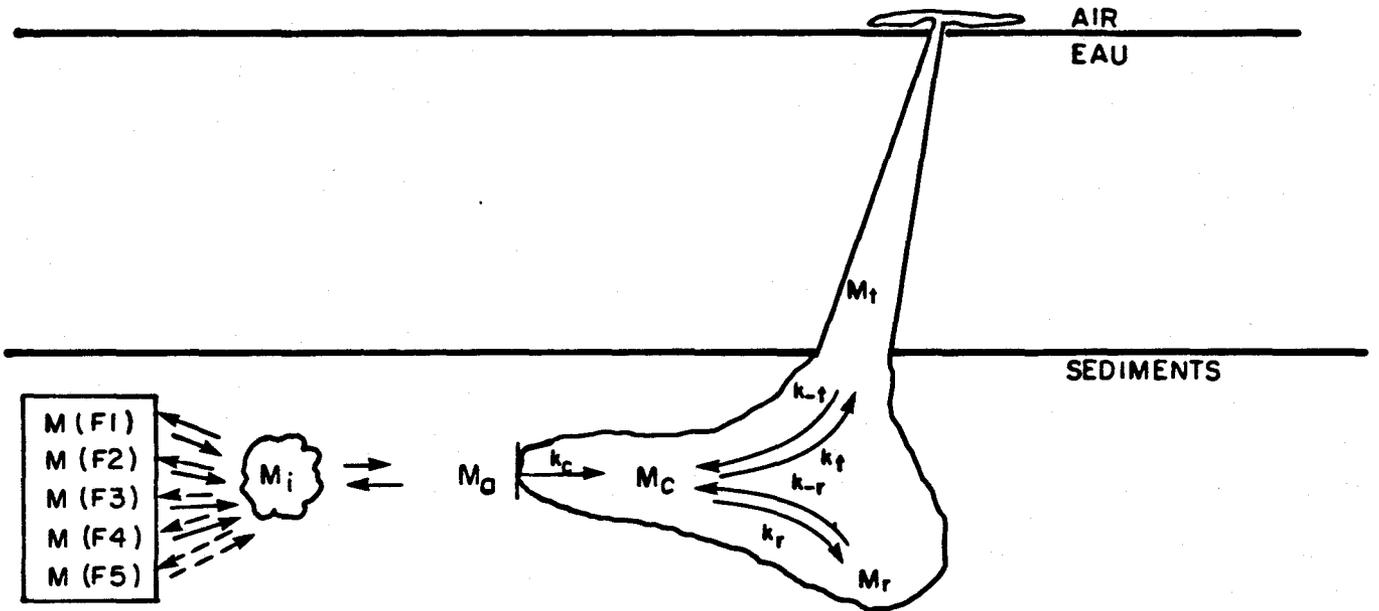
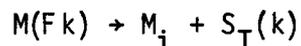
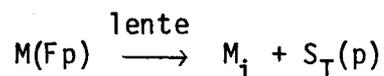


Figure 6.22: Schéma de la bioaccumulation de métaux pour *Nuphar variegatum* à partir des rhizomes, en tenant compte de la spéciation des métaux dans les sédiments. M_i , M_a , M_c , M_r et M_t ont la même signification que sur la Figure 6.19, alors que $M(F1)$, $M(F2)$, ... signifient respectivement le métal dans chacune des fractions F1, F2, ... (voir le texte pour des explications).

L'équation (6.21) montre une proportionnalité entre $[M_a]$ et $[M]$ dans chacune des différentes fractions de sédiments. Cette situation générale prévaudra à condition que toutes les réactions du type



soient rapides par rapport à l'assimilation au niveau du rhizome (c'est-à-dire si l'équilibre existe entre les différentes fractions dans les sédiments). Par ailleurs, si certaines réactions de dissociation sont plus lentes que l'assimilation par le rhizome (Cushing et Thomas, 1980),



la proportionnalité implicite dans l'équation (6.21) ne s'appliquera qu'aux autres formes particulières ($k \neq p$) qui contrôleront effectivement $[M_i]$.

Considérant de nouveau le développement antérieur concernant la bioaccumulation de métaux à partir des rhizomes (voir les équations (6.11) à (6.18)), on note une proportionnalité entre $[M_a]$ d'une part et $[M_r]$ ou $[M_t]$ d'autre part. Ces considérations suggèrent donc la possibilité de trouver des corrélations entre $[M_t]$ ou $[M_r]$ et $[M(Fk)]$, à la condition que différents paramètres abiotiques ($K_{AD}(k)$, $S_T(k)$) et biotiques (S_r , K_a , k_t , k_r) soient constants d'une station à l'autre et également que la bioaccumulation du métal par la tige, directement à partir de la colonne d'eau, soit négligeable par rapport à la bioaccumulation via le rhizome.

Données disponibles et traitement statistique

Pour les fins de la présente analyse, à cause de la variabilité saisonnière des teneurs de certains métaux chez Nuphar variegatum (section 6.4.1), nous nous sommes limités aux stations faisant partie du premier groupe de sites échantillonnés au mois de juillet. Il

s'agit d'un groupe de 14 stations comprenant tous les sites d'échantillonnage sauf ceux dans le lac Montbelliard (MO-01, MO-02): les concentrations de métaux dans les plantes, $[M_r]$ et $[M_t]$, sont celles déjà présentées dans les Tableaux 5.25A et 5.25B. A chaque site d'échantillonnage, on disposait également de deux échantillons composites de sédiment ($< 850 \mu\text{m}$), l'un correspondant à la strate 0-2 cm et l'autre au niveau 8-10 cm; pour l'analyse statistique, nous nous sommes servis des concentrations de métaux dans les différentes fractions géochimiques (F1 \rightarrow F5), qui figurent dans les Tableaux 5.12 à 5.15 (0-2 cm) ou les Tableaux 5.16 à 5.19 (8-10 cm), et aussi des concentrations globales en carbone organique et en soufre pour le sédiment (Tableaux 5.10 et 5.11).

Compte tenu du nombre considérable de données à traiter, une approche standard fut adoptée. Pour chaque métal (Cu, Zn, Fe), on a d'abord considéré les relations entre les concentrations dans les plantes ($[M_r]$, $[M_t]$) et celles dans chacune des fractions géochimiques ($[M(F1)]$, $[M(F2)]$, ...). Ensuite, pour tenter de tenir compte des différences entre les sédiments, en ce qui concerne les concentrations des différentes phases solides ($S_T(1)$, $S_T(2)$, ...), on a divisé les concentrations de métal dans les différentes fractions géochimiques par les concentrations en carbone organique, en soufre ou encore en fer, c'est-à-dire,

$$\frac{[M(F1)]}{[C]}, \quad \frac{[M(F2)]}{[C]}, \quad \frac{[M(F3)]}{[C]}, \quad \dots$$
$$\frac{[M(F1)]}{[S]}, \quad \frac{[M(F2)]}{[S]}, \quad \frac{[M(F3)]}{[S]}, \quad \dots$$
$$\frac{[M(F1)]}{[Fe(F1)]}, \quad \frac{[M(F2)]}{[Fe(F2)]}, \quad \frac{[M(F3)]}{[Fe(F3)]}, \quad \dots$$

pour enfin recalculer des coefficients de corrélation entre $[M_r]$ ou $[M_t]$ et ces fractions géochimiques "normalisées".

Normaliser par $[S]$, ou encore par $[C]$, revient à diviser la concentration de métal par celle d'une des phases solides présentes, $S_T(k)$ (sulfures; matière organique). Selon l'équation (6.21):

$$[M_a] = \frac{K_a \{S_r\} [M(Fk)]}{\{S_T(k)\} \cdot K_{AD}(k)}$$

en divisant $[M(Fk)]$ par $\{S_T(k)\}$ on cherche à minimiser les variations d'une station à l'autre. Si la valeur du coefficient de corrélation $[M(Fk)]$ -vs- $[M_r]$ ou $[M_t]$ augmente après cette opération, ceci suggère que $M(Fk)$ est effectivement associé à la phase $S_T(k)$, et que cette phase influence la biodisponibilité de M . Dans le cas de la normalisation en divisant par la concentration de fer, on ne peut invoquer la même argumentation puisqu'il s'agit de $[Fe(Fk)]$ et non d'une phase solide particulière. Etant donné que les deux métaux, M et Fe , sont libérés par le même lessivage, on peut cependant concevoir leur interaction au niveau du rhizome (compétition). Si la valeur du coefficient de corrélation ($[M(Fk)]$ -vs- $[M_r]$ ou $[M_t]$) augmente après cette opération, ceci suggère l'existence d'une compétition entre les deux métaux, M et Fe , au niveau de l'assimilation ou encore de la translocation.

Dans tous les cas, la représentation graphique correspondant à chaque paire de concentrations fut examinée, afin d'identifier les "fausses" corrélations où une seule station améliorerait indûment le coefficient de corrélation. De même, puisque l'inspection visuelle des graphiques révélait que la station dans le lac Pelletier (PE-01) avait souvent un comportement très différent de ceux des autres stations (tiges seulement), on a effectué un deuxième traitement des données ($[M_t]$) sans cette station ($N = 13$).

Les résultats de ces diverses analyses sont présentés dans les Tableaux 6.36 à 6.38, où on fait ressortir les valeurs de coefficient de corrélation qui sont significativement ($P < 0.05$) et très significativement ($P < 0.01$) différentes de zéro. Avant de considérer ces ré-

sultats, il importe de se rappeler que l'assimilation de métaux à partir de la colonne d'eau pourrait masquer les relations sédiments-plantes (les concentrations de métaux dans l'eau n'ont pas été mesurées dans la présente étude). Enfin, il ne faudrait jamais oublier que la mise en évidence d'une corrélation entre deux mesures n'implique pas nécessairement qu'il existe entre les deux observations une relation de cause à effet.

Relations sédiments-rhizomes

Pour le cuivre, ce sont surtout les fractions F1 (échangeable) et F2 (adsorbé spécifiquement/lié aux carbonates) qui donnent des corrélations significatives avec $[Cu_r]$, ces corrélations étant plus nombreuses pour la strate 0-2 cm que par celle de 8 à 10 cm (Tableau 6.36). Pour les sédiments superficiels (0-2 cm), de meilleures corrélations sont obtenues en normalisant soit par la teneur globale du sédiment en soufre ($[Cu(F1)]/[S]$; $[Cu(F2)]/[S]$), soit par la concentration de fer ($[Cu(F1)]/[Fe(F1)]$; Figure 6.23).

Pour le zinc, contrairement à ce que l'on vient de constater pour le cuivre, aucune relation sédiments-rhizomes ne se manifeste, peu importe la strate de sédiment considérée (Tableau 6.36). En ce qui concerne le fer, on trouve une seule corrélation significative, celle avec la fraction F3 (oxydes de fer et de manganèse) après normalisation pour la teneur du sédiment en soufre ($[Fe(F3)]/[S]$). Signalons que si on n'avait dosé que les teneurs totales des différents métaux (la dernière colonne dans le Tableau 6.36), toutes les corrélations mentionnées ci-dessus sauf une auraient disparu.

Relations sédiments-tiges

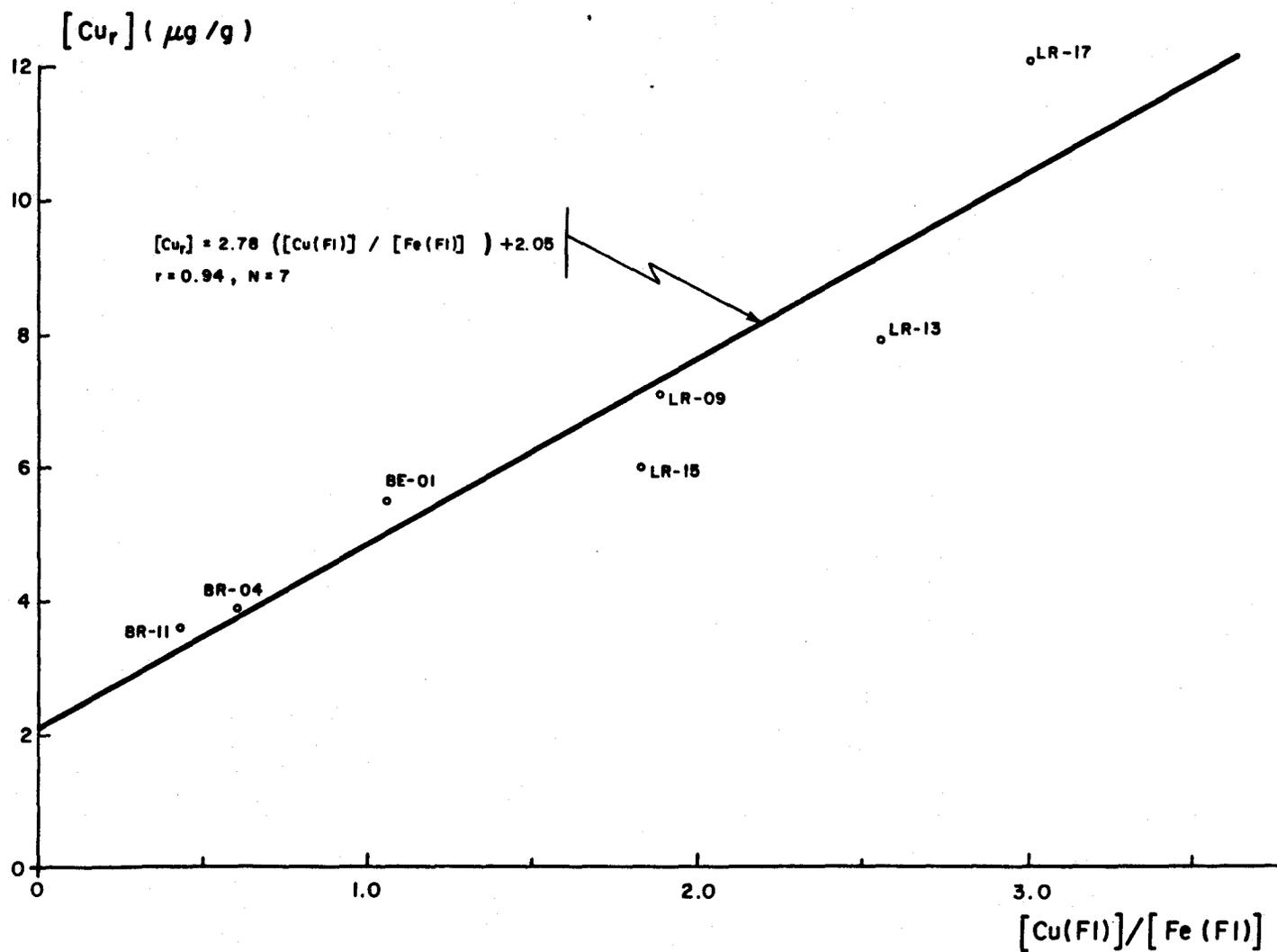
Les corrélations significatives entre $[M_s]$ et $[M_t]$ sont plus nombreuses que celles notées entre les sédiments et les rhizomes (comparer

Tableau 6.36: Corrélations entre les teneurs de métaux dans les rhizomes de Nuphar variegatum et les concentrations de métaux dans les sédiments superficiels (< 850 µm; 14 stations)^a.

Strate	Métal ^b	Fraction géochimique ^c								
		F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	S-2	S-3	S-4	S-5
0-2 cm	Cu	(.55)	(.47)				(.50)	(.49)	(.21)	(.22)
	Cu/S	<u>.79</u>	.59				.66	.58	.56	.55
	Cu/C	(.50)	(.43)				(.46)	(.39)	(.43)	(.41)
	Cu/Fe	<u>.94</u>	(.15)				(.30)	.54	(.45)	(.39)
8-10 cm	Cu	* ^d	.54				(.47)		(.16)	
	Cu/S	*	(.46)				(.41)		(.44)	
	Cu/C	*	(.40)				(.35)		(.37)	
	Cu/Fe	*	.62				.58		.55	
0-2 cm	Zn									
	Zn/S									
	Zn/C									
	Zn/Fe									
8-10 cm	Zn									
	Zn/S									
	Zn/C									
	Zn/Fe									
0-2 cm	Fe			(.27)			(-.38)	(-.30)	(.33)	
	Fe/S			<u>.66</u>			.64	.62	(.53)	
	Fe/C			(.20)			(-.19)	(.17)	(.14)	
8-10 cm	Fe									
	Fe/S									
	Fe/C									

- ^a Pour les coefficients de corrélation les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles qui ne sont pas significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses). L'absence d'une valeur signifie elle aussi que le coefficient de corrélation n'est pas significativement différent de zéro au niveau de 5%.
- ^b Les coefficients de corrélation furent calculés soit avec les données brutes ([M(Fk)]), soit avec les données normalisées ([M(Fk)]/[S], [M(Fk)]/[C], [M(Fk)]/[Fe(Fk)]); voir le texte pour des explications.
- ^c Les symboles F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (métal échangeable) ... fraction 5 (métal résiduel). Les symboles S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de (F1 + F2) ... de (F1 + F2 + F3 + F4 + F5).
- ^d Un astérisque (*) signifie que plusieurs concentrations de métal dans la fraction 1 étaient inférieures à la limite de détection, ce qui a empêché le calcul du coefficient de corrélation.

Figure 6.23: Relation entre les teneurs en cuivre des rhizomes de *Nuphar variegatum* et le rapport des concentrations de cuivre et de fer échangeables ($[Cu(FI)]/[Fe(FI)]$) dans les sédiments superficiels (0-2 cm, <850 μ m).



Tableaux 6.36 et 6.37). Le fer fait cependant exception à cette généralisation, aucune corrélation n'étant évidente entre les concentrations dans les sédiments et celles dans les tiges.

Pour le cuivre, la seule corrélation significative initialement présente est celle avec la fraction F3 (oxydes de fer et de manganèse: Figure 6.24), ce lien n'étant évident que pour les sédiments superficiels (0-2 cm). Normaliser les concentrations de cuivre dans ces sédiments en fonction de la teneur en soufre a pour effet de diminuer cette corrélation avec F3 mais améliorer celle avec F5 (métal résiduel); normaliser en fonction de la concentration de fer fait apparaître une nouvelle corrélation avec la fraction F2 ($[\text{Cu}(\text{F}2)]/[\text{Fe}(\text{F}2)]$) mais réduit encore plus la corrélation initiale avec F3. Notons qu'aucune corrélation n'est observée pour les sédiments profonds (8-10 cm).

Le cas du zinc se distingue par l'abondance des corrélations notées entre les concentrations dans les tiges et celles dans les diverses fractions dans les sédiments, un contraste très net avec la situation décrite ci-haut pour ce métal dans les rhizomes. Pour les sédiments superficiels (0-2 cm), les seules corrélations significatives initialement présentes sont celles avec les fractions F1 (Figure 6.25) et F5; normaliser en fonction des concentrations de soufre ou de carbone organique fait apparaître plusieurs autres corrélations (fractions F2, F3, F4) tout en faisant disparaître celle avec F5. Dans le cas des sédiments profonds (8-10 cm), les données brutes ne montrent pas de corrélations évidentes entre $[\text{M}_s]$ et $[\text{M}_t]$, mais de nouveau en normalisant en fonction de $[\text{S}]$ on fait dégager des corrélations significatives avec les fractions F2, F3 et F4.

L'inspection visuelle des graphiques représentant $[\text{Zn}_t]$ en fonction de $[\text{Zn}_s]$ montre que les tiges prélevées à la station du lac Pelletier, PE-01, se comportent souvent de manière tout à fait différente de celles des autres stations (p. ex.: $[\text{Zn}_t]$ -vs- $[\text{Zn}(\text{F}2)]$; Figure 6.26); malgré la présence de concentrations élevées de métaux dans les sédi-

Tableau 6.37: Corrélations entre les teneurs de métaux dans les tiges de Nuphar variegatum et les concentrations de métaux dans les sédiments superficiels (<850 µm; 14 stations)^a

Strate	Métal ^b	Fraction géochimique ^c								
		F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	S-2	S-3	S-4	S-5
0-2 cm	Cu		(.25)	<u>.90</u>		(.14)	(.35)	(.38)		
	Cu/S		(.37)	<u>.71</u>		<u>.67</u>	(.36)	.58		
	Cu/C		(.20)	(.27)		(.48)	(.20)	(.27)		
	Cu/Fe		<u>.67</u>	(.50)		(.33)	<u>.66</u>	(.41)		
8-10 cm	Cu	* ^d								
	Cu/S	*								
	Cu/C	*								
	Cu/Fe	*								
0-2 cm	Zn	<u>.83</u>	(.35)	(.18)	(-.04)	<u>.77</u>	<u>.77</u>	(.45)	(.38)	(.42)
	Zn/S	<u>.88</u>	<u>.79</u>	<u>.76</u>	<u>.76</u>	(.51)	<u>.89</u>	<u>.87</u>	<u>.87</u>	<u>.86</u>
	Zn/C	<u>.79</u>	<u>.73</u>	<u>.76</u>	<u>.70</u>	(.12)	<u>.80</u>	<u>.82</u>	<u>.82</u>	<u>.78</u>
	Zn/Fe	(.39)	(.28)	.53	<u>.74</u>	<u>.83</u>	.66	<u>.69</u>	<u>.70</u>	<u>.77</u>
8-10 cm	Zn	*	(-.10)	(-.15)	(-.14)	(.34)	(.28)	(-.04)	(-.06)	
	Zn/S	*	<u>.67</u>	.61	.60	(-.02)	.57	.60	.61	
	Zn/C	*	(.45)	(.30)	(.34)	(-.13)	.56	(.49)	(.48)	
	Zn/Fe	*	(.43)	(.26)	(.46)	<u>.73</u>	(.42)	(.40)	(.42)	
0-2 cm	Fe									
	Fe/S									
	Fe/C									
8-10 cm	Fe									
	Fe/S									
	Fe/C									

a Pour les coefficients de corrélation les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles qui ne sont pas significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses). L'absence d'une valeur signifie elle aussi que le coefficient de corrélation n'est pas significativement différent de zéro au niveau de 5%.

b Les coefficients de corrélation furent calculés soit avec les données brutes ([M(Fk)]), soit avec les données normalisées ([M(Fk)]/[S], [M(Fk)]/[C], [M(Fk)]/[Fe(Fk)]); voir le texte pour des explications.

c Les symboles F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (métal échangeable) ... fraction 5 (métal résiduel). Les symboles S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de (F1 + F2) ... de (F1 + F2 + F3 + F4 + F5).

d Un astérisque (*) signifie que plusieurs concentrations de métal dans la fraction 1 étaient inférieures à la limite de détection, ce qui a empêché le calcul du coefficient de corrélation.

Figure 6.24: Relation entre les teneurs en cuivre des tiges de *Nuphar variegatum* et les concentrations de cuivre liées aux oxydes de fer et de manganèse dans les sédiments superficiels (0-2 cm, <850 µm).

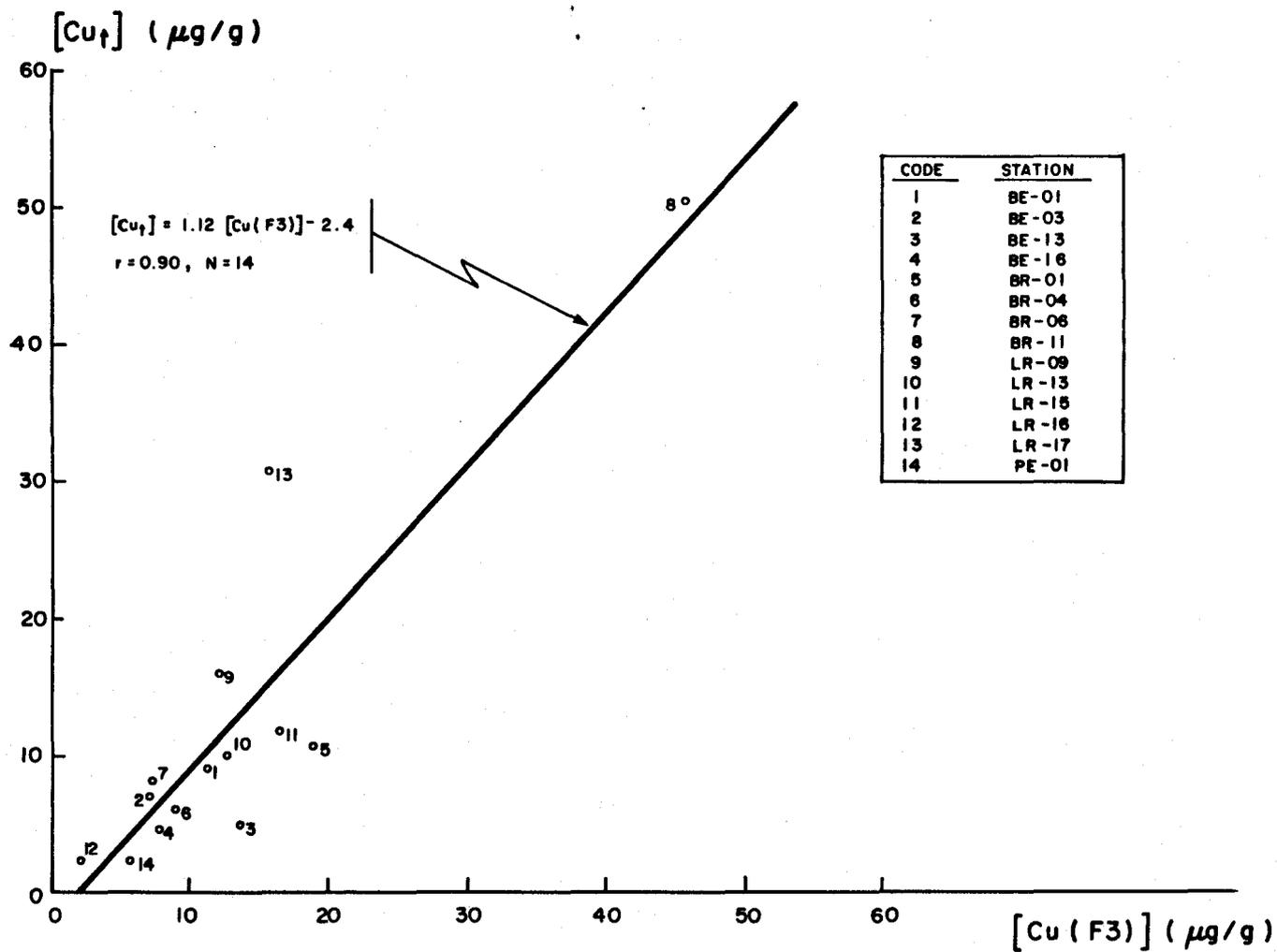


Figure 6.25: Relation entre les teneurs en zinc des tiges de *Nuphar variegatum* et les concentrations de zinc échangeables dans les sédiments superficiels (0-2 cm, <850 μm).

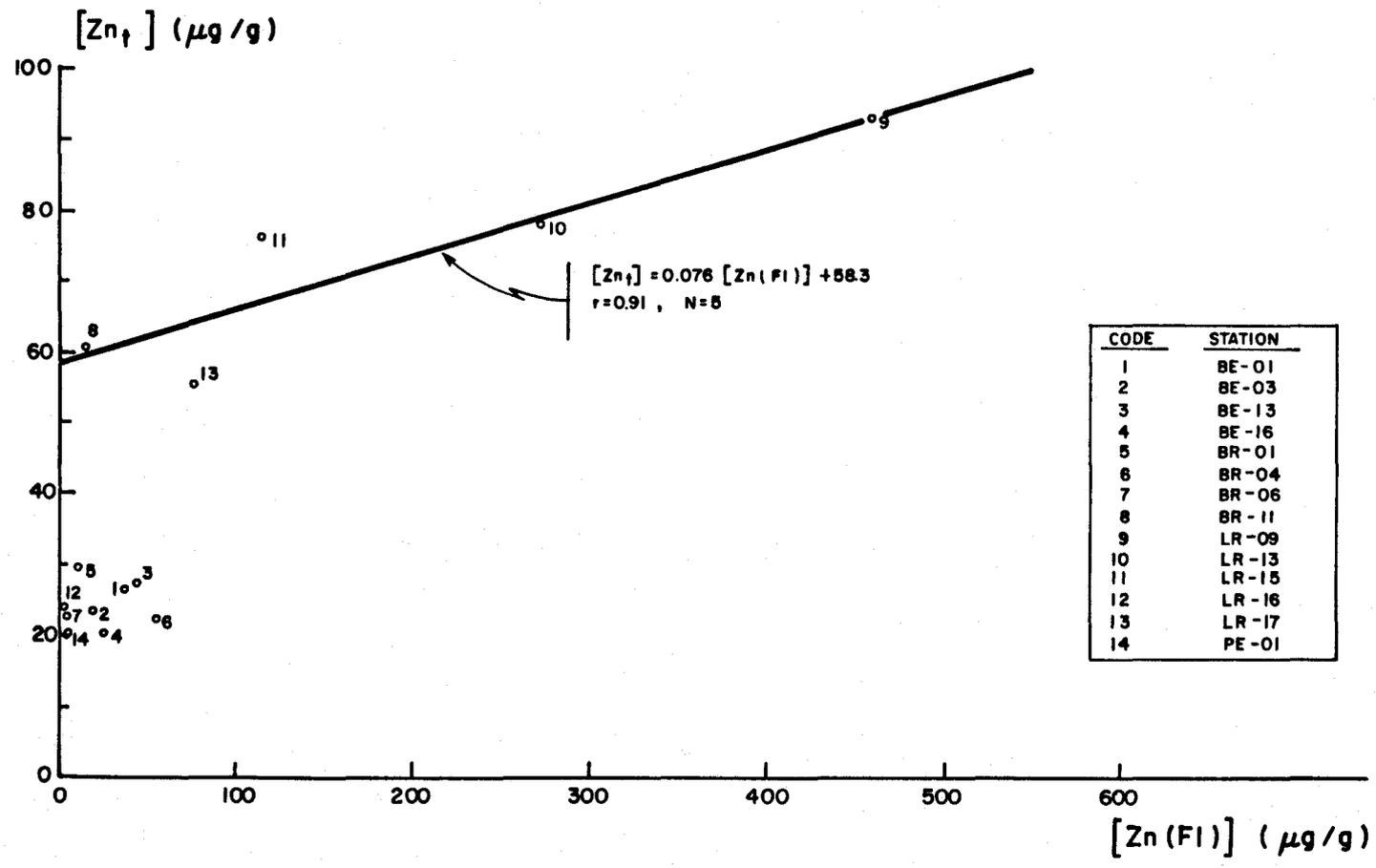
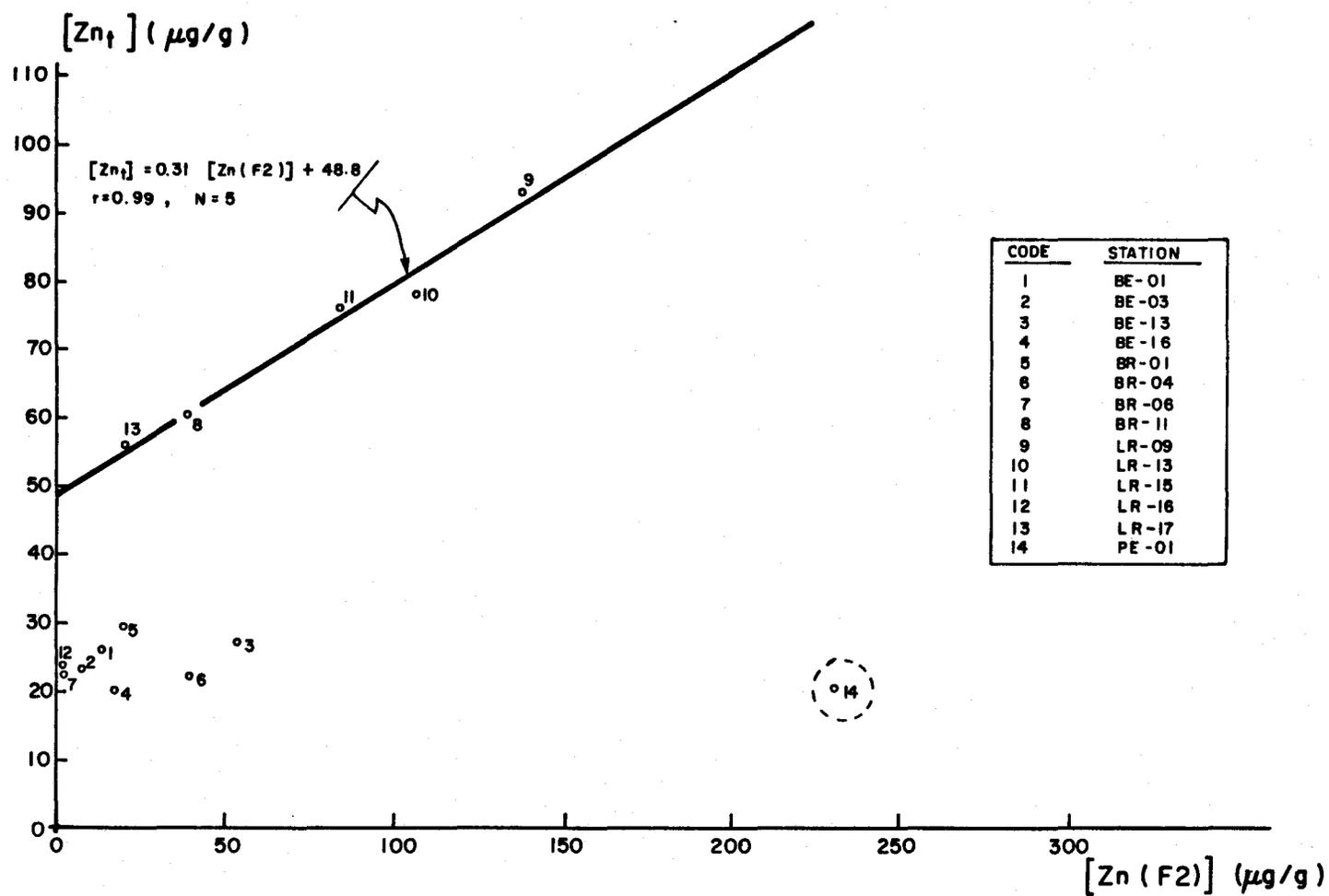


Figure 6.26: Relation entre les teneurs en zinc des tiges de *Nuphar variegatum* et les concentrations de zinc dans la fraction 2 des sédiments superficiels (0-2 cm, <850 μm).



ments, les teneurs dans les tiges demeurent parmi les plus faibles. Ce comportement peut s'expliquer par les particularités de ce lac qui reçoit directement l'effluent d'un étang de traitement de rejets miniers (BEST, 1979) et qui contient par conséquent des sédiments très différents des autres lacs, surtout en ce qui concerne les concentrations en soufre, en carbone organique (Tableaux 5.10 et 5.11) et en fer (Tableau 5.15 et 5.19). L'effet très marqué de la normalisation des concentrations de métaux dans les sédiments, surtout de celle faite en fonction de $[S]$, s'explique en grande partie par son influence sur le point correspondant à la station PE-01. En comparant la Figure 6.26 (données brutes avant normalisation; $r = 0.35$) à la Figure 6.27 (données après normalisation en divisant par $[S]$; $r = 0.79$), on note que la station PE-01 a été ramenée tout près de l'origine, où elle n'exerce plus d'influence indue sur le calcul du coefficient r ; il en va de même pour les fractions F3 et F4, pour lesquelles r augmente de 0.18 à 0.76 et de -0.04 à 0.76 respectivement (Tableau 6.37). Le même phénomène se produit lors de la normalisation en fonction de $[C]$, du moins pour les sédiments superficiels.

Afin de vérifier si l'effet positif de la normalisation découlait uniquement de son influence sur la station PE-01, nous avons effectué un deuxième traitement des données sans cette station (Tableau 6.38). Eliminer PE-01 n'affecte guère la situation avec le cuivre (comparer les Tableaux 6.37 et 6.38), mais pour le zinc les changements sont dramatiques. Dans le cas des sédiments superficiels, pour les données brutes sans normalisation, chacune des fractions F1 → F5 est maintenant très significativement corrélée avec les concentrations de zinc dans les tiges, les valeurs du coefficients de corrélation variant de 0.82 à 0.92. Les données brutes pour les sédiments profonds montrent elles aussi des corrélations significatives entre les fractions F1 → F4 et les concentrations de zinc dans les tiges. Ce genre de comportement correspond à celui prédit pour la situation où les échanges de métaux entre fractions sont rapides et les fractions se trouvent toutes corrélées entre elles (cf. section 6.2). Une fois la station PE-01 éliminée, normaliser les concentrations de métaux dans les sédiments, en

Figure 6.27: Relation entre les teneurs en zinc des tiges de *Nuphar variegatum* et les concentrations de zinc dans la fraction 2 des sédiments superficiels (0-2 cm, <850 μm), après normalisation de ces dernières en fonction de la concentration en soufre réduit.

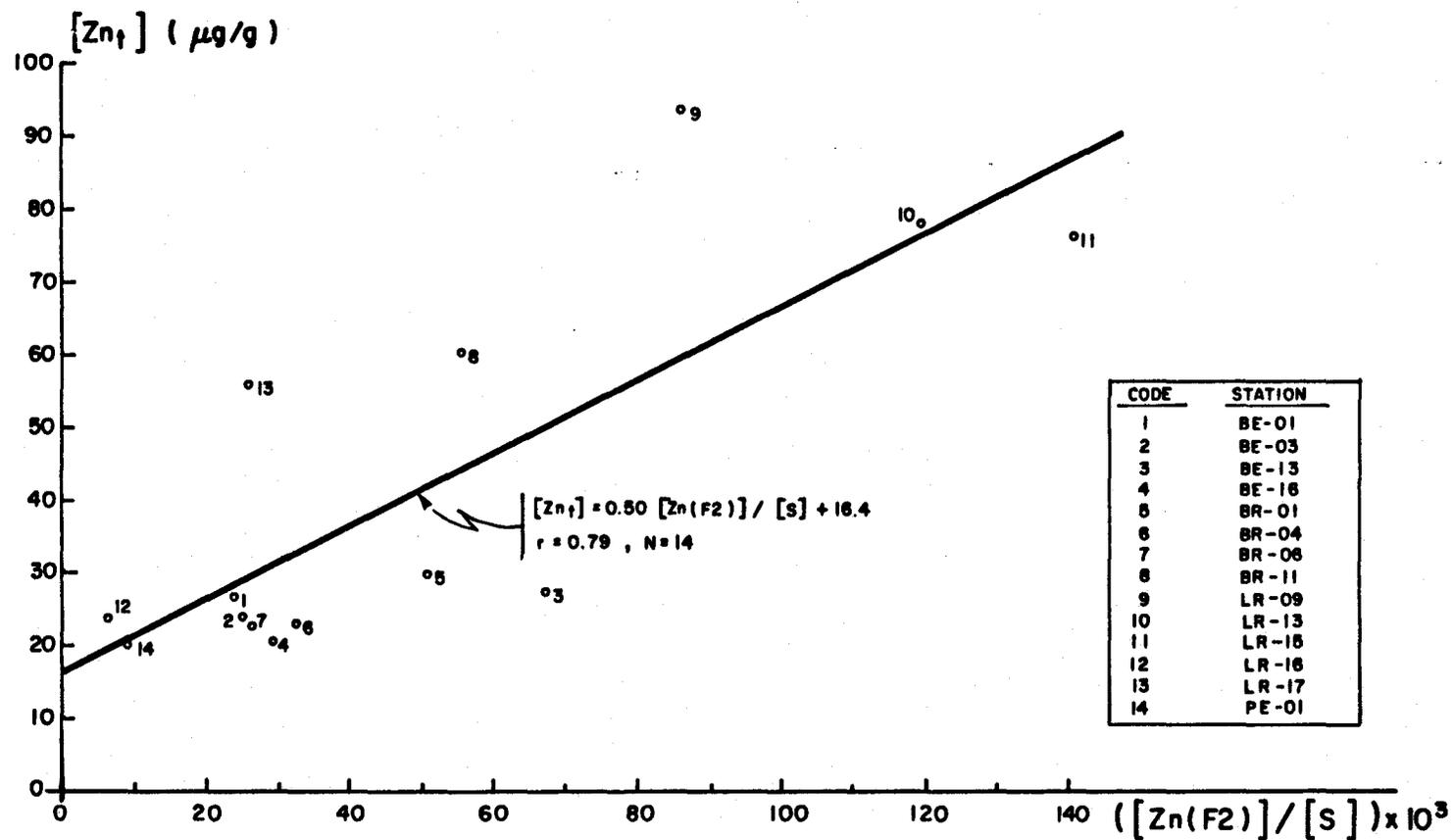


Tableau 6.38: Corrélations entre les teneurs de métaux dans les tiges de Nuphar variegatum et les concentrations de métaux dans les sédiments superficiels (< 850 µm; 13 stations, PE-01 exclue)^a.

Strate	Métal ^b	Fraction géochimique ^c								
		F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	S-2	S-3	S-4	S-5
0-2 cm	Cu		(.22)	<u>.89</u>		(.55)	(.21)			
	Cu/S		(.33)	<u>.70</u>		.65	(.32)			
	Cu/C		(.15)	(.22)		(.45)	(.15)			
	Cu/Fe		.66	(.46)		(.52)	.65			
8-10 cm	Cu	* ^d								
	Cu/S	*								
	Cu/C	*								
	Cu/Fe	*								
0-2 cm	Zn	<u>.82</u>	<u>.81</u>	<u>.92</u>	<u>.91</u>	<u>.91</u>	<u>.85</u>	<u>.90</u>	<u>.91</u>	<u>.92</u>
	Zn/S	<u>.88</u>	<u>.78</u>	<u>.75</u>	<u>.75</u>	(.46)	<u>.89</u>	<u>.86</u>	<u>.86</u>	<u>.85</u>
	Zn/C	<u>.79</u>	<u>.73</u>	<u>.78</u>	<u>.92</u>	(.03)	<u>.79</u>	<u>.82</u>	<u>.83</u>	<u>.77</u>
	Zn/Fe	(.19)	(.22)	.60	<u>.75</u>	<u>.82</u>	.63	<u>.69</u>	<u>.71</u>	<u>.87</u>
8-10 cm	Zn	*	.59	.60	.60	(.50)	(.48)	(.53)	(.53)	.56
	Zn/S	*	<u>.70</u>	.63	.62	(-.16)	.57	.61	.61	(.49)
	Zn/C	*	.63	(.54)	(.55)	(-.24)	.57	.57	.57	(.40)
	Zn/Fe	*	(.46)	(.55)	.57	<u>.71</u>	(.41)	(.47)	(.50)	.56
0-2 cm	Fe									
	Fe/S									
	Fe/C									
8-10 cm	Fe									
	Fe/S									
	Fe/C									

- ^a Pour les coefficients de corrélation les valeurs significativement différentes de zéro aux niveaux de 1% (soulignées) et 5% sont distinguées de celles qui ne sont pas significativement différentes de zéro au niveau de 5% (entre parenthèses). L'absence d'une valeur signifie elle aussi que le coefficient de corrélation n'est pas significativement différent de zéro au niveau de 5%.
- ^b Les coefficients de corrélation furent calculés soit avec les données brutes ($[M(Fk)]$), soit avec les données normalisées ($[M(Fk)]/[S]$, $[M(Fk)]/[C]$, $[M(Fk)]/[Fe(Fk)]$); voir le texte pour des explications.
- ^c Les symboles F1 ... F5 représentent respectivement la fraction 1 (métal échangeable) ... fraction 5 (métal résiduel). Les symboles S2 ... S5 représentent respectivement les sommes de (F1 + F2) ... de (F1 + F2 + F3 + F4 + F5).
- ^d Un astérisque (*) signifie que plusieurs concentrations de métal dans la fraction 1 étaient inférieures à la limite de détection, ce qui a empêché le calcul du coefficient de corrélation.

tenant compte de [S] ou de [C], n'a presque plus d'effet bénéfique; les seuls coefficients de corrélation à augmenter sont ceux impliquant les fractions Zn(F1) et Zn(F4).

En considérant de nouveau la représentation graphique des concentrations de zinc dans les tiges en fonction de [Zn(F1)] ou de [Zn(F2)] (Figures 6.25 et 6.26 respectivement), tout en faisant abstraction de la station PE-01, on peut discerner deux populations statistiques assez distinctes. Il s'agit en effet d'un premier groupe de stations "contaminées" (LR-09, 13, 15, 17 et BR-11), lesquelles s'alignent de manière cohérent en fonction de $[M_s]$, et d'un deuxième groupe de stations caractérisées par des niveaux plus faibles de $[Zn_t]$, l'alignement de ces stations en fonction de $[M_s]$ croissante étant moins bien défini.

L'écart apparent entre les deux groupes de stations reflète peut être une contribution additionnelle à $[Zn_t]$ par voie d'accumulation directe à partir de la colonne d'eau; les concentrations de zinc dans l'eau sont-elles plus élevées aux stations du premier groupe qu'aux autres stations? Par ailleurs, dans son étude de la distribution de cuivre dans des spécimens de Phragmites australis prélevés dans divers lacs italiens, Chiaudani (1969) a mis en évidence un comportement semblable. Pour la même gamme de concentrations de cuivre dans les sédiments (40-80 $\mu\text{g/g}$ Cu-total), ce chercheur a trouvé deux groupes distincts de stations; à l'intérieur de chaque groupe de stations, les concentrations de cuivre dans les tiges et les feuilles augmentaient en fonction de $[Cu_s]$, mais il y avait un écart d'environ 10 $\mu\text{g/g}$ entre les deux droites de régression. Selon Hutchinson (1975), de telles différences s'expliqueraient par la présence de races physiologiques ayant des différences génétiques; un mécanisme semblable pourrait possiblement expliquer les présents résultats.

Enfin, signalons que si on n'avait dosé que les teneurs totales des différents métaux (les dernières colonnes dans les Tableaux 6.37 et 6.38), on aurait mis en évidence quelques relations avec le zinc mais non avec le cuivre.

6.4.3 Synthèse

Dans les sections 6.4.1 et 6.4.2, nous avons présenté divers résultats concernant l'assimilation de Cu, Zn et Fe par Nuphar variegatum; le but de cette dernière section est de synthétiser cette information et de faire ressortir les résultats qui s'accordent ou divergent. A cette fin, les Tableaux 6.39 à 6.41 regroupent pour chaque métal les observations les plus pertinentes et des déductions faites à partir de ces observations. Quelques constatations spécifiques se dégagent de ce bilan général.

Cuivre: Une partie appréciable du contenu de N. variegatum en cuivre, aussi bien dans les tiges que dans les rhizomes, semble provenir des sédiments (cf. Aulio, 1980) et la concentration de cuivre dans la fraction 2 constitue le meilleur indice de la biodisponibilité du cuivre dans les sédiments.

Zinc: Le contenu de N. variegatum en zinc semble provenir en bonne partie de la colonne d'eau. Les teneurs de zinc dans les sédiments superficiels et dans les tiges semblent refléter la concentration de zinc dans la colonne d'eau; les nombreuses corrélations $[Zn_s]$ vs $[Zn_t]$ ne traduisaient pas de relation de cause à effet mais plutôt l'influence commune de $[Zn]$ dans l'eau.

Fer: Le contenu en fer des rhizomes de N. variegatum semble partiellement tiré des sédiments, la concentration de fer dans la fraction 3 (normalisée en fonction de la teneur du sédiment en soufre) étant le meilleur indice de la biodisponibilité du fer dans les sédiments. Le fer dans les tiges proviendrait plutôt de la colonne d'eau.

Tableau 6.39: Bioaccumulation du cuivre par Nuphar variegatum - synthèse des résultats.

<u>Données</u>	<u>Observations</u>	<u>Déductions possibles</u>
[M _t]	corrélation positive avec [Zn _t] corrélation négative avec [Mn _t]	source anthropique commune assimilation de Cu inhibée par Mn
[M _r] vs [M _t]	corrélation positive [Cu _r] vs [Cu _t] corrélation positive [Cu _r] / [Mn _r] vs [Cu _t]	assimilation de Cu au niveau du rhizome et partage subséquent entre Cu _r et Cu _t inhibition de Mn sur la translocation de Cu vers la tige
[M _s] vs [M _r]	corrélations positives [Cu(F1)] et [Cu(F2)] vs [Cu _r] après normalisation en divisant par [Fe(F1)] ou [S] corrélations 0-2 cm 8-10 cm	Cu dans premières fractions (F1 et F2) le plus disponible vis-à-vis du rhizome
[M _s] vs [M _t]	corrélations positives [Cu(F3)] et [Cu(F2)]/[Fe(F2)] vs [Cu _t] corrélations 0-2 cm 8-10 cm	Cu dans fraction F2 disponible vis-à-vis de la tige (cf. rhizome ci-haut); compétition Cu, Fe au niveau de l'assimilation [Cu(F3)] et [Cu _t] influencées par [Cu] dans colonne d'eau

Tableau 6.40: Bioaccumulation du zinc par Nuphar variegatum - synthèse des résultats.

<u>Données</u>	<u>Observations</u>	<u>Déductions possibles</u>
$[M_t]$	corrélation positive avec $[Cu_t]$	source anthropique commune
$[M_r]$	corrélation positive avec $[Mn_r]$, $[Fe_r]$	
$[M_r]$ vs $[M_t]$	absence de corrélation $[Zn_r]$ vs $[Zn_t]$	assimilation de Zn au ni- veau du rhizome contre- indiquée
$[M_s]$ vs $[M_r]$	corrélation négative $[Zn_r]/[Fe_r]$ vs $[Zn_t]$	Assimilation de Zn favorisée par Fe
$[M_s]$ vs $[M_t]$	absence de corrélation $[Zn_s]$ vs $[Zn_r]$	assimilation de Zn au niveau du rhizome contre- indiquée
$[M_s]$ vs $[M_t]$	abondance de corrélations positives, surtout après norma- lisation en divisant par $[S]$ ou $[C]$, ou encore après élimi- nation station PE-01	$[Zn_t]$ et $[Zn(F1 + F4)]$ influencées par $[Zn]$ dans colonne d'eau
$[M_s]$ vs $[M_t]$	fractions F1 → F4, S2 → S5 impliquées	échanges rapides de Zn entre fractions F1 → F4 et avec eau susjacente
	corrélations 0-2 cm 8-10 cm	

Tableau 6.41: Bioaccumulation du fer par Nuphar variegatum - synthèse des résultats.

<u>Données</u>	<u>Observations</u>	<u>Déductions possibles</u>
$[M_t]$	corrélation positive avec $[Cu_t]$ et $[Zn_t]$, stations de 2ème groupe	

$[M_r]$ vs $[M_t]$	corrélation positive $[Fe_r]$ vs $[Fe_t]$, mais stations de 2ème groupe seulement	assimilation de Fe au niveau du rhizome et partage subséquent entre Fe_r et Fe_t

$[M_s]$ vs $[M_r]$	corrélation positive $[Fe(F3)]$ vs $[Fe_r]$ après normali- sation en divisant par $[S]$, sédiments superficiels seulement	Fe dans fraction F3 dispo- nible vis-à-vis du rhizome

$[M_s]$ vs $[M_t]$	absence de corrélation $[Fe_s]$ vs $[Fe_t]$	Fe immobilisé au niveau du rhizome, pas de transloca- tion vers tige

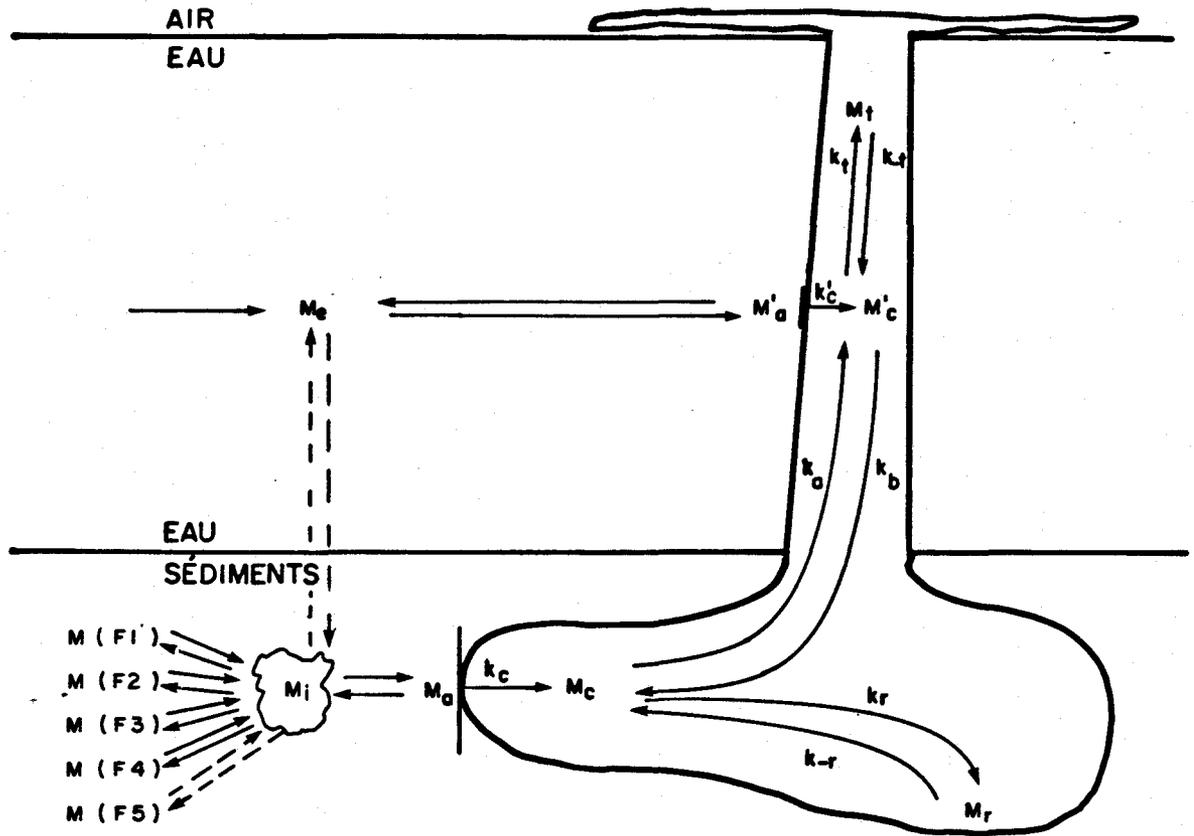
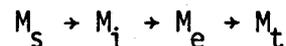


Figure 6.28: Schéma de la bioaccumulation de métaux par *Nuphar variegatum*, en tenant compte de la spéciation des métaux dans les sédiments et de deux voies possibles d'assimilation (via le rhizome et/ou la tige). Les symboles ont la même signification que sur la Figure 6.22; M_e = métal dans l'eau environnante; M'_a = métal retenu à l'extérieur de la tige; M'_c = métal^a cellulaire en solution dans la tige; k_a = constante de vitesse de translocation acropète; k_b = constante de vitesse de translocation basipète.

De manière générale, on doit conclure que même si les schémas de bioaccumulation développés antérieurement (Figures 6.19 et 6.22) concordent assez bien avec les observations pour le cuivre, ils sont inadéquats pour expliquer l'assimilation du fer et surtout celle du zinc. En effet, il faudrait compléter ces schémas en ajoutant la possibilité de bioaccumulation du métal directement à partir de la colonne d'eau, M_e , et en indiquant l'interaction possible entre M_e et M_i (voir la Figure 6.28). Signalons que cette dernière voie de bioaccumulation



a récemment été proposée par Welsh et Denny (1980) pour expliquer une relation apparente entre $[Pb_s]$ et $[Pb_t]$ chez des spécimens de Potamogeton crispus et de Potamogeton perfoliatus prélevés dans un lac influencé par d'anciennes activités minières; ces mêmes auteurs avaient noté antérieurement (1979) qu'il peut y avoir une translocation acropète (rhizome \rightarrow tige) du cuivre mais non du plomb dans ces deux espèces. Le comportement du zinc chez N. variegatum dans la région de Rouyn-Noranda ressemble à celui décrit pour le plomb chez P. crispus et P. perfoliatus.

Compte tenu de ces observations, on ne peut suggérer l'emploi de N. variegatum pour évaluer la biodisponibilité des métaux dans les sédiments que pour le cuivre (Cu_r et Cu_t) et le fer (Fe_r). Pour ces éléments, les résultats de la présente étude indiquent clairement que seulement une fraction des métaux dans les sédiments est en relation avec N. variegatum; en d'autres termes, à une exception près, aucune relation ne se manifeste entre $[M_r]$ ou $[M_t]$ et $[M(S5)]$, cette dernière étant la concentration totale du métal dans les sédiments (voir les Tableaux 6.36 à 6.38, dernière colonne). Dans le cas du cuivre, c'est la fraction F2 qui constitue le meilleur indice de sa biodisponibilité globale alors que pour le fer, la fraction F3 (normalisée en fonction de la teneur du sédiment en soufre réduit) donne la meilleure indication de sa biodisponibilité au niveau du rhizome. Soulignons que pour ces métaux, seules une ou deux fractions géochimiques dans les sédi-

ments donnent des corrélations avec $[M_r]$ ou $[M_t]$, ce qui suggère que le cuivre et le fer dans les fractions F1 → F5 ne sont pas en équilibre (cf. sections 6.2 et 6.4.2). Par ailleurs, ce sont toujours les sédiments superficiels (0-2 cm) qui donnent les meilleures corrélations avec $[M_r]$ ou $[M_t]$: s'agit-il d'une indication que N. variegatum puise ses métaux traces préférentiellement dans cette strate des sédiments?

Les implications pratiques de ces conclusions dans le cadre d'un réseau de "monitoring" des métaux traces dans le milieu aquatique sont discutées dans la section 7.2.

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans cette dernière section, on fait ressortir les principales conclusions qu'on peut tirer de l'information contenue dans ce rapport et on fait certaines recommandations concernant des applications ou des travaux à entreprendre.

7.1 Bivalves

Conclusions

- Les deux bivalves échantillonnés, Elliptio complanata et Anodonta grandis présentent un bon potentiel pour le "monitoring" biologique: i) ils accumulent les métaux traces; ii) ce sont des organismes filtreurs; iii) ils sont sédentaires; iv) ils sont relativement abondants lorsque présents à une station; v) ils ont une vie de plusieurs années; vi) ils sont faciles à échantillonner, à transporter et à conserver; vii) ils offrent suffisamment de matériel pour l'analyse.
- Plusieurs relations importantes sont mises en évidence entre les teneurs en métaux traces dans les bivalves (ou dans leurs organes) et les concentrations de ces métaux dans différentes fractions géochimiques des sédiments. Ces relations $[M(\text{organismes})] - [M(\text{sédiments})]$ suggèrent que les deux bivalves ont un bon potentiel pour être utilisés comme indicateurs de pollution par les métaux traces.
- Les meilleures relations identifiées sont généralement entre $[M(\text{organisme})] - [M(S3)]/[Fe(S3)]$, ce qui suggère: i) que seulement une partie des métaux traces particulaires est accessible aux deux bivalves; ii) que les oxydes de fer dans les sédiments jouent un rôle protecteur; iii) que les réactifs utilisés pour extraire la fraction 3 des métaux particulaires ($NH_2OH.HCl - HOAc$) pourrait être utilisée pour estimer la disponibilité des métaux traces particulaires pour les deux bivalves.

- . Les relations [M(organismes)] - [M(sédiments)] trouvées suggèrent qu'une partie importante des métaux accumulés dans les bivalves provient directement des sédiments (ingestion, endocytose); elles ne constituent cependant pas une preuve. En effet, on pourrait également supposer que les bivalves assimilent les métaux en solution, lesquels sont en équilibre avec les métaux particuliers (p.e. modèle de Oakley et al., 1981).
- . A chaque station, on note une variabilité relativement importante des teneurs en métaux traces dans les organes des bivalves; on a identifié que, du moins pour Anodonta grandis, des différences d'âge ou de sexe sont responsables pour une bonne partie de cette variabilité. Dans l'éventualité où on s'intéresse au "monitoring" biologique, il serait important de minimiser cette variabilité en quantifiant l'effet de divers paramètres comme l'âge, le sexe, le cycle de reproduction, l'indice de condition.

Recommandations

Dans l'optique de l'instauration future d'un réseau de "monitoring" biologique et dans le but d'améliorer les relations [M(organismes)] - [M(sédiments)], il est recommandé qu'on favorise des études:

- . Pour déterminer ces mêmes relations dans des lieux géographiques différents en essayant d'augmenter la gamme de concentrations de métaux particuliers étudiée.
- . Pour quantifier les effets de l'âge, du sexe, du cycle de reproduction et de l'indice de condition sur l'accumulation des métaux par les bivalves.
- . Pour mieux comprendre le rôle protecteur de certains substrats solides dans les sédiments (ex. oxyhydroxydes de fer).

Dans le cas où on veut utiliser à court terme les deux bivalves comme indicateurs biologiques, il est recommandé:

- . qu'on utilise les individus de même âge, de même sexe et prélevés au même temps de l'année.

7.2 Plantes aquatiques

Conclusions

- . Pour être utile comme indicateur de la biodisponibilité de métaux traces dans les sédiments, une plante devrait idéalement satisfaire aux critères suivants: (i) omniprésence et abondance (représentative du site, de la région d'étude); (ii) tolérance pour les métaux traces; (iii) caractéristiques anatomiques facilitant l'identification sur le terrain et la collecte des spécimens; (iv) facteur de concentration élevé; grande capacité de bioaccumulation; (v) système de tiges/feuilles peu ramifié, afin de minimiser le rapport surface/volume et réduire ainsi l'assimilation de solutés (métaux) à partir de l'eau; (vi) système racinaire et vasculaire développé; (vii) capacité d'assimiler des solutés (métaux) à partir des sédiments et de les transporter vers les parties supérieures de la plante. De tous ces critères, c'est probablement le dernier qui est le plus important.
- . La plante considérée dans cette étude, Nuphar variegatum répond bien aux critères (i), (ii), (iii), (v) et (vi); par ailleurs, elle présente une accumulation de métaux plutôt faible (critère (iv)) et sa capacité d'assimiler des métaux à partir des sédiments semble limitée (critère (vii)) - voir ci-dessous.
- . Peu de relations sont observées entre les teneurs en métaux traces dans les tiges ou les rhizomes de N. variegatum et les concentrations totales [M(S5)] de ces métaux dans les sédiments;

par ailleurs, davantage de corrélations se manifestent entre les concentrations de métaux dans la plante et celles dans les autres fractions géochimiques des sédiments [M(F1) + (F4)]. Cette observation suggère que seulement une partie des métaux dans les sédiments est disponible à N. variegatum et démontre l'intérêt de déterminer la spéciation des métaux traces dans les sédiments.

- De l'analyse des relations $[M_r]$ vs $[M_t]$, $[M(Fk)]$ vs $[M_r]$ et $[M(Fk)]$ vs $[M_t]$, il ressort que N. variegatum n'est utile pour évaluer la biodisponibilité des métaux dans les sédiments que dans le cas du cuivre. Pour les autres métaux étudiés (Fe, Zn), il semble que l'accumulation directe à partir de la colonne d'eau vient masquer les relations potentielles entre $[M_s]$ et $[M_p]$. Par ailleurs, d'autres plantes enracinées devraient souffrir, à priori, de cette même ambiguïté (importance relative de la bioaccumulation de métaux à partir des sédiments par rapport à celle à partir de l'eau susjacente). Signalons que N. variegatum pourrait éventuellement servir comme interpréteur global de la biodisponibilité des trois métaux (eau et sédiments).

Recommandations

- A la lumière des résultats du présent projet, et en tenant compte de résultats pertinents dans la littérature scientifique, nous suggérons le schéma suivant comme guide pour l'emploi de plantes aquatiques comme bioindicateurs de la présence de métaux traces dans le milieu aquatique.

Compartiment visé	Métal	Type de plante	Partie de la plante
eau	M_e	algues attachées (péri-phyton), prélevées sur des substrats artificiels	-
sédiments	M_i, M_s	macrophyte enraciné	racines, rhizome
		macrophyte émergent	tiges, feuilles
eau et sédiments	M_e, M_i, M_s	macrophyte enraciné	plante entière

. Dans l'optique de l'intégration de plantes aquatiques supérieures dans un réseau de surveillance des métaux traces dans le milieu aquatique, nous recommandons:

- (i) de prélever toutes les plantes pendant la même période (c'est-à-dire pendant le même stade de croissance, avant le début de la sénescence);
- (ii) de prélever plusieurs spécimens à chaque site, en vue de préparer un échantillon composite pour minimiser l'effet de la variation inter-plante à chaque station;
- (iii) d'analyser les parties de plante indiquées ci-haut.

. Comme mesures complémentaires dans un tel réseau, nous suggérons:

- (i) de prélever des échantillons des sédiments superficiels (0-2 cm) à chaque site;
- (ii) de déterminer sur ces échantillons les concentrations de métaux dans les fractions F1, F2 et F3, ainsi que la concentration en soufre réduit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS, F.S., H. COLE et L.B. MASSIE (1973).
Element constitution of selected aquatic vascular plants from Pennsylvania: submerged and floating leaved species and rooted emergent species. *Environ. Pollut.*, 5: 117-147.
- AULIO, K. (1980).
Accumulation of copper in fluvial sediments and yellow water lilies (Nuphar lutea) at varying distances from a metal processing plant. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 25: 713-717.
- BEST (1979).
Etude écologique de la région de Rouyn-Noranda. Rapport final E-17, Groupe écologie, Bureau d'étude sur les substances toxiques, Services de protection de l'environnement du Québec, 552 pp.
- BORG, H., A. EDIN, K. HOLM et E. SKOLD (1981).
Determination of metals in fish livers by flameless atomic absorption spectroscopy. *Water Res.*, 15, 1291-1295.
- BOYD, C.E. (1970).
Chemical analyses of some vascular aquatic plants. *Arch. Hydrobiol.*, 67, 78-85.
- BOYDEN, C.R. (1974).
Trace element content and body size in molluscs. *Nature*, 251: 311-314.
- BRANNON, J.M., R.M. ENGLER, J.R. ROSE, P.G. HUNT et I. SMITH (1976).
Distribution of toxic heavy metals in marine and freshwater sediments. Dans: Proceedings of the specialty conference on dredging and its environmental effects. P.A. Krenkel, J. Harrison et J.C. Burdick [eds]. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., p. 455-495.
- BROOKS, R.R. et M.G. RUMSBY (1965).
The biogeochemistry of trace element uptake by some New Zealand bivalves. *Limnol. Oceanogr.*, 10: 521-527.
- BRYAN, G.W. (1971).
The effects of heavy metals (other than mercury) on marine and estuarine organisms. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, B177: 389-410.
- BRYAN, G.W. (1973).
The occurrence and seasonal variation of trace metals in the scallops Pecten maximus (L.) and Chlamys opercularis (L.). *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 53: 145-166.

BRYAN, G.W. et L.G. HUMMERSTONE (1978).
Heavy metals in the burrowing bivalve Scrobicularia plana from contaminated and uncontaminated estuaries. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58: 401-419.

BRYAN, G.W. et H. UYSAL (1978).
Heavy metals in the burrowing bivalve Scrobicularia plana from the Tamar estuary in relation to environmental levels. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58: 89-108.

CHESTER, R. et M.J. HUGHES (1967).
A chemical technique for the separation of ferro-manganese minerals, carbonate minerals and adsorbed trace elements from pelagic sediments. Chem. Geol., 2: 249-262.

CHIAUDANI, G. (1969).
Contenuti normali ed accumuli di rane in Phragmites communis L come risposta a quelli nei sedimenti di sei laghi italiani. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 25, 81-95 (cit  dans Hutchinson, 1975).

CLARKE, A.H. (1973).
The freshwater molluscs of the Canadian interior basin. Malacologia, 13: 1-509.

COOLEY, T.N., D.F. MARTIN, W.C. DURDEN et B.D. PERKINS (1979).
A preliminary study of metal distribution in three waterhyacinth biotypes. Water Res., 13: 343-348.

COSSA, D., E. BOURGET et J. PIUZE (1979).
Sexual maturation a a source of variation in the relationship between cadmium concentration and body weight of Mytilus edulis L. Mar. Pollut. Bull., 10: 174-176.

COSSA, D., E. BOURGET, D. POULIOT, J. PIUZE et J.P. CHANUT (1980).
Geographical and seasonal variations in the relationship between trace metal content and body weight in Mytilus edulis. Mar. Biol., 58: 7-14.

COWGILL, U.M. (1974).
The hydrogeochemistry of Linsley Pond. II. The chemical composition of the aquatic macrophytes. Arch. Hydrobiol. Suppl., 45, 1-119.

CROWLEY, T.E. (1957).
Age determination in Anodonta. J. Conchology, 24: 201-207.

CUSHING, C.E. et J.M. THOMAS (1980).
Copper and zinc kinetics in Myriophyllum heterophyllum Michx. and Potamogeton richardsonii (Ar. Benn.) Rydb. Ecology, 61: 1321-1326.

- DARRACOTT, A. et H. WATLING (1975).
The use of molluscs to monitor cadmium levels in estuaries and coastal marine environments. *Trans. Roy. Soc. Afr.*, 41: 325-338.
- DeMARTE, J.A. et R.T. HARTMAN (1974).
Studies on absorption of ^{32}P , ^{59}Fe and ^{45}Ca by water-milfoil *Myriophyllum exalbescens* (Fernald). *Ecology*, 55: 188-194.
- DENNY, P. (1980).
Solute movement in submerged angiosperms. *Biol. Rev.*, 55: 65-92.
- DEURER, R., U. FORSTNER et G. SCHMOLL (1978).
Selective chemical extraction of carbonate associated metals from recent lacustrine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 425-427.
- DeWOLF, P. (1975).
Mercury content of mussels from West European coasts. *Mar. Pollut. Bull.*, 6: 61-63.
- DIETZ, F. (1973).
The enrichment of heavy metals in submerged plants. Dans: Advances in Water Pollution Research. S.H. Jenkins [ed.], Pergamon Press, Oxford, U.K., pp. 53-62.
- DUNSTAN, W.M., H.L. WINDOM et G.L. McINTIRE (1975).
The role of *Spartina alterniflora* in the flow of lead, cadmium and copper through the salt-marsh ecosystem. Dans: Mineral cycling in southeastern ecosystems, F.G. Howell, J.B. Gentry et M.H. Smith [eds], *Proc. Symp.*, Augusta, Georgia, mai 1974. ERDA Symp. Ser., pp. 250-256.
- FORESTER, A.J. (1980).
Monitoring the bioavailability of toxic metals in acid-stressed shield lakes using pelecypod molluscs (clams, mussels). *Trace Subst. Environ. Health*, 14: 142-147.
- FORSTNER, U. et S.R. PATCHINEELAM (1976).
Bindung und Mobilisation von Schwermetallen in fluviatilen Sedimenten. *Chemiker Zeitung*, 100: 49-57.
- FORSTNER, U. et G.T.W. WITTMAN (1981).
Metal pollution in the Aquatic Environment. 2^{ème} édition, Springer-Verlag, Berlin, 486 p.
- FOWLER, S.W., M. HEYRAUD et J. LaROSA (1978).
Factors affecting methyl and inorganic mercury dynamics in mussels and shrimp. *Mar. Biol.*, 46: 267-276.

- FRANZIN, W.G. et G.A. McFARLANE (1980).
An analysis of the aquatic macrophyte, Myriophyllum exalbescens, as an indicator of metal contamination of aquatic ecosystems near a base metal smelter. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 24: 597-605.
- FRAZIER, J.M. (1979).
Bioaccumulation of cadmium in marine organisms. Environ. Health Persp., 28: 75-79.
- GALLAGHER, J.L. et P.L. WOLF (1980).
Field bioassays for the role of plants as vectors in contaminant transfer from dredged material. Dans: Contaminants and sediments, vol. 2, R.A. Baker [ed] Ann Arbor Sci. Publ. Inc., Ann Arbor, Michigan, pp. 445-463.
- GENTNER, S.R. (1977).
Uptake and transport of iron and phosphate by Vallisneria spiralis L. Aquatic Bot., 3: 267-272.
- GEORGE, S.G. et T.L. COOMBS (1977).
The effects of chelating agents on the uptake and accumulation of cadmium by Mytilus edulis. Mar. Biol., 39: 261-268.
- GEORGE, S.G. et B.J.S. PIRIE (1980).
Metabolism of zinc in the mussel, Mytilus edulis (L.): a combined ultrastructural and biochemical study. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 60: 575-590.
- GEORGE, S.G., B.J.S. PIRIE, A.R. CHEYNE, T.L. COOMBS et P.T. GRANT (1978).
Detoxication of metals by marine bivalves: an ultrastructural study of the compartmentation of copper and zinc in the oyster Ostrea edulis. Mar. Biol., 45: 147-156.
- GIBBS, R.J. (1977).
Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon rivers. Geol. Soc. Amer. Bull., 88: 829-843.
- GUPTA, S.K. et K.Y. CHEN (1975).
Partitioning of trace metals in selective chemical fractions of nearshore sediments. Environ. Letters, 10: 129-158.
- HARDING, J.P.C. et B.A. WHITTON (1978).
Zinc, cadmium and lead in water, sediments and submerged plants of the Derwent reservoir, Northern England. Water Res., 12: 307-316.
- HUTCHINSON, G.E. (1975).
The chemical ecology of freshwater macrophytes. Dans: A. treatise on limnology, Volume III, limnological botany, John Wiley and Sons, chapitre 30, pp. 264-407.

HUTCHINSON, T.C., A. FEDORENKO, J. FITCHKO, A. KUJA, J. VAN LOON et J. LICKWA (1975).

Movement and compartmentation of nickel and copper in an aquatic ecosystem. *Trace Subst. Environ. Health*, 9: 89-105.

JACKIM, E., G. MORRISON et R. STEELE (1977).

Effects of environmental factors on radiocadmium uptake by four species of marine bivalves. *Mar. Biol.*, 40: 303-308.

JANSSEN, H.H. et N. SCHOLZ (1979).

Uptake and cellular distribution of cadmium in Mytilus edulis. *Mar. Biol.*, 55: 133-141.

JONES, W.G. et K.F. WALKER (1979).

Accumulation of iron, manganese, zinc and cadmium by the Australian freshwater mussel Velesunio ambiguus (Phillipi) and its potential as a biological monitor. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 30: 741-751.

KINKADE, M.L. et H.E. ERDMAN (1975).

The influence of hardness components (Ca^{2+} and Mg^{2+}) in water on the uptake and concentration of cadmium in a simulated freshwater ecosystem. *Environ. Res.*, 10: 308-313.

KUMARAGURU, A.K. et K. RAMAMOORTHY (1979).

Accumulation of copper in certain bivalves of Vellar estuary, Porto Novo, S. India in natural and experimental conditions. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 9: 467-475.

JENNE, E.A. et S.N. LUOMA (1977).

Forms of trace elements in soils, sediments and associated waters: an overview of their determination and biological availability. U.S. Energy Research and Development Administration Symp. Ser., 42: 110-143.

LARSEN, V.J. et H.H. SCHIERUP (1981).

Macrophyte cycling of zinc, copper, lead and cadmium in the littoral zone of a polluted and a non-polluted lake. II. Seasonal changes in heavy metal content of above-ground biomass and decomposing leaves of Phragmites australis (Cav.) Trin. *Aquatic Bot.*, 11: 211-230.

LEATHERLAND, T.M. et J.D. BURTON (1974).

The occurrence of some trace metals in coastal organisms with particular reference to the Solent region. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 54: 457-468.

LEE, C.R., T.C. STURGIS et McLANDIN (1976).

A hydroponic study of heavy metal uptake by selected marsh plant species. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Dredged Material Research Program, DMRP Technical Report D-76-5, Vicksburg, Mississippi, USA, 63 p.

LOWE, D.M. et M.N. MOORE (1979).
The cytochemical distributions of zinc (Zn II) and iron (Fe III) in the common mussel, Mytilus edulis, and their relationship with lysosomes. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 59: 851-858.

LUOMA, S.N. et G.W. BRYAN (1978).
Factors controlling the availability of sediment-bound lead to the estuarine bivalve Scrobicularia plana. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58: 793-802.

LUOMA, S.N. et G.W. BRYAN (1979).
Trace metal bioavailability: modelling chemical and biological interactions of sediment-bound zinc. Dans: Chemical modelling-speciation, sorption, solubility and kinetics in aqueous systems, E.A. Jenne [ed]. ACS Symp. Ser. No 93, Amer. Chem. Soc., Washington, p. 577-611.

LUOMA, S.N. et G.W. BRYAN (1981).
A statistical assessment of the controls on concentrations of Ag, Cd, Co and Cu in bivalves (Scrobicularia plana) and polychaetes (Nereis diversicolor) from 18 estuaries (manuscript in preparation).

LUOMA, S.N. et E.A. JENNE (1976).
Factors affecting the availability of sediment-bound cadmium to the estuarine, deposit-feeding clam; Macoma balthica. Dans: Symp. Radioecology, C.E. Cushing [ed], Spec. Publ. No 1, Ecological Soc. Amer., pp. 283-290.

LUOMA, S.N. et E.A. JENNE (1977).
The availability of sediment-bound cobalt, silver, and zinc to a deposit-feeding clam. Dans: Biological implications of metals in the environment, R.E. Wildung et H. Drucker [eds], pp. 213-230.

MANLY, R. et W.O. GEORGE (1977).
The occurrence of some heavy metals in populations of the freshwater mussel Anodonta anatina (L.) from the river Thames. Environ. Pollut., 14: 139-154.

MAYES, R. et A. McINTOSH (1975).
The use of aquatic macrophytes as indicators of trace metal contamination in freshwater lakes. Trace Subst. Environ. Health, 9, 157-167.

MAYES, R.A., A.W. McINTOSH et V.L. ANDERSON (1977).
Uptake of cadmium and lead by a rooted aquatic macrophyte (Elodea canadensis). Ecology, 58: 1176-1180.

McINTOSH, A.W., B.K. SHEPPARD, R.A. MAYES, G.J. ATCHINSON et D.W. NELSON (1978).
Some aspects of sediment distribution and macrophyte cycling of heavy metals in a contaminated lake. J. Environ. Qual., 7: 301-305.

- MEGLITSCH, P.A. (1972).
Invertebrate zoology, 2^eme edition, Oxford University Press, New York,
834 p.
- MORTIMER, D.C. et A. KUDO (1975).
Interaction between aquatic plants and bed sediments in mercury uptake
from flowing water. *J. Environ. Qual.*, 4: 491-495.
- MUDROCH, A. (1980).
Biogeochemical investigation of Big Creek Marsh., Lake Erie, Ontario.
J. Great Lakes Res., 6: 338-347.
- MUDROCH, A. et J. CAPOBIANCO (1978).
Study of selected metals in marshes on Lake St.Clair, Ontario. *Arch.
Hydrobiol.*, 84: 87-108.
- MUDROCH, A. et J.A. CAPOBIANCO (1979).
Effects of mine effluent on uptake of Co, Ni, Cu, As, Zn, Cd, Cr and Pb
by aquatic macrophytes. *Hydrobiologia*, 64, 223-231.
- NICKLESS, G., R. STENNER et N. TERRILLE (1972).
Distribution of cadmium, lead and zinc in the Bristol Channel. *Mar.
Pollut. Bull.*, 3: 188-190.
- NIELSEN, S.A. (1974).
Vertical concentration gradients of heavy metals in cultured mussels.
N.Z. J. Mar. Freshwater Res., 8: 631-636.
- OAKLEY, S.M., P.O. NELSON et K.J. WILLIAMSON (1981).
Model of trace-metal partitioning in marine sediments. *Environ. Sci.
Technol.*, 15: 474-480.
- OAKLEY, S.M., C.E. DELPHEY, K.J. WILLIAMSON et P.O. NELSON (1980).
Kinetics of trace metal partitioning in model anoxic marine sediments.
Water Res., 14: 1067-1072.
- PEDEN, J.D., J.H. CROTHERS, C.E. WATERFALL et J. BEASLY (1973).
Heavy metals in Somerset marine organisms. *Mar. Pollut. Bull.*, 4: 7-9.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1980).
Trace metals. Dans: The International Mussel Watch. Report on
Workshop sponsored by the Environmental Studies Board Commission on
Natural Resources. National Academy of Science, U.S. Washington D.C.
- PENNAK, R.W. (1953).
Fresh-water invertebrates of the United States. Ronald Press, New
York.

- PETKOVA, L.M. et I.P. LUBYANOV (1969).
Konzentratsiia deiakykh mikroelementiv u makrofitiv vodoin stepvoi zony Ukrainy. Ukr. Bot. Zh., 26, 90-96 (cit  dans Hutchinson, 1975).
- PHILLIPS, D.J.H. (1976).
The common mussel Mytilus edulis as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper. I. Effect of environmental variables on uptake of metals. Mar. Biol., 38: 59-69.
- PHILLIPS, D.J.H. (1977).
The use of biological indicator organisms to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments. A review. Water Pollut., 13: 281-317.
- PRINGLE, B.H., D.E. HISSONG, E.L. KATZ et S.T. MULAWKA (1968).
Trace metal accumulation by estuarine mollusks. J. Sanit. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 94: 455-475.
- RAY, S. et W. WHITE (1976).
Selected aquatic plants as indicator species for heavy metal pollution. J. Environ. Sci. Health, A11: 717-725.
- RAY, S.N. et W.J. WHITE (1979).
Equisetum arvense - an aquatic vascular plant as a biological monitor for heavy metal pollution. Chemosphere, 3: 125-128.
- RIEMER, D.N. et S.J. TOTH (1968).
A survey of the chemical composition of aquatic plants in New Jersey. N.J. Agr. Exp. Stat., Coll. Agric. Environ. Sci. Rutgers Univ., Bull. 820, 14 p. (cit  dans Hutchinson, 1975).
- ROMERIL, M.G. (1971a). The uptake and distribution of ⁶⁵Zn in oysters. Mar. Biol., 9: 347-354.
- ROMERIL, M.G. (1971b).
CERL Laboratory notes No. RD/L/N31/71, p. 1-8 (rapport  par Phillips (1977)).
- ROMERIL, M.G. (1974).
Trace metals in sediments and bivalve mollusca in Southampton water and the Solent. Rev. Intern. Oceanogr. Med., 33: 31-47.
- ROMERIL, M.G. (1979).
The occurrence of copper, iron and zinc in the hard shell clam, Mercenaria mercenaria, and sediments of Southampton water. Estuar. Coast. Mar. Sci., 9: 423-434.
- SCHIERUP, H.H. et V.J. LARSEN (1981).
Macrophyte cycling of zinc, copper, lead and cadmium in the littoral zone of a polluted and a non-polluted lake. I. Availability, uptake and translocation of heavy metals in Phragmites australis (Cav.) Trin. Aquatic Bot., 11: 197-210.

- SCHULZ-BALDES, M. (1974).
Lead uptake from sea water and food, and lead loss in the common mussel Mytilus edulis. Mar. Biol., 25: 177-193.
- SEGAR, D.A., J.D. COLLINS et J.P. RILEY (1971).
The distribution of the major and some minor elements in marine animals. Part II. Molluscs. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 51: 131-136.
- SIMKISS, K. (1979).
Metal ions in cells. Endavour, New Series, 3, 2-6.
- SMITH, A.L., R.H. GREEN et A. LUTZ (1975).
Uptake of mercury by freshwater clams (family Unionidae). J. Fish. Res. Board Can., 32: 1297-1303.
- STRONG, C.R. et S.N. LUOMA (1981).
Variations in the correlation of body size with concentrations of Cu and Ag in the bivalve Macoma balthica. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 38: 1059-1064.
- TESSIER, A., P.G.C. CAMPBELL et M. BISSON (1982).
Particulate trace metal speciation in stream sediments and relationships with grain size: implications for geochemical exploration. J. Geochem. Explor. (accepté pour publication).
- TESSIER, A., P.G.C. CAMPBELL et M. BISSON (1979).
Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem., 51: 844-851.
- TESSIER, A., P.G.C. CAMPBELL et M. BISSON (1980).
Trace metal speciation in the Yamaska and St. François rivers (Quebec). Can. J. Earth Sci., 17: 90-105.
- THOMSON, J.D. (1979).
Heavy metals in the native oyster (Ostrea angasi) and mussel (Mytilus edulis planatus) from Port Davey, South-Western Tasmania. Aust. J. Mar. Freshwater Res., 30: 421-424.
- VOROB'YEV, V.I. et E.I. AFANAS'YEVA (1973).
The contents of some trace elements in macrophytes of the Volga delta. Hydrobiol. J., 9(6): 60-62.
- WATLING, H.R. et R.J. WATLING (1976).
Trace metals in Choromytilus meridionalis. Mar. Pollut. Bull., 7: 91-94.

WELSH, P. et P. DENNY (1976).

Waterplants and the recycling of heavy metals in an English lake. Trace Subst. Environ. Health, 10: 217-223.

WELSH, R.P.H. et P. DENNY (1979).

The translocation of lead and copper in two submerged aquatic angiosperm species. J. Exptl. Bot., 30: 339-345.

WELSH, R.P.H. et P. DENNY (1980).

The uptake of lead and copper by submerged aquatic macrophytes in two English lakes. J. Ecology, 68: 443-455.

WRIGHT, D.A. (1978).

Heavy metal accumulation by aquatic invertebrate. Appl. Biol., 3: 331-394.

ANNEXE

**Localisation des stations échantillonnées
et observations de terrain**

Tableau A.1 : Localisation des stations échantillonnées en mai (du 18 au 22 mai) 1981 et observations de terrain.

<u>Station</u>	<u>Localisation*</u>	<u>Profondeur p1</u>	<u>Observations</u>
BE-01	1° section transversale; milieu baie à l'est de l'embouchure rivière Pelletier.	5	sédiment typique; couche brune superficielle ~ 2 cm; couche grise inférieure; nombreuses plantes.
BE-02	1° section transversale; au large de l'embouchure rivière Pelletier.	5.3	sédiment typique mais avec débris de bois; plantes et de type différent de BE-01.
BE-03	1° section transversale; milieu 3° baie, avant d'arriver en face de l'île.	5.2	sédiment typique; plantes présentes = BE-01; coquilles de mollusques présentes.
BE-04	1° section transversale; milieu dernière baie, à l'ouest.	5.5	sédiment typique (cf. BE-03); peu de plantes.
BE-05	2° section transversale, extrémité ouest, ~ 300 m du rivage.	6.3	sédiment typique (cf. BE-03); peu de plantes.
BE-06	2° section transversale; sur ligne directe entre l'île et le point rocheux (BM - MRN #1133).	7.0	sédiment typique (cf. BE-03); mais plantes très rares; coquilles de mollusques présentes.
BE-07	2° section transversale; vis-à-vis de la cabane jaune sur rivage nord.	7.7	sédiment typique (cf. BE-03); mais couche superficielle plus mince que d'habitude; pas de plantes; petit mollusque présent, différent de ceux trouvés ailleurs.
BE-08	2° section transversale; affiche perdue de vue + 20 m plus près du rivage.	7.5	sédiment typique (cf. BE-03); couche superficielle épaisseur normale; pas de plantes.
BE-09	3° section transversale; milieu baie, vis-à-vis du chalet vert, à 300 m du rivage.	6.8	sédiment typique (cf. BE-03); couche superficielle ~ 2 cm; plantes présentes.
BE-10	3° section transversale; sur ligne directe entre cabane jaune (rivage nord) et point boisé.	12.5	sédiment typique (cf. BE-03); pas de plantes.
BE-11	3° section transversale; vis-à-vis du point rocheux (BM - MRN # 1133)	11.5	sédiment typique (cf. BE-03); couche superficielle ~ 1.5 cm; pas de plantes.
BE-12	3° section transversale, extrémité ouest; vis-à-vis de l'affleurement rocheux, à 120 m du rivage.	5.0	sédiment typique (cf. BE-03); couche superficielle ~ 2 cm; pas de plantes (?) malgré faible profondeur.

Tableau A.1 (suite).

<u>Station</u>	<u>Localisation*</u>	<u>Profondeur pi</u>	<u>Observations</u>
BE-13	Milieu baie à l'extrémité sud-ouest de la baie des Garde Feu.	4.0	sédiment typique; couche superficielle différente, plus organique (?), plus légère, de couleur beige, différence entre strates moins prononcée; beaucoup de plantes; rhizomes de Nuphar (?).
BE-14	Prochaine baie vers le nord; vis-à-vis du chalet (toit bleu; fenêtre rouge; dans bois) à ~ 200 m du rivage.	4.7	sédiment typique (cf. BE-13); plantes présentes.
BE-15	Milieu baie à l'extrémité sud de la baie des Garde Feu.	6.7	sédiment typique (cf. BE-13); plantes présentes; un seul mollusque.
BE-16	Rivière Beauchastel, sortie du lac; vis-à-vis du point rocheux prononcé, à mi-chenal.	9	couche brune superficielle ~ 2 cm; plutôt inorganique; granulométrie hétérogène; pas de plantes; beaucoup de coquilles dans benne (10!); plongeur récoltait des mollusques.
BE-17	~ 500 m en aval de BE-16.	5	comme BE-16 mais couche superficielle plus fluide; plantes présentes et un mollusque.
BE-18	Rivière Beauchastel; milieu longue baie ~ 600 m en aval de BE-17.	5.5	comme BE-17; plantes présentes; plongeur récoltait des mollusques.

Tableau A.1 (suite).

<u>Station</u>	<u>Localisation*</u>	<u>Profondeur pi</u>	<u>Observations</u>
BE-19	Rivière Beauchastel, en amont du lac La Bruère; juste avant point rocheux.	9.5	première couche plutôt inorganique; beaucoup de débris organique; pas de plantes.
BR-01	Lac La Bruère, baie nord-est, à 120 m d'une petite île.	5.5	sédiment brun uniforme, pas de stratification (≠ ceux de Beauchastel), très liquide; pas de plantes; plongeur récoltait des mollusques.
BR-02	Vis-à-vis de l'embouchure de la rivière La Bruère.	5.5	couche brune superficielle 4 cm; couche inférieure grise-brune; pas de plantes.
BR-03	Baie nord-ouest, entre embouchures rivière La Bruère et rivière Beauchastel (5 prises de benne).	5.0	sédiment comme BR-02 (c'est-à-dire couche brune superficielle épaisse); plantes présentes.
BR-04	Rétrécissement à la sortie du lac vis-à-vis du point rocheux sur rive ouest à mi-chenal.	6.5	bonne motte! (première de la journée); couche brune superficielle 1 cm; pas de plantes; plongeur récoltait beaucoup de mollusques (plus 1 dans benne).
BR-05	Baie extrémité sud-ouest du lac.	7.5	sédiment comme BR-03 mais couche superficielle non épaisse; pas de plantes.
BR-06	Milieu petite baie ~ 500 m en amont de BR-05, rive ouest; vis-à-vis de l'embouchure d'un petit ruisseau.	4.3	sédiment comme BR-01; peu de stratification; sablonneux; quelques plantes.
BR-07	Entre deux petites baies, rive est.	7.0	sédiment comme BR-04 (bonne motte); pas de plantes.
BR-08	Milieu de l'embouchure de la baie ~ 700 m en amont de BR-07; rive est.	8.0	sédiment comme BR-04; pas de plantes.
BR-09	A peu près au milieu du lac, sur ligne directe entre deux îles et vis-à-vis de la troisième île.	13.0	sédiment comme BR-04; un peu de sable (!); pas de plantes.
BR-10	A ~ 80 m du point avec forte densité chalets, rive est.	6.0	sédiment comme BR-04 mais échantillon moins grand; pas de plantes.
BR-11	Milieu petite baie ~ 700 m en amont de BR-10, rive ouest.	5.0	sédiment comme BR-04 mais plus organique; plantes présentes (!).

Tableau A.1 (suite).

<u>Station</u>	<u>Localisation*</u>	<u>Profondeur pi</u>	<u>Observations</u>
LR-01	Baie nord-ouest, au nord de la rivière Kinojevis.	4.0	densité de macrophytes très élevée; pas de couche superficielle distincte; échantillon prélevé à 2.5 cm.
LR-02	Baie nord-ouest, tout près de péninsule.	4.9	sédiment plus semblable à ceux de BR-03; strates brun pâle, gris-brun, puis noir; échantillon prélevé à la surface (2 cm); plantes présentes mais différentes de celles à LR-01; plongeur n'a pas trouvé de mollusques; tamisage d'un sous-échantillon n'a rien donné.
LR-03	Dans chenal de rivière Kinojevis (courant important).	10.0	sédiment très grossier, sablonneux; 1 coquille dans benne mais plongeur n'a rien trouvé (visibilité nulle), pas de plantes.
LR-04	Baie nord-est, à l'est du chenal	4.5	sédiment comme LR-02; surface brune; fond gris; plantes présentes mais moins denses que LR-02.
LR-05	Baie nord-ouest, à peu près au milieu (5 prises de benne).	5.0	sédiments 5 ¹ 5 ² et 5 ⁵ comme LR-02, tapis de plantes vertes; échantillons 5 ³ et 5 ⁴ avaient beaucoup de plantes et peu de sédiments; plongeur n'a pas trouvé de mollusques.
LR-06	Près de l'embouchure (soupçonnée)! de la rivière Dufault.	4.0	une vraie soupe brune!; très liquide, peu dense (comme si le fond était très résistant à la benne); plantes présentes.
LR-07	Mi-chemin entre île marécageuse et chenal de la rivière Kinojevis.	4.0	couche brune superficielle mince; couche inférieure grise; beaucoup de grandes plantes.
LR-08	Milieu baie ouest en aval de l'embouchure de la rivière Dufault.	4.5	couche brune superficielle très mince; couche grise intermédiaire et couche noire au-dessous; plantes présentes; plongeur n'a pas trouvé de mollusques.
LR-09	Baie ouest, à 200 m en aval (sud-ouest) de la station LR-08 (5 prises de benne).	4.5	sédiment comme LR-08 (3 couleurs); 9 ¹ , 9 ³ et 9 ⁴ semblables; 9 ² et 9 ⁵ couche brune encore plus mince.
LR-10	Vis-à-vis de la station LR-09, rive est (courant appréciable).	4.5	bonne motte! (comme La Bruère); couche brune superficielle ~ 3 cm; couche grise inférieure, échantillonnée aussi; plantes présentes; plusieurs tubes de vers; plongeur n'a pas trouvé de mollusques.

Tableau A.1 (suite).

<u>Station</u>	<u>Localisation*</u>	<u>Prof ondeur p1</u>	<u>Observations</u>
LR-11	Dans le crochet du lac, rive ouest, à ~ 50 m du chenal, près du point rocheux.	3.5	couche brune superficielle mince; couche grise inférieure; beaucoup de racines.
LR-12	Rive-sud ouest sur ligne entre point rocheux (en amont) et "montagne" (en aval).	4.0	sédiment comme LR-08 (3 couleurs); couche brune superficielle mince; couche grise intermédiaire mince; couche noire épaisse, réduite, H ₂ S+?; beaucoup de racines.
LR-13	Rive-sud, à ~ 200 m en aval de LR-12; première de 3 petites baies.	4.0	couche brune superficielle ~ 2 cm; couche grise foncée, pas de noir; plantes présentes mais moins qu'aux autres stations.
LR-14	Rive-nord, vis-à-vis de la station LR-13.	5.0	sédiment comme LR-13; couche brune superficielle ~ 1 cm; couche grise inférieure, peu de noir; plantes présentes.
LR-15	Milieu petite baie à la sortie du lac; hors chenal.	4.5	sédiment comme LR-14 mais peu de plantes, moins de racines.
LR-16	Rivière Kinojevis, rive sud, à ~ 200 m en aval du ruisseau issu de la mine McWatters.	4.0	sédiment comme LR-14; couche superficielle brune ~ 2 cm; couche grise inférieure, pas de noir; pas de plantes.

Notes sur les sections transversales 1, 2 et 3 du lac Beauchastel.

<u>Section</u>	<u>Extrémité ouest</u>	<u>Extrémité est</u>
1	chalet brun, 2 étages chalet sur la colline	chalet brun, toit rouge
2	affiche sur le haut de la butte	chalet, toit rose, avec autobus blanc et balançoire rouge dans la cour.
3	chalet vert, milieu de la baie	chalet à droite du petit bois avec affleurement rocheux près de la rive.

Tableau A.2: Localisation des stations échantillonnées en juillet (du 27 au 31 juillet) 1981 et observations de terrain.

Station	Localisation	Observations
BE-01	Milieu de la baie à l'est de l'embouchure rivière Pelletier; environ 70 m du chalet brun à corniches blanches. Localisée un peu plus près de la berge qu'en mai.	Prélevé les cinq espèces de plantes et des bivalves (environ 30). Profondeur d'eau d'environ 30 cm. Carottes de sédiments.
BE-03	Baie à l'ouest de l'embouchure rivière Pelletier; un peu plus près de la berge qu'en mai.	Prélevé toutes les espèces de plantes sauf <i>Glyceria borealis</i> ; prélevé également des bivalves (environ 20). Carottes de sédiments. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
BE-11	Un peu plus au large qu'en mai; angle entre la pointe rocheuse et garage blanc avec porte brune; 37°; angle entre la pointe rocheuse et chalet jaune à toit bleu: 56°.	Prélevé seulement bivalves (environ 30). Sédiments prélevés avec la benne; sédiment vaseux, dont la couche brune est inexistante. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m.
BE-13	Un peu au nord-est de la localisation de mai; entre les deux pointes, en face de la toilette; environ 15 m de la berge.	Prélevé les cinq espèces de plantes et des bivalves (une dizaine). Carottes de sédiments; surface légèrement oxydée. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
BE-15	Sensiblement au même endroit qu'en mai. Angle entre affiche et rivière Pelletier: 47°; angle entre affiche et pointe séparant B-13 et B-15: 26°.	Prélevé seulement bivalves. Sédiments prélevés avec la benne; motte caractéristique avec couche oxydée. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m.

Tableau A.2 (suite).

Station	Localisation	Observations
BE-16	Rivière Beauchastel; environ 100 m en aval de la localisation de mai; 10 m de la berge.	Prélevé toutes les espèces de plantes, sauf <u>Potamogeton richardsonii</u> . Profondeur d'eau d'environ 40 cm. Bivalves (environ 30) prélevés à 30 m au large; en grande quantité. Carottes de sédiments; sédiment de surface graveleux.
BR-01	Plus près du rivage qu'en mai. Angle entre tour et chalet rouge: 70°; angle entre chalet rouge et la pointe gauche grosse île: 47°	Prélevé <u>Nuphar variegatum</u> , <u>Glyceria borealis</u> et <u>Potamogeton richardsonii</u> ; prélevé également des bivalves (une trentaine). Carottes de sédiments; couche oxydée présente. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
BR-04	En aval de la localisation de mai et plus près de la berge; dans le rétrécissement à la sortie du lac.	Prélevé <u>Nuphar variegatum</u> , <u>Potamogeton richardsonii</u> et <u>Spharganium americanum</u> ; profondeur d'eau d'environ 30 cm. Prélevé également bivalves (une trentaine) un peu au large. Carottes de sédiments; couche brune d'environ 6 cm.
BR-06	Sensiblement au même endroit qu'en mai; milieu de petite baie, à environ 35 m de la berge.	Prélevé mêmes plantes qu'à BR-04. Profondeur d'eau d'environ 30 cm. Prélevé également bivalves (une trentaine). Carottes de sédiments; sédiment granuleux et un peu jaune en surface
BR-11	Un peu plus près de la berge qu'en mai; première baie à l'ouest de rivière Beauchastel.	Prélevé toutes les espèces de plantes, des bivalves et quelques bigorneaux. Profondeur d'eau d'environ 40 cm.

Tableau A.2 (suite).

Station	Localisation	Observations
LR-09	A peu près à la station de mai; à environ 500 m du rétrécissement du lac. Très difficile de se localiser; peu de points de repère.	Prélevé <u>Nuphar variegatum</u> et <u>Glyceria borealis</u> ; aucun bivalve. Profondeur d'environ 30 cm. Carottes de sédiments; sédiment oxydé (-1.5 cm) suivi d'une couche noire qui sent.
LR-13	Environ 100 m en aval de localisation de mai; au centre de la petite baie.	Prélevé toutes les plantes, sauf <u>Eleocharis smallii</u> ; aucun bivalve. Carottes de sédiments; surface oxydée et liquide. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
LR-15	A peu près à la station de mai. Milieu de la petite baie à la sortie du lac.	Prélevé toutes les plantes; aucun bivalve. Carottes de sédiments; surface oxydée. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
LR-16	Entrée du lac, sur la rive sud; près de la berge; environ 500 m en aval de LR-03 de mai.	Prélevé <u>Nuphar variegatum</u> , <u>Potamogeton richardsonii</u> et <u>Eleocharis smallii</u> ; plongeur ne trouve aucun bivalve. Carottes de sédiments; sédiment sablonneux avec couche oxydée en surface. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
LR-17	A peu près 30 m en amont de l'embouchure de la rivière Dufault. Très difficile à localiser; peu de points de repère.	Prélevé <u>Nuphar variegatum</u> et <u>Glyceria borealis</u> ; pas de bivalve. Carottes de sédiments; couche oxydée liquide suivie d'une couche gris-noir. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.
PE-01	Baie de la partie nord-ouest du lac Pelletier, près des parcs à déchets miniers.	Prélevé uniquement <u>Nuphar variegatum</u> . Plongeur ne trouve aucun bivalve. Carotte de sédiments; boue noire (-15 cm) suivie d'argile grise. Observé quelques petits poissons. Profondeur d'eau d'environ 30 cm.

Tableau A.3: Localisation des stations échantillonnées en septembre (du 2 au 6 septembre) 1981 et observations de terrain.

Station	Localisation	Observations
BE-01	Même emplacement qu'en juillet	Prélevé les cinq espèces de plantes et 24 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 30 cm. Pris trois prises de benne.
BE-03	Un peu plus au large (\approx 50 m) qu'en juillet	Prélevé 35 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1 m. Pris cinq prises de benne.
BE-11	Même emplacement qu'en juillet.	Prélevé 40 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris deux prises de benne.
BE-13	Au large (\approx 100 m) de la station de juillet	Prélevé 29 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1 m. Pris deux prises de benne.
BE-15	Même emplacement qu'en juillet.	Prélevé 30 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris deux prises de benne.
BE-16	Un peu plus au large qu'en juillet (\approx 20 m du rivage).	Prélevé 35 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris deux prises de benne.
BR-01	Au large de la station de juillet (\approx 200 m du rivage).	Prélevé 35 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1 m. Pris quatre prises de benne.
BR-04	Même emplacement qu'en juillet.	Prélevé 38 bivalves et des échantillons de <u>Spharganium americanum</u> . Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris quatre prises de benne
BR-06	Même emplacement qu'en juillet.	Prélevé 33 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1 m. Pris quatre prises de benne.

Tableau A.3 (suite).

Station	Localisation	Observations
BR-11	Au large de la station de juillet (\approx 200 m du rivage).	Prélevé 28 bivalves, ainsi que <u>Nuphar variegatum</u> , <u>Glyceria borealis</u> , <u>Potamogeton richardsonii</u> et <u>Eleocharis smalii</u> . Profondeur d'eau d'environ 1 m. Pris quatre prises de benne.
MO-01	Baie à l'est de la rivière qui sert d'exutoire au lac Provencher (\approx 10 m du rivage).	Prélevé toutes les espèces de plantes, sauf <u>Potamogeton richardsonii</u> . Carottes de sédiments; couche brune d'environ 1 cm. Profondeur d'eau d'environ 40 cm.
MO-01	Au large de la précédente station (environ 50 m du rivage).	Prélevé 32 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris sept prises de benne.
MO-02	Baie à l'ouest du ruisseau Merrill (\approx 10 m du rivage).	Prélevé toutes les espèces de plantes, sauf <u>Potamogeton richardsonii</u> . Carottes de sédiments; couche oxydée d'environ 1 cm. Profondeur d'eau d'environ 40 cm.
MO-02	Au large de la précédente station (environ 150 m du rivage).	Prélevé 31 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris trois prises de benne.
MO-03	A l'ouest de l'exutoire du lac Provencher (\approx 200 m du rivage). Angles $\alpha_1 = 13^\circ$ et $\alpha_2 = 23^\circ$.	Prélevé 34 bivalves. Profondeur d'eau d'environ 1.5 m. Pris quatre prises de benne.