

TD  
427  
533  
5625  
1991  
vol.1

CENTRE DE DOCUMENTATION CSL  
105, RUE MCGILL 2<sup>ème</sup> ÉTAGE  
MONTREAL (QUEBEC) H2Y 2E7  
TEL (514) 283-9503  
FAX (514) 283-9501  
13-8-96

**CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE  
DES SÉDIMENTS DU LAC SAINT-LOUIS  
RAPPORT D'ÉTUDE-PILOTE  
TOME I**

SNC-Procéan  
70 rue Dalhousie  
Bureau 300  
Québec, Qc  
G1K 4B2

présenté au

Centre Saint-Laurent  
Environnement Canada  
Direction Écosystème et Écotoxicologie  
Section Apports Toxiques

Juillet 1992

Environnement Canada / Environment Canada  
Bibliothèque Montréal Library  
105, rue McGill  
Montréal (Québec) H2Y 2E7  
Tél. / Tel. (514) 283-9503

## Équipe de travail

L'équipe de travail du groupe SNC-Procéan qui a participé à cette étude et à la rédaction du rapport final se compose des personnes suivantes:

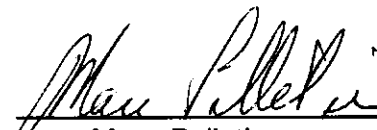
Donald Boudreau, dessinateur-cartographe  
Paul Blais, géographe et informaticien de système  
Guy Fortin, géophysicien  
Ronald Greendale, biologiste  
René Marcoux, technicien  
Magella Pelletier, géochimiste  
Marc Pelletier, océanographe-sédimentologue, chargé de projet  
Louis Robidoux, technicien  
Nathalie Ross, océanographe-sédimentologue  
Marie-France Richard, secrétaire  
Bruno Sautier, technicien

Les ressources externes suivantes ont collaboré au projet:

- Aéro Photo Inc., cartographie
- Cogita Inc., informatique
- Institut National de Recherche sur les Eaux, analyses physiques et granulométriques
- INRS-Eau, analyses radio-isotopiques
- Novalab Inc., analyses chimiques organiques
- Technitrol-Eco, analyses chimiques inorganiques

L'équipe de travail d'Environnement Canada était composée des personnes suivantes:

- Isabelle Goulet, conseillère en cartographie et modélisation
- Stéphane Lorrain, chargé de projet
- Ken Lum, délégué scientifique
- Norm Rukavina, conseiller en géophysique

  
Marc Pelletier  
Chargé de projet

## Tables des matières

✓ 1.	Introduction et objectifs	1
1.1	Objectifs généraux	1
1.2	Objectifs spécifiques de l'étude-pilote	2
1.3	Sélection de la zone d'étude-pilote	3
✓ 2.	Description de la zone d'étude	4
2.1	Localisation	4
2.2	Physiographie et géologie	4
2.3	Bathymétrie	7
2.4	Hydrologie et hydrodynamique	7
2.5	Sédimentologie	10
2.6	Sources de pollution	13
<del>3.</del>	Démarche méthodologique	17
3.1	Approche générale	17
3.2	Positionnement	19
3.2.1	Objectifs	19
3.2.2	Description du système utilisé	19
3.2.3	Calibration	20
3.2.4	Opération	22
3.2.5	Contraintes	23
3.2.6	Traitement	23
3.3	Relevés acoustiques	25
3.3.1	Objectifs	25
3.3.2	Plan des relevés	25
3.3.3	Réflexion sismique	25
3.3.4	Sonar à balayage latéral	30
3.3.5	Sondage bathymétrique	33
3.4	Échantillonnage superficiel	33
3.4.1	Objectif	33
3.4.2	Plan d'échantillonnage	34
3.4.3	Opérations de terrain	35
3.4.4	Contraintes	39

## Table des matières (suite)

	3.5 Échantillonnage stratigraphique par forage . . . . .	40
	3.5.1 Objectifs . . . . .	40
	3.5.2 Plan d'échantillonnage . . . . .	40
	3.5.3 Opérations de terrain . . . . .	41
	3.5.4 Extrusion et sous-échantillonnage . . . . .	43
	3.5.5 Conservation . . . . .	45
	3.5.6 Contraintes . . . . .	45
	3.6 Analyses . . . . .	45
	3.6.1 Analyses physiques . . . . .	46
	3.6.2 Méthode d'analyses chimiques . . . . .	48
	3.6.3 Analyses radio-isotopiques . . . . .	51
	3.6.4 Analyses tomodynamométriques . . . . .	53
	3.6.5 Contrôle de qualité . . . . .	55
	3.7 Traitement des données . . . . .	58
	3.7.1 Relevés acoustiques . . . . .	58
	3.7.2 Résultats analytiques de surface . . . . .	58
	3.7.3 Résultats analytiques des forages . . . . .	61
	3.7.4 Analyse de la dynamique sédimentaire et évaluation des volumes de sédiments contaminés . . . . .	62
	3.7.5 Bilan massique . . . . .	62
✓	4. Résultats . . . . .	64
	4.1 Caractérisation sédimentologique . . . . .	64
	✓ 4.1.1 Description visuelle . . . . .	64
	✓ 4.1.2 Granulométrie . . . . .	67
	✓ 4.1.3 Carbone organique total . . . . .	73
	✓ 4.1.4 Teneur en eau et densité . . . . .	73
	✓ 4.1.5 Distribution spatiale . . . . .	77
	✗ 4.1.6 <del>Stratigraphie des carottes</del> . . . . .	79
	✓ 4.1.7 Épaisseur des sédiments récents . . . . .	86
✓	4.2 Caractérisation chimique . . . . .	88
	✓ 4.2.1 Analyse statistique de la contamination . . . . .	88
	✓ 4.2.2 Répartition spatiale des contaminants . . . . .	94
	✓ 4.2.3 <u>Évolution temporelle</u> . . . . .	106

## Table des matières (suite)

5.	Interprétation globale et discussion .....	116
5.1	Qualité générale des sédiments .....	116
5.2	Bilan massique des contaminants .....	119
5.3	Dynamique sédimentaire .....	121
6.	Validation de l'approche .....	124
6.1	Relevés acoustiques .....	124
6.1.1	Sonar à balayage latéral .....	124
6.1.2	Réflexion sismique .....	125
6.1.3	Bathymétrie .....	126
6.2	Positionnement .....	126
6.3	Echantillonnage de surface .....	127
6.4	Forage .....	127
6.5	Tomodensitométrie .....	128
6.6	Analyses .....	129
6.6.1	Paramètres physiques .....	129
6.6.2	Analyses chimiques .....	129
6.6.3	Analyses radio-isotopiques .....	130
6.7	Traitement et cartographie .....	130
6.7.1	Paramètres physiques de surface .....	130
6.7.2	Paramètres chimiques de surface .....	130
6.7.3	<u>Evolution historique</u> .....	131
6.8	Modifications de l'approche .....	131
7.	Planification des activités .....	135
7.1	Description des données historiques .....	135
7.1.1	Variabilité spatiale .....	135
7.2	Plans d'échantillonnage .....	140

## Table des matières (suite)

8.	Conclusion et recommandations .....	143
----	-------------------------------------	-----

Bibliographie

## Liste des figures

2.1	Localisation de la zone d'étude-pilote	5
2.2	Carte bathymétrique du lac Saint-Louis	8
2.3	Délimitation des couloirs d'écoulement des eaux du lac Saint-Louis	11
2.4	Vitesse d'écoulement des eaux du lac Saint-Louis	12
2.5	Granulométrie des sédiments du lac Saint-Louis	14
3.1	Configuration du système de positionnement GPS	21
3.2	Organigramme du traitement de données de positionnement	24
3.3	Localisation des relevés acoustiques	26
3.4	Configuration du système de profilage sismique	28
3.5	Configuration du système de relevés acoustiques	32
3.6	Benne Shipek modèle 860	36
3.7	Division d'un échantillon en quadrants	38
3.8	Principe d'utilisation du tomodynamomètre pour l'obtention de coupes orientées	54
3.9	Organigramme de traitement des données acoustiques. Épaisseur des sédiments	59
3.10	Organigramme de traitement des données acoustiques. Texture des sédiments de surface	60
4.1	Diagramme ternaire des fractions granulométriques des sédiments de surface	68
4.2	Concentration en sable et gravier des sédiments de surface	69
4.3	Concentration en silt des sédiments de surface	70
4.4	Concentration en argile des sédiments de surface	71
4.5	Concentration en carbone organique total des sédiments de surface	74

## Liste des figures (suite)

4.6	Teneur en eau des sédiments de surface	75
4.7	Densité des sédiments de surface	76
4.8	Radiographie et photographie de la carotte F3-A	80
4.9	Radiographie et photographie de la carotte F5-C	81
4.10	Radiographie et photographie des carottes F7-A et F7-C	82
4.11	Descriptions visuelles des carottes prélevées à la station F3	83
4.12	Descriptions visuelles des carottes prélevées à la station F5	84
4.13	Descriptions visuelles des carottes prélevées à la station F7	85
4.14	Répartition spatiale du cuivre (non-résiduel)	96
4.15	Répartition spatiale du zinc (non-résiduel)	97
4.16	Répartition spatiale du plomb (non-résiduel)	98
4.17	Répartition spatiale du nickel (non-résiduel)	99
4.18	Répartition spatiale du chrome (non-résiduel)	100
4.19	Répartition spatiale du cadmium (non-résiduel)	101
4.20	Répartition spatiale de l'arsenic (extractible)	102
4.21	Répartition spatiale des HAP (totaux)	103
4.22	Répartition spatiale des BPC (congénères totaux)	104
4.23	Profils verticaux des résultats analytiques. Station F3	107
4.24	Profils verticaux des résultats analytiques. Station F5	108
4.25	Profils verticaux des résultats analytiques. Station F7	110
4.26	Profils de carottes de sédiment de 1976, 1984 et 1991	113



Liste des figures (suite)

5.1	Répartition spatiale de l'indice de qualité (paramètres inorganiques) . . . . .	118
5.2	Schéma de la dynamique sédimentaire . . . . .	122
6.1	Approche méthodologique d'échantillonnage et d'analyse des zones d'accumulation potentielles du fleuve Saint-Laurent . . . . .	132
7.1	Localisation des données historiques . . . . .	136

## Liste des tableaux

Tableau 2.1	Débits liquides et solides des tributaires du lac Saint-Louis . . . . .	9
Tableau 2.2	Qualité des eaux des tributaires de la partie nord du lac Saint-Louis .	16
Tableau 3.1	Comparaison des longueurs de carottes forées et des longueurs réelles récoltées . . . . .	42
Tableau 3.2	Fractions granulométriques utilisées pour les analyses . . . . .	47
Tableau 3.3	Paramètres chimiques analysés . . . . .	49
Tableau 3.4	Méthodes analytiques et limite de détection des paramètres chimiques	50
Tableau 3.5	Répartition du contrôle de la qualité des analyses . . . . .	56
Tableau 3.6	Précision et exactitude analytique des analyses chimiques . . . . .	57
Tableau 4.1	Description visuelle des sédiments de surface . . . . .	65-66
Tableau 4.2	Statistiques de base des échantillons de surface . . . . .	89
Tableau 4.3	Pourcentage de la fraction chimique non-résiduelle par rapport à la fraction totale . . . . .	90
Tableau 4.4	Matrice des coefficients de corrélation de Kendall . . . . .	93
Tableau 4.5	Variabilité spatiale des paramètres chimiques et physiques . . . . .	95
Tableau 4.6	Pourcentage de la concentration des contaminants en surface (5 cm) sur la concentration moyenne des carottes . . . . .	112
Tableau 5.1	Masse des contaminants associés aux sédiments récents de la zone d'étude-pilote . . . . .	120
Tableau 7.1	Variabilité spatiale des données historiques . . . . .	138

## Liste des annexes ( Tome II)

- Annexe A Caractéristiques des systèmes acoustiques utilisés
- Annexe B Points géodésiques utilisés et positions des relevés
- Annexe C Procédures d'opération pour le positionnement des relevés
- Annexe D Procédures d'opération des relevés acoustiques
- Annexe E Données brutes d'échantillonnage de surface
- Annexe F Données brutes du sous-échantillonnage des carottes
- Annexe G Méthodologie des analyses chimiques
- Annexe H Résultats du contrôle de qualité
- Annexe I Résultats analytiques détaillés
- Annexe J Résultats bruts des relevés acoustiques

## Liste des cartes (hors-texte)

- Carte 1 Localisation des transects de sondage sismique
- Carte 2 Localisation des transects de sonar à balayage latéral
- Carte 3 Localisation des stations d'échantillonnage de forage
- Carte 4 Distribution granulométrique des sédiments de surface
- Carte 5 Distribution des textures du sédiment
- Carte 6 Section interprétative de la ligne 5 des relevés de réflexion sismique
- Carte 7 Épaisseur des sédiments récents
- Carte 8 Plan d'échantillonnage des zones d'accumulation Lac Saint-Louis et Bassin La Prairie
- Carte 9 Plan d'échantillonnage des zones d'accumulation Tronçon fluvial Montréal - Îles de Sorel
- Carte 10 Plan d'échantillonnage des zones d'accumulation Lac Saint-Pierre

# 1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

## 1.1 Objectifs généraux

Le Plan d'action Saint-Laurent (PASL) mis en oeuvre en 1988 par Environnement Canada vise l'assainissement, la restauration, la protection et la conservation du fleuve Saint-Laurent. Le volet "état du milieu" du PASL comprend un programme d'évaluation des apports toxiques dans lequel s'insère la présente étude. Il a été instauré pour comprendre et qualifier l'amplitude du transport des contaminants, le comportement de ces substances et le bilan global de ces substances dans le fleuve Saint-Laurent. A l'intérieur de ce programme, les études visent principalement les phases dissoutes et particulières de la contamination.

Bien que la phase dissoute représente 90% de la masse contaminée transportée par le fleuve, la phase particulière n'en demeure pas moins importante puisqu'elle a la propriété de s'accumuler de façon plus ou moins temporaire dans certaines zones favorables à la sédimentation, d'engendrer des effets négatifs sur certains usages et de permettre le transfert des contaminants à travers les différents niveaux trophiques. Ainsi après l'assainissement complet des sources de contamination de l'eau, les sédiments accumulés au fond constitueront probablement la principale source résiduelle de contamination du fleuve Saint-Laurent.

Afin de mieux comprendre l'importance de la contamination des sédiments dans le fleuve Saint-Laurent, la section des apports toxiques a entrepris en 1991 l'étude du lac Saint-François. Ce lac constitue en effet la première zone lacustre où les sédiments sont susceptibles de s'accumuler à l'entrée du fleuve Saint-Laurent.

La deuxième étude entreprise par la section des apports toxiques porte sur le tronçon allant du Lac Saint-Louis en amont jusqu'au Lac Saint-Pierre en aval et comprend entre autres les travaux présentés dans ce rapport. Cette étude visait les objectifs suivants:

- établissement du niveau de contamination actuel des zones d'accumulation;

- quantification de la masse de contaminants stockés dans les sédiments des zones d'accumulation;
- établissement du niveau de contamination actuel des zones d'accumulation.

De façon plus détaillée, les objectifs spécifiques du mandat se divisent en trois groupes :

- identification précise des limites spatiales des zones contaminées connues;
- caractérisation physique des zones d'accumulation;
  - . nature des sédiments;
  - . épaisseur des sédiments récents;
  - . sédimentologie des sites d'accumulation.
- caractérisation chimique des zones d'accumulation:
  - . nature de la contamination;
  - . répartition spatiale des contaminants;
  - . évolution temporelle de la contamination à l'intérieur des zones identifiées;
  - . quantification de la masse de contaminants.

## 1.2 Objectifs spécifiques de l'étude-pilote

La réalisation du mandat d'étude des sédiments du lac Saint-Louis au lac Saint-Pierre a été planifiée pour s'étaler sur une période de deux ans. En 1991 les travaux comportaient les activités suivantes:

- relevés et échantillonnage d'une zone d'étude-pilote située dans le lac Saint-Louis;
- analyses des données de la zone d'étude-pilote et validation de l'approche méthodologique;
- analyses des données historiques sur l'ensemble du tronçon lac Saint-Louis au lac Saint-Pierre et validation du plan d'échantillonnage.

En 1992, les travaux devront comporter les relevés de terrain et l'analyse des autres secteurs du tronçon du lac Saint-Louis au lac Saint-Pierre.

Le présent rapport a comme principal objectif de présenter la démarche méthodologique utilisée, les résultats et leur interprétation, les modifications proposées de la démarche méthodologique et la planification des travaux futurs. La validation de la démarche méthodologique s'articule autour des éléments suivants:

- la précision des estimations de quantités de sédiments et de contaminants;
- la précision et la résolution des techniques d'échantillonnage et de relevés utilisés;
- le traitement de données utilisé;
- le degré de confiance des résultats.

**1.3 Sélection de la zone d'étude-pilote** - La zone d'étude-pilote fut choisie par Environnement Canada. Cette zone correspond à un site aquatique contaminé répertorié par Lavalin (1989) dans le cadre d'un inventaire et d'une priorisation des sites aquatiques contaminés du Saint-Laurent. De plus cette zone correspond à une zone d'accumulation contaminée qui avait été identifiée par Sérodes (1978).

## 2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Ce chapitre présente les principales caractéristiques descriptives de la zone d'étude. Seuls les paramètres physiques ayant une relation directe avec les objectifs du mandat sont présentés dans ce chapitre. Les informations présentées proviennent de travaux antérieurs déjà publiés.

### 2.1 Localisation

La zone d'étude-pilote se situe dans la partie nord du lac Saint-Louis en bordure sud-ouest de l'île de Montréal entre les longitudes 73°44' et 73°57' et les latitudes 45°22' et 45°27' (figure 2.1). La zone d'étude est limitée au nord par l'île de Montréal, à l'ouest par la rivière des Outaouais et l'île Perrot, au sud et à l'est par le chenal maritime du Saint-Laurent et l'île Dorval.

### 2.2 Physiographie et géologie

La zone d'étude est située dans la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent. Ces basses-terres sont limitées au nord par la région des hautes-terres laurentiennes et au sud par les bas plateaux du système appalachien (Commission géologique du Canada, 1968).

Le socle rocheux des basses-terres du Saint-Laurent est constitué de roches sédimentaires carbonatées dont l'âge varie du Précombien à l'Ordovicien. Ces couches sédimentaires sont subhorizontales et à peine déformées. La topographie générale du toit rocheux forme un bassin dont l'écoulement est orienté vers le nord-est. Ce socle rocheux est recouvert de dépôts meubles associés au dernier épisode glaciaire et aux événements post-glaciaires qui ont suivi.

De façon générale dans les basses-terres du Saint-Laurent, la stratigraphie typé des dépôts meubles glaciaires et post-glaciaires se compose des unités suivantes:

- Till de fond et dépôts d'intervalle non glaciaire

Ces unités correspondent à la période située entre 80 000 et 12 000 ans B.P. Ils comprennent des dépôts hétérogènes compacts, des varves



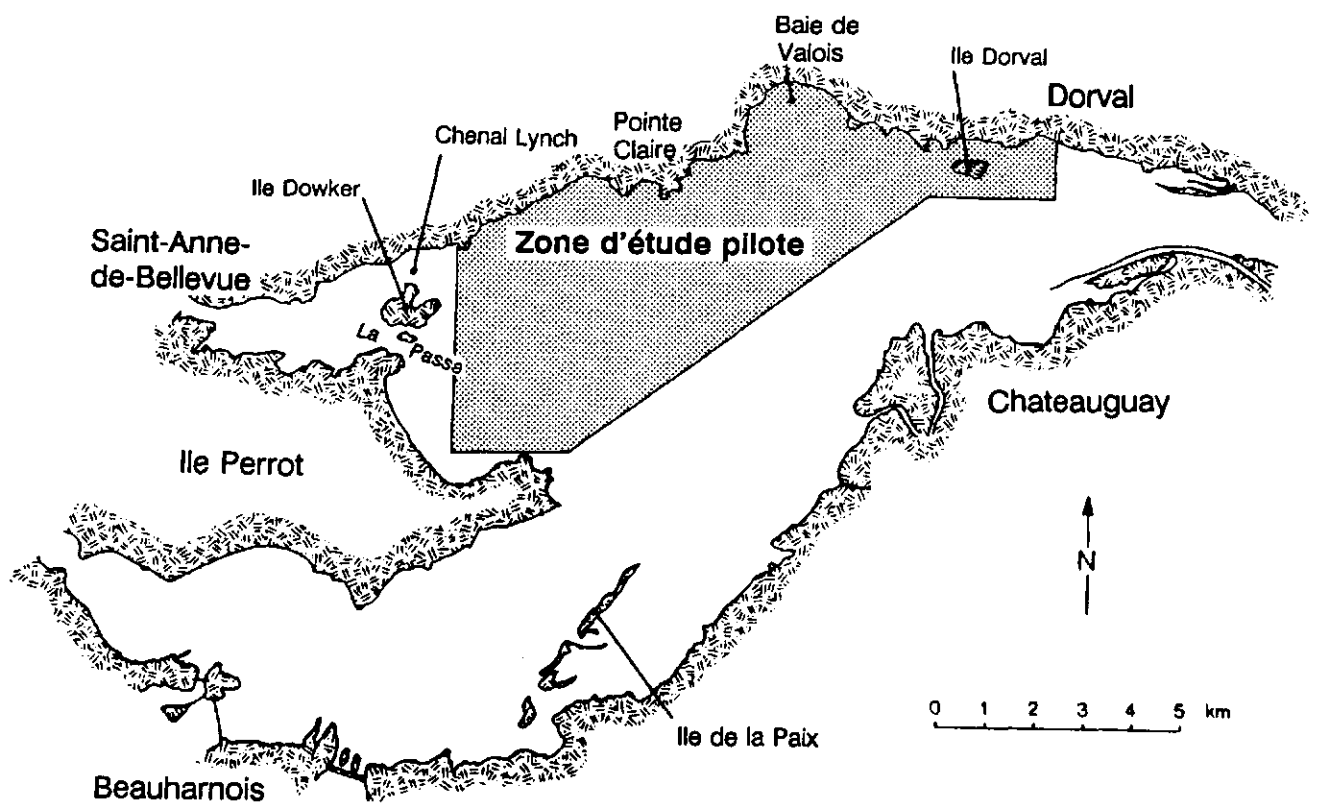


Figure 2.1 Localisation de la zone d'étude-pilote

glaciaires, du sable et gravier fluvial et des niveaux de tourbe. La répartition spatiale de ces unités est très aléatoires et les épaisseurs rencontrées sont généralement peu importantes.

- Dépôts de la mer de Champlain et du lac Lampsilis

Après le retrait de la calotte glaciaire vers 12 000 ans B.P., les eaux marines ont envahi les basses-terres du Saint-Laurent pour former la mer de Champlain. Vers 10 000 ans B.P. une barrière près de Québec amène un dessalage des eaux formant ainsi le lac Lampsilis. Ce lac se vidange environ vers 7 500 ans B.P. Les dépôts laissés par les épisodes de la mer de Champlain et du lac Lampsilis recouvrent toutes les basses-terres du Saint-Laurent sur une épaisseur pouvant varier de quelques m à plus de 30 m. Ils sont composés dans les faciès profonds de boue très argileuse d'une teneur en eau élevée et dans les faciès peu profonds de dépôts de nature variable dus à l'influence plus ou moins grande de l'environnement glaciaire.

- Dépôts de hautes et basses terrasses

Entre la cote de 230 m et l'élévation du niveau d'eau actuel, le fleuve Saint-Laurent a laissé plusieurs dépôts relativement sableux qu'on peut regrouper dans les hautes et les basses terrasses. Le passage des niveaux de hautes terrasses aux niveaux de basses terrasses marque le changement du Saint-Laurent d'un régime dépositionnel à un régime érosif. Ces niveaux incluent les plaines alluviales actuelles et sont constitués surtout de sable fin à moyen. Actuellement, le Saint-Laurent érode encore son lit constitué principalement de dépôts marins de la mer de Champlain et lacustres du lac Lampsilis et constitue donc à ce titre une rivière géomorphologiquement jeune (Gadd, 1971).

### 2.3 Bathymétrie

Le lac Saint-Louis est formé par un élargissement du fleuve Saint-Laurent à sa confluence avec la rivière des Outaouais. Le lac s'étire sur près de 23 km de long et il couvre une superficie d'environ 150 km<sup>2</sup> (Jarry *et al*, 1985).

La profondeur moyenne est de 3 m et les profondeurs maximales allant jusqu'à 28 m sont localisées au sud dans le chenal maritime (figure 2.2). Le profil transversal typique de ce lac représente un vaste bassin dans lequel sont creusés deux chenaux plus profonds (Kaiser *et al*, 1989).

Dans la partie nord du lac où se situe la zone d'étude, le bassin est recoupé par un chenal prolongeant la rivière des Outaouais dont l'axe passe entre l'île Dowker et se dirige vers l'île Dorval. La largeur de ce chenal à la cote de 4 m varie de 30 m en amont à près de 150 m à la limite est de la zone d'étude. Les profondeurs de ce chenal varient de 15 m en amont jusqu'à environ 4,5 m en aval. La présence d'une zone de dépôt de déblais de dragage dans la partie est de la zone d'étude complique la bathymétrie de ce secteur (voir carte no 1410, Service Hydrographique du Canada).

### 2.4 Hydrologie et hydrodynamique

Le lac Saint-Louis reçoit les eaux du fleuve Saint-Laurent et des rivières des Outaouais, Chateauguay et St-Louis. Le tableau no 2.1 présente les débits moyens de chacun des tributaires du lac Saint-Louis. Le débit moyen résultant du lac Saint-Louis estimé par modélisation varie de 8 400 à 14 000 m<sup>3</sup>/s (Sylvestre et Leclair, 1991). Bien que le débit annuel moyen du fleuve Saint-Laurent soit de dix fois supérieur à celui de la rivière des Outaouais, les variations de débit du lac Saint-Louis originent principalement des variations de débit de la rivière des Outaouais. En effet, le débit du fleuve Saint-Laurent est considérablement pondéré par la rétention lacustre des Grands-Lacs (Pardé, 1948), alors que le débit de la rivière des Outaouais peut varier entre 800 m<sup>3</sup>/s et plus de 9 000 m<sup>3</sup>/s soit un débit équivalent à celui du Saint-Laurent.

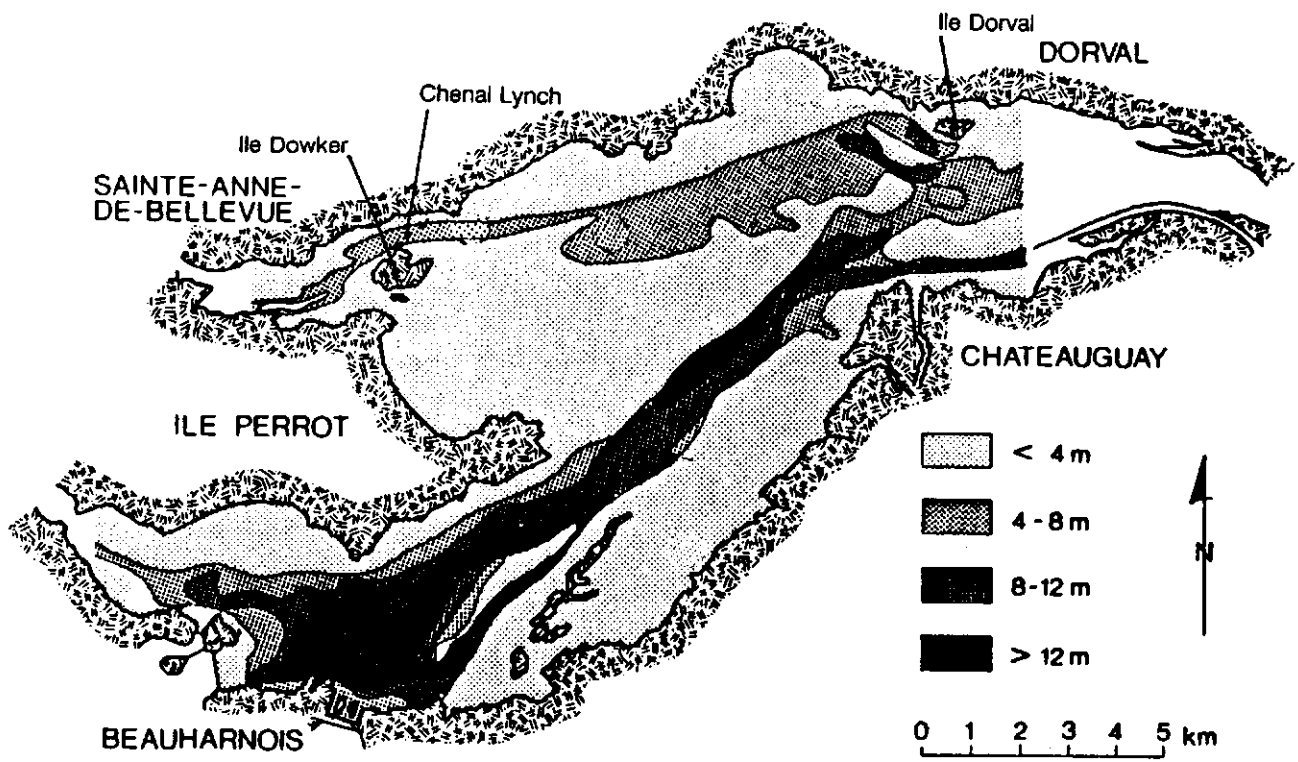


Figure 2.2 Carte bathymétrique du lac Saint-Louis (Rukavina et al, 1990)

Tableau 2.1

Débits liquides et solides des tributaires du lac Saint-Louis.  
(Germain et Janson, 1984; Frenette *et al.*, 1989)

Tributaire	Débits liquides (m <sup>3</sup> /s)*	Débits solides (tonnes/an)*
Fleuve	10 032	2 300 000
Des Outaouais	1 019	210 000
Chateauguay	43	70 000
Saint-Louis	3	13 000
Autres		17 000

\* Moyenne annuelle

La délimitation des couloirs d'écoulement (figure 2.3) montre que la zone d'étude est principalement affectée par les eaux de la rivière des Outaouais et par des eaux mixtes résultant du mélange avec les eaux des Grands Lacs.

Les vitesses maximales de courant sont observées au centre du chenal de navigation et sont supérieures à 60 cm/s. Près des rives, les vitesses sont réduites et oscillent entre 10 et 30 cm/s (Frenette *et al*, 1989). Dans la partie nord du lac, aucune mesure ne nous permet de quantifier la vitesse des courants. Toutefois, nous pouvons estimer que les vitesses maximales du chenal nord devraient être localisées dans l'étranglement au nord de l'île Dowker et à la limite est dans le chenal au sud de l'île Dorval. Des simulations réalisées par Hydro-Québec (tiré de Frenette *et al*, 1989) permettent de visualiser l'intensité des courants en étiage et en crue (figure 2.4).

Le temps moyen de résidence de l'eau dans le tronçon fluvial du lac est de l'ordre de 12 heures (Frenette *et al*, 1990).

Les vents dominants sont orientés parallèlement à l'axe longitudinal du lac. Les vagues générées en temps normal varient d'une hauteur de 0,55 à 1,25 m. Des hauteurs allant jusqu'à 2,5 m peuvent être enregistrées par vents de vitesse supérieure à 80 km/h.

## 2.5 Sédimentologie

Les débits solides du lac Saint-Louis totalisent environ  $2,6 \times 10^6$  tonnes/années dont 88% provient du fleuve Saint-Laurent et 8% de la rivière des Outaouais (Hydrotech, 1988). Les variations de la concentration de la matière en suspension sont beaucoup plus prononcées dans l'apport de la rivière des Outaouais. La partie nord du lac présente généralement des concentrations plus élevées (4 mg/l) que dans la partie sud (3 mg/l) (Germain et Janson, 1984).

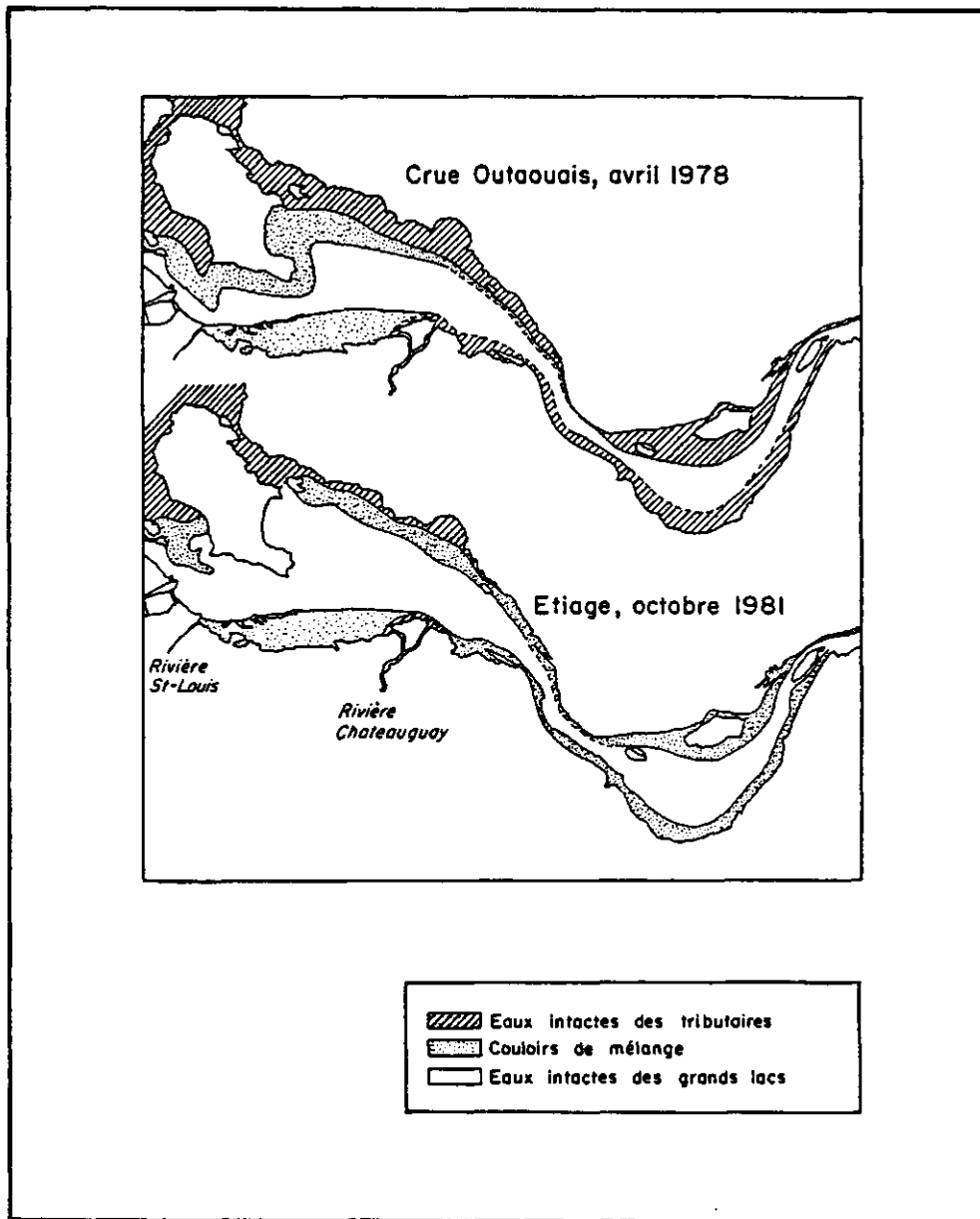


Figure 2.3 Délimitation des couloirs d'écoulement des eaux du lac Saint-Louis. (Frénette et al, 1989)

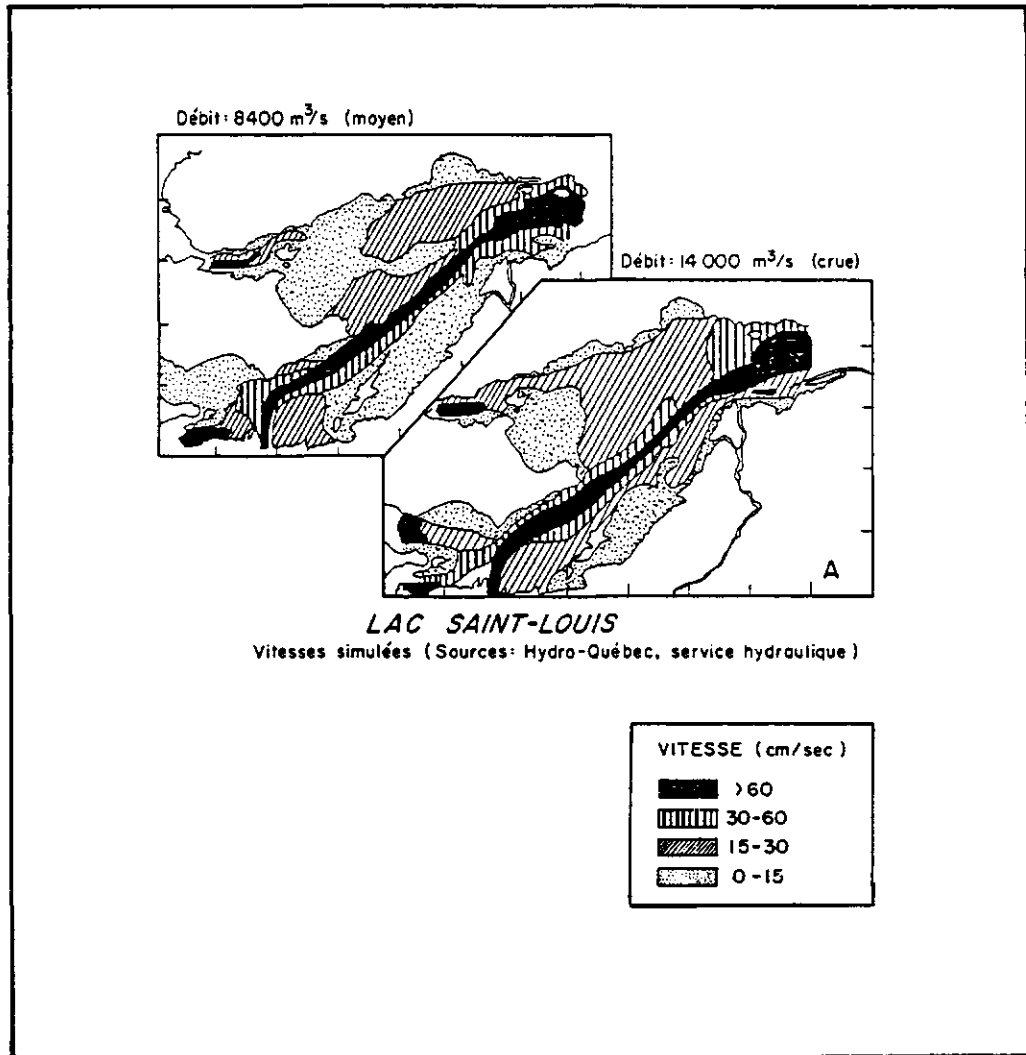


Figure 2.4 Vitesse d'écoulement des eaux du lac Saint-Louis. (Frenette et al, 1989)



Bien que la dynamique sédimentaire soit complexe dans ce secteur, la partie nord du lac est caractérisée par une sédimentation lente et calme de particules provenant principalement de la rivière Outaouais. Les carottes prélevées par Rukavina *et al* (1990) dans ce secteur présentaient une uniformité verticale de la texture des sédiments confirmant que cette zone représente une zone d'accumulation. Les taux d'accumulation varient selon les auteurs. Dans le secteur nord de la zone d'étude, il est de 0,5 à 0,8 cm/an et dans la partie centrale, il est inférieur à 0,1 cm/an selon Rukavina *et al* (1990). De façon plus générale, le taux de sédimentation a été établi à 0,25 cm/an par Sérodes (1978) pour l'ensemble du lac Saint-Louis.

L'aspect à la fois lacustre et fluvial caractérise le patron sédimentologique du lac. La couverture sédimentaire y est mince. Les sédiments récents sont des sables ou des boues sur un substrat d'argile glacio-lacustre ou des affleurements rocheux (figure 2.5, Rukavina *et al* 1990). De façon générale, les sables occupent les zones peu profondes alors que les sédiments fins s'accumulent dans les secteurs profonds, calmes et abrités. La partie centrale de la zone d'étude-pilote contient deux zones d'accumulation allongées parallèlement au littoral constituées de sédiments silteux et argileux (figure 2.5). Près de la rive les sédiments graveleux et sableux prédominent tandis que les sédiments argileux occupent la partie ouest de la zone d'étude.

Au point de vue minéralogique, le quartz et le feldspath dominant dans la fraction comprise entre 4 et 63 microns (Jarry *et al*, 1985). La fraction inférieure à 4 microns (argile) est composée principalement d'illite et de chlorite. Les sédiments à haut pourcentage d'argile et de limon se situent au nord du lac entre la Pointe-Claire et la Grande-Anse (Jarry *et al* 1985, Sérodes 1978) et au sud des Iles de la Paix.

## 2.6 Sources de pollution

Parmi les sources de pollution répertoriées dans la partie nord du lac Saint-Louis, il faut d'abord mentionner l'apport important en contaminants venant de la rivière des Outaouais. Le Comité de coordination pour la qualité des eaux de la rivière des

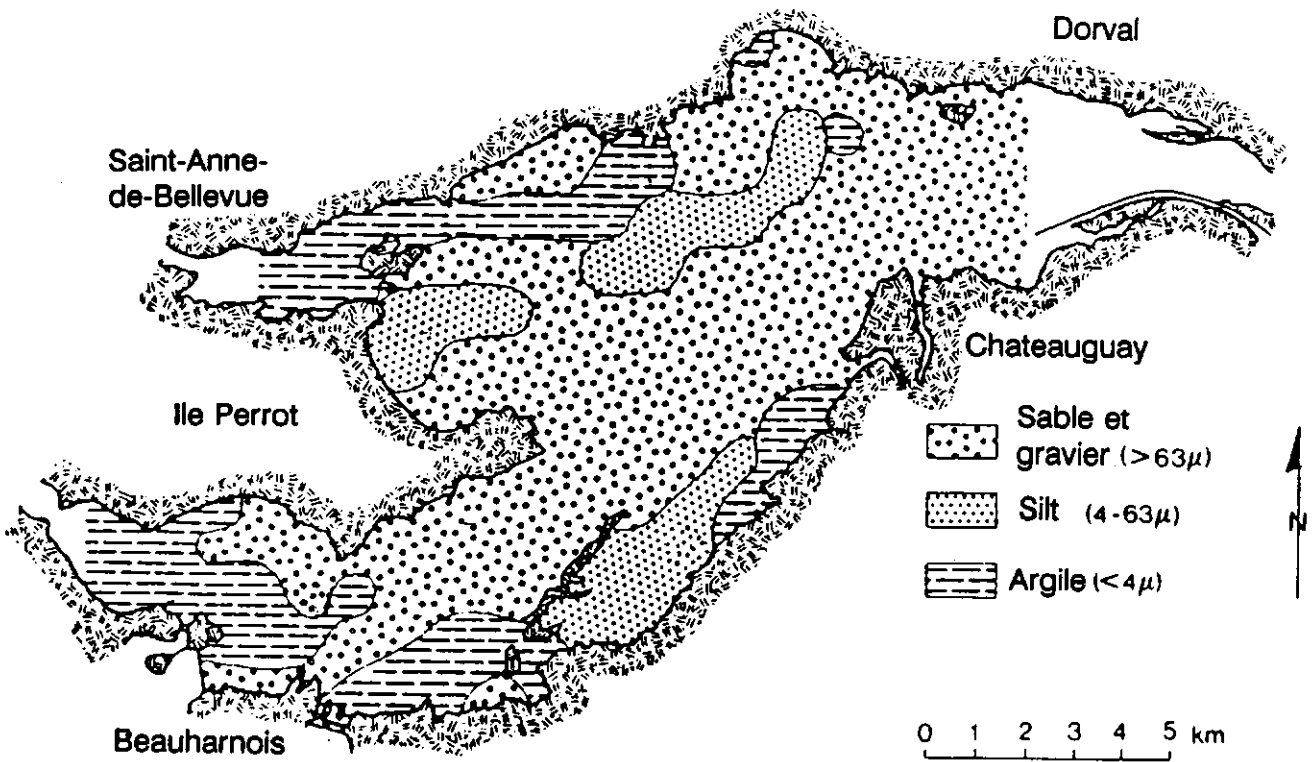


Figure 2.5 Granulométrie des sédiments du lac Saint-Louis.  
 (Rukavina et al, 1990)

Outaouais (1986) rapporte des charges importantes en DBO, en phosphore et en métaux (Cu, Fe, Pb, Ni, Zn). On y a également détecté la présence de DDT, de dieldrine, d'endrine, de bêta-endorsulfan, d'époxide heptachlore et de BPC.

Toutefois, des analyses de sédiments prélevés dans l'Outaouais en 1982 et en 1986 (Merriman 1987, Merriman et Metcalfe 1988) n'indiquent pas la présence de contaminants organiques en quantités notables tout le long de la rivière. Aucun échantillon ne montrait une teneur supérieure à 20 ng/g de BPC et les teneurs en HAP et en pesticides organochlorés sont demeurées sous la limite de détection (Frenette *et al.*, 1989).

Deux autres petits tributaires du secteur nord du lac Saint-Louis furent caractérisés en 1987 par le MENVIQ et la CUM. Il s'agit du ruisseau Bouchard qui prend son origine près de l'aéroport de Dorval et du ruisseau Denis situé à l'ouest de Dorval et qui reçoivent une partie des eaux de drainage générées sur le territoire de l'aéroport de Dorval. Ces deux ruisseaux ont montré des teneurs élevées en métaux et particulièrement en Cr, Cu, Fe, Mn, Hg et Pb (Sylvestre et Leclair, 1991).

Le tableau 2.2 présente les concentrations en contaminant observées pour les trois principaux tributaires du secteur nord du lac Saint-Louis.

Notons enfin que plusieurs municipalités situées sur l'île de Montréal ont été raccordées en 1988 au collecteur nord de la Communauté urbaine de Montréal. Il s'agit de Baie d'Urfé, Beaconsfield, Pointe-Claire et Dorval. Toutes les autres municipalités étaient, avant le raccordement ou le traitement, des sources de pollution pour le secteur de la zone d'étude-pilote.

Tableau 2.2 Qualité des eaux des tributaires de la partie nord du lac Saint-Louis (adapté de Sylvestre et Leclair, 1991).

Contaminants	Rivière des Outaouais		Ruisseau Bouchard	Ruisseau Denis
	(1985) (mg/l)	(1988) (mg/l)	(1987) (mg/l)	(1987) (mg/l)
Aluminium		0,3600	< 1,0	1,0
Chrome tot.		0,0008	0,023	0,018
Cuivre tot.	0,0020	0,0018	0,022	0,027
Fer tot.		0,4400	0,9	3,9
HCB		0,40 ng/l		
Manganèse	0,0200	0,0300	0,09	0,13
Mercure tot.	0,05 ug/l		0,7 ug/l	0,3 ug/l
Nickel tot.	0,0020	0,0008	0,015	0,017
Plomb tot.	0,0010	0,0004	0,010	0,017
Zinc tot.	0,0110	0,0031	0,00007	0,00011

### 3 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Ce chapitre présente successivement l'approche générale utilisée et la méthodologie détaillée des travaux réalisés pour atteindre les objectifs décrits au chapitre précédent.

#### 3.1 Approche générale

L'approche méthodologique mise en oeuvre dans le cadre de cette étude-pilote permet la caractérisation du milieu sous deux angles complémentaires:

- Les caractéristiques superficielles des sédiments et de la contamination. Celles-ci sont déterminées avec les techniques suivantes:
  - . échantillonnage de surface à la benne;
  - . relevés par imagerie à l'aide du sonar à balayage latéral;
  - . relevés du profil des fonds à l'aide d'un bathymètre.
- Les caractéristiques verticales des sédiments et de la contamination. Celles-ci sont déterminées avec les techniques suivantes:
  - . relevés acoustiques à l'aide de la réflexion sismique;
  - . carottage des sédiments et sous-échantillonnage des sédiments de la surface jusqu'à la profondeur atteinte;
  - . analyse de la structure des carottes par tomodynamométrie;
  - . analyse géochronologique des sous-échantillons à l'aide de la radio-isotopie.

La grille d'échantillonnage a été définie suivant une approche systématique avec un pas d'espacement de 1 km. L'orientation de la grille fut fixée de façon à ce qu'elle coïncide avec l'axe d'écoulement du fleuve à cet endroit. Les relevés acoustiques ont été réalisés suivant l'axe nord-sud de la grille d'échantillonnage.

Bien que ces deux groupes méthodologiques puissent se compléter lors de l'interprétation, elles visent chacune la compréhension des aspects suivants:

- les caractéristiques superficielles des sédiments sont utilisées pour définir l'état actuel de la contamination et des processus sédimentaires. Ils

représentent en quelque sorte un instantané de la situation environnementale;

- les caractéristiques verticales des sédiments sont utilisés pour définir l'évolution historique de la contamination et des processus sédimentaires. Ils permettent en plus de quantifier l'importance de l'accumulation des sédiments et des contaminants qui leur sont associés. Ils représentent un enregistrement des processus sédimentaires récents.

Ces deux visions de l'environnement sédimentaire comprennent plusieurs analyses communes dont les résultats sont utilisés lors de l'interprétation finale. Les analyses suivantes ont été réalisées sur les deux groupes d'échantillons:

- analyse des paramètres physiques:
  - . granulométrie;
  - . densité;
  - . volume spécifique;
  - . carbone total;
  - . carbone organique total;
- analyse des paramètres chimiques:
  - . métaux (digestion ouverte et non résiduelle);
  - . HAP;
  - . congénères des BPC;
  - . phosphore total et inorganique;
  - . pesticides organochlorés et organophosphorés et triazines;
  - . chlorophénols, chlorocatéchols et chloroguiacols.

La description détaillée des méthodes utilisées pour les analyses et l'interprétation est présentée dans les sections suivantes.

## 3.2 Positionnement

3.2.1 **Objectifs** - Suivant les termes de référence du mandat, les principaux objectifs du positionnement se résument comme suit:

- atteindre une précision cumulée inférieure à 10 m en mode dynamique de façon à assurer la localisation des transects de relevés acoustiques en continu;
- atteindre une précision cumulée inférieure à 10 m en mode statique de façon à assurer la localisation des stations d'échantillonnage (bennes, carottage de calibration et forages).

3.2.2 **Description du système utilisé** - Le système de positionnement utilisé pour la campagne de terrain 1991 est un système GPS<sup>1</sup> (global positioning system) de marque Magellan NAV-1000 Pro.

Le système GPS utilisé comprenait:

- 2 récepteurs modèle NAV 1000 Pro avec antennes et préamplificateurs;
- 2 ordinateurs de terrain, Bondwell B-310 pour l'acquisition des données;
- les logiciels d'acquisition et de traitement de données.

Le modèle NAV-1000 Pro peut être opéré en trois modes différents soit:

- mode statique: qui permet d'obtenir une précision inférieure à 10m. avec moyennage de 60 lectures (en temps réel);
- mode différentiel: statique ou dynamique; qui permet d'obtenir une

---

<sup>1</sup>

Les systèmes GPS utilisent les signaux transmis par 3 satellites et calculent une position par intersection à la surface du globe.

précision inférieure < 5 m en statique, ou 10 m en dynamique (en différé);

- en double précision: statique avec moyennage sur 60 lectures et corrections différentielles, pour obtenir une précision inférieure à 3 m (en différé).

Pour atteindre la précision recherchée, le système GPS a été configuré pour opération en mode différentiel avec une station mobile (bateau de relevés) et une station de contrôle terrestre. La figure 3.1 illustre la configuration du système de positionnement GPS utilisé pour la campagne de terrain 1991.

**3.2.3 Calibration** - La calibration des deux récepteurs GPS NAV-1000 PRO a été effectuée sur un point géodésique de coordonnées connues. Le point géodésique utilisé a servi de station de contrôle pour les relevés acoustiques et l'échantillonnage à la benne et au carottier.

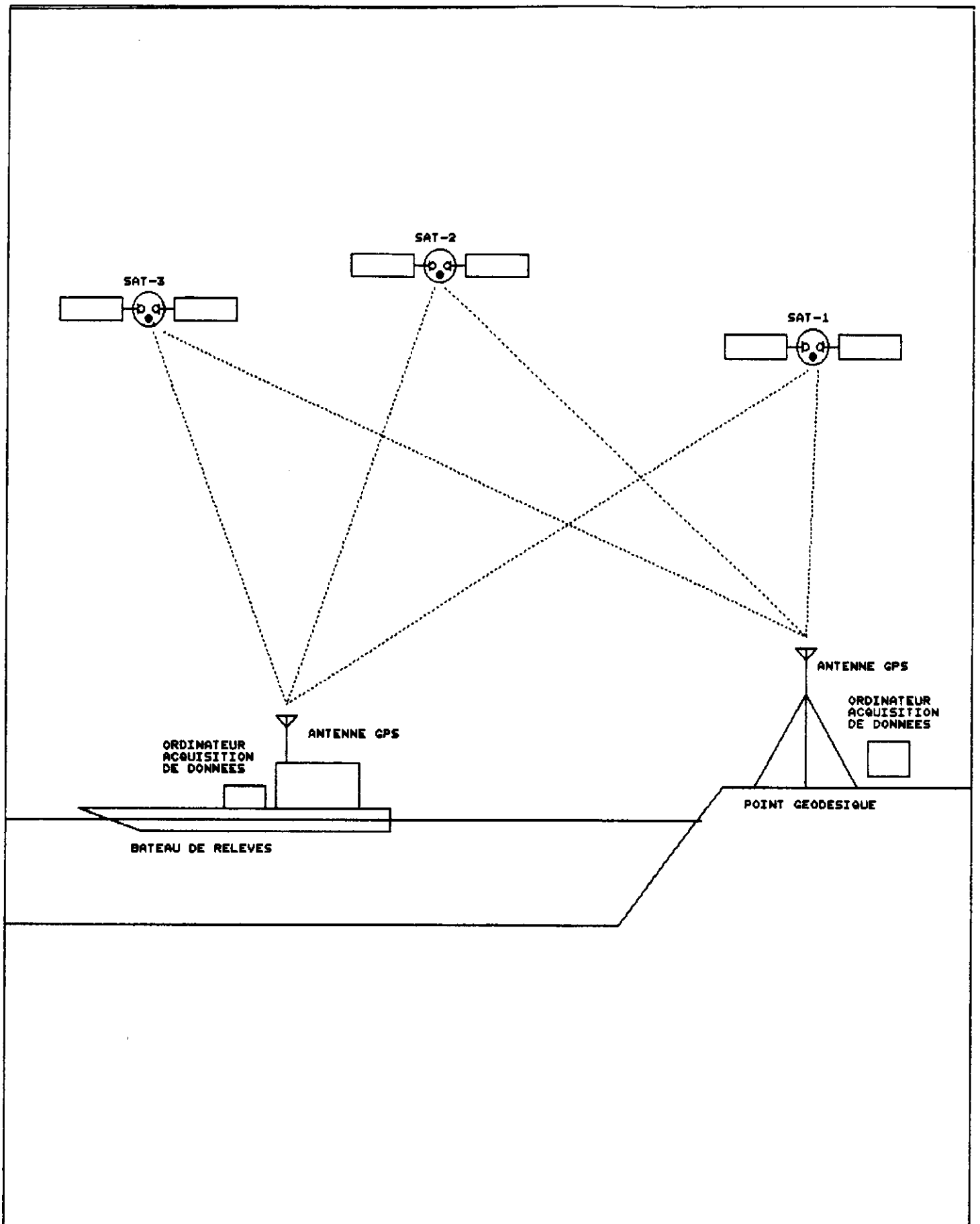
Le point de contrôle de la station terrestre était établi sur un site permanent localisé à l'extrémité nord-est de la jetée de la marina royale St.Lawrence Yatch Club, sur un point intersecté à partir du repère no 7702311 (Allan-2). La position de la station de contrôle nommée Ryc a été intersectée à 6,70 m et à Nord-142° du repère géodésique Allan-2.

Les coordonnées de la station Ryc sont:

- Zone UTM 18
- Nord: 5 031 843
- Est: 597 564
- Altitude: 27,75 m

La description du repère géodésique Allan-2 apparaît à l'annexe B.





3.1 Configuration du système de positionnement GPS

Pour la calibration, les deux récepteurs ont été initialisés suivant les mêmes paramètres et synchronisés sur les mêmes satellites. Les paramètres d'initialisation sont les suivants:

- position UTM:        nord - 5 031 843  
                              est - 597 564
- mode: 2D (avec altitude connue)
- angle minimum: 10° (horizon)
- datum: NAD 27
- altitude de référence: NMM (niveau moyen des mers)
- vitesse d'acquisition: 2.5 s

Les procédures de calibration sont décrites dans le manuel de l'utilisateur (Magellan, 1991).

**3.2.4 Opération** - Durant les travaux de terrain, le système GPS a été opéré suivant trois modes différents:

- en mode dynamique avec corrections différentielles appliquées en post-traitement pour les relevés acoustiques;
- en mode statique avec corrections différentielles appliquées en temps réel (double précision > 3 m) pour le carottage de calibration des relevés sismiques et des bennes;
- en mode statique avec moyenne de 60 lectures, pour les échantillonnages de benne et les forages.

Les procédures d'opération des différents modes d'opération sont décrites à l'annexe C.

**3.2.5 Contraintes** - En mode statique avec moyenne de lectures et en appliquant les corrections en temps réel, le système GPS est long à opérer pour obtenir la précision recherchée ( $< 3\text{m}$ ). Il est nécessaire de transmettre les corrections différentielles en temps réel par voie VHF-radio ce qui nécessite qu'une personne opère la station de contrôle terrestre. Les réajustements de la position du bateau sur le point nécessite du temps.

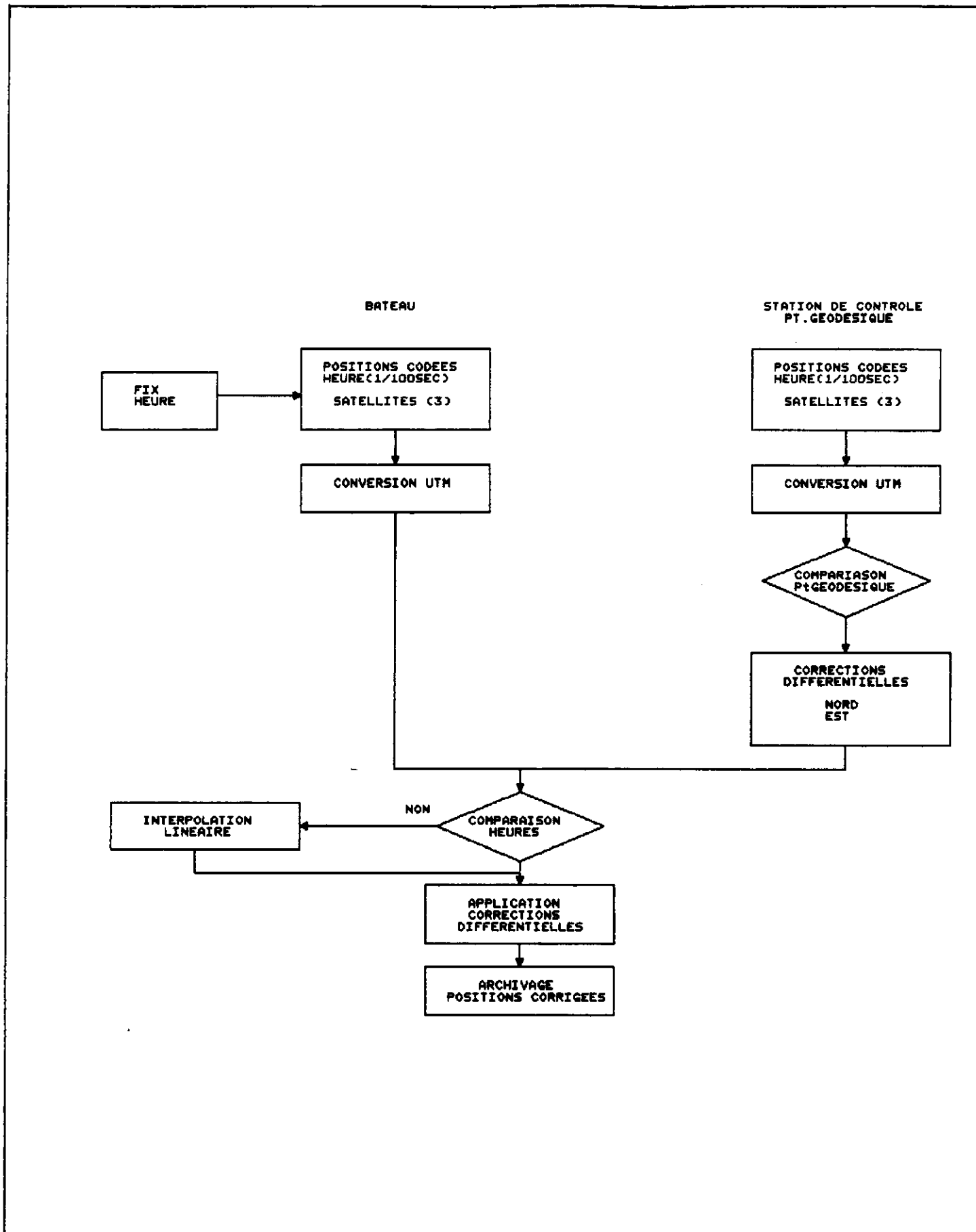
Pour ces raisons, l'échantillonnage des 5 carottes de calibration et des premières 38 bennes ont été effectuées en mode statique avec moyennage sur 60 lectures et corrections différentielles appliquées en temps réel, alors que les 22 bennes supplémentaires et les 3 forages ont été effectués seulement en mode statique avec moyenne sur 60 lectures (précision  $< 10\text{ m}$ ).

**3.2.6 Traitement** - Les données de positionnement acquises lors des relevés acoustiques en continu (dynamique), ont été traitées en mode différentiel au retour de la campagne de terrain. La figure 3.2 présente l'organigramme de traitement des données de positionnement GPS pour les relevés en continu.

Le fichier acquis par la station de contrôle terrestre est converti en coordonnées rectangulaires et ensuite comparé pour chaque position (au 2.5 sec) aux coordonnées du point géodésique. Le programme établit les corrections à appliquer en fonction du temps (au 1/100 s).

Les positions acquises sur le bateau sont comparées par correspondance en temps avec le fichier de contrôle et les corrections différentielles sont appliquées directement.

Pour le carottage de calibration des relevés sismiques, les données de positionnement de la ligne 5 ont été traitées sur le terrain en mode de traitement différentiel. Les sites de carottage ont été établis et positionnés sur le terrain la journée suivante en mode statique avec corrections différentielles appliquées en temps réel, par communication radio VHF avec la station de contrôle. La précision a été doublée ( $< 3\text{ m}$ ) par moyennage sur les lectures.



3.2 Organigramme du traitement de données de positionnement

### 3.3 Relevés acoustiques

3.3.1 **Objectifs** - L'utilisation de méthodes acoustiques telles que le profilage de sismique réflexion en continu et le balayage acoustique à grand angle (sonar latéral) a été évaluée pour caractériser les sédiments de la zone à l'étude.

Les relevés acoustiques avaient pour objectifs:

- d'établir en continu l'épaisseur et la nature des sédiments récents;
- de déterminer la répartition des matériaux de surface;

dans le but d'en cartographier les résultats et d'établir de façon quantitative le volume de sédiments récents.

3.3.2 **Plan de relevés** - Le plan de relevés acoustiques a été établi en fonction des paramètres affectant la répartition des sédiments qui sont principalement: la bathymétrie, l'hydrodynamique et la répartition des plantes aquatiques.

Le plan comporte 14 lignes orientées nord-sud et espacées d'environ 1km, qui recoupent le chenal nord. De plus, 2 lignes parallèles orientées dans l'axe est-ouest traversent la zone à l'étude. La figure 3.3 illustre les lignes de relevés acoustiques. Les 16 lignes relevées de réflexion sismique totalisent plus de 80 km alors que les relevés au sonar à balayage latéral représentent 24 km.

### 3.3.3 Réflexion sismique

#### Objectifs

Les relevés de profilage sismique avaient pour objectifs:

- d'établir l'épaisseur et la nature des sédiments récents en continu dans le but de quantifier le volume des sédiments récents;
- déterminer la nature des sédiments sous-jacents pour établir si les sédiments glacio-lacustres ou marins peuvent agir comme sources maximales.

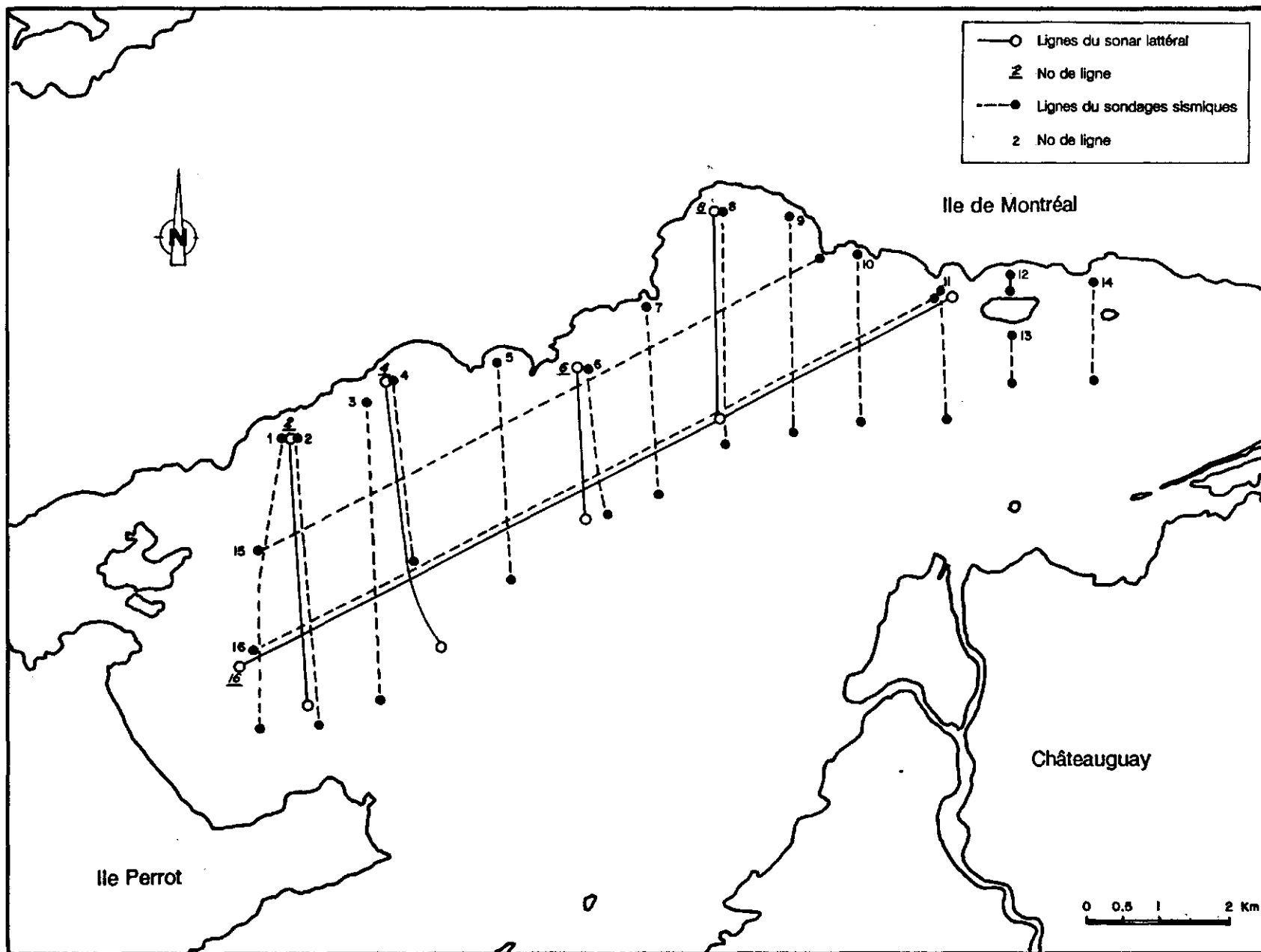


Figure 3.3 Localisation des relevés acoustiques

### Description du système utilisé

Le système de profilage sismique utilisé est le Biosonics modèle 102. Le système a été sélectionné dès le début du mandat pour ses caractéristiques de résolution (< 15-20 cm), sa qualité d'enregistrement en temps réel (échelle 1:50, 4 tons de gris) et sa fiabilité.

Le rapport "Essais pour la sélection d'un système de profilage sismique haute résolution", (SNC, 1992), décrit en détail les critères de sélection ainsi que les caractéristiques techniques du Biosonics 102 qui sont résumées ici.

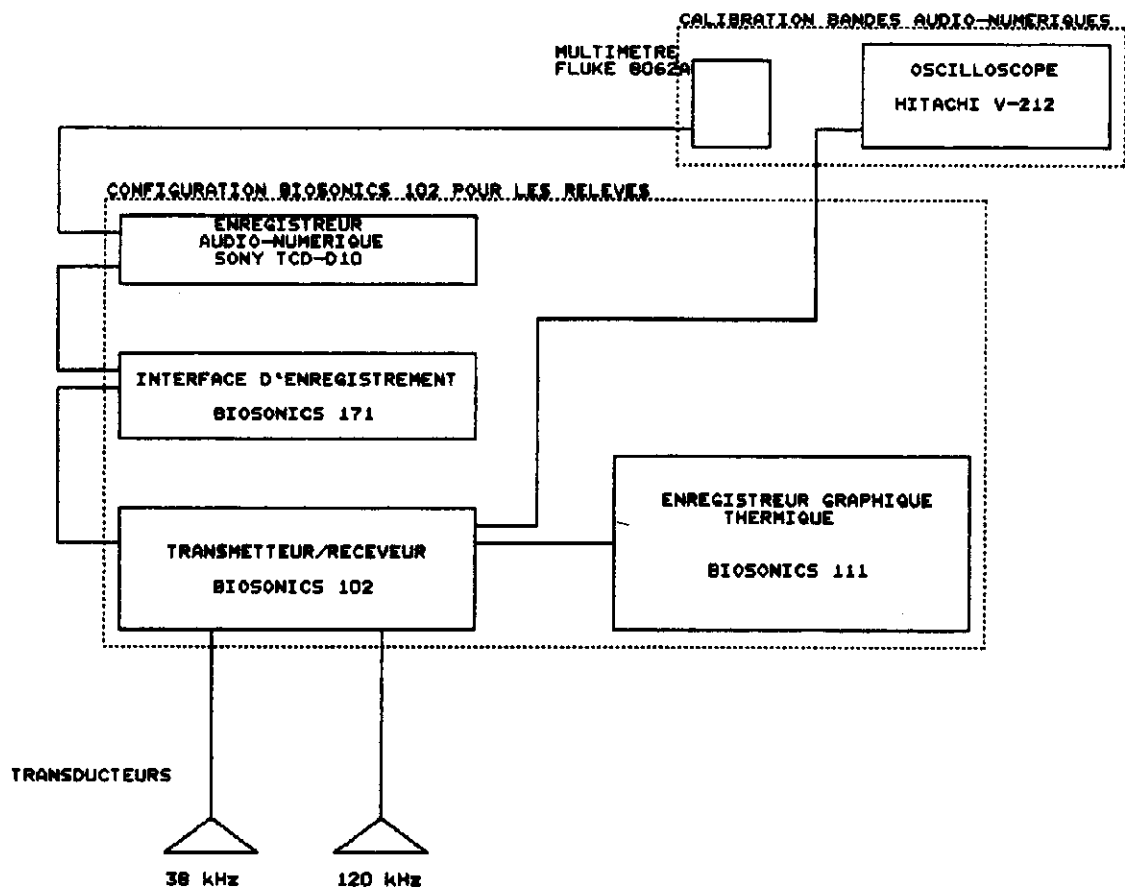
Le model 102 est un sondeur conventionnel qui émet de courtes impulsions sonores (100  $\mu$ sec) sur fréquences porteuses fixes. Deux fréquences ont été utilisées soit: 38 KHz et 120 KHz émises en alternance par multiplexage.

Les enregistrements étaient effectués sur enregistreur graphique thermique (modèle 111 de Biosonics) pour la fréquence à 38 KHz et simultanément sur bande magnétique audionumérique (38 KHz et 120 KHz). La configuration du système est représentée à la figure 3.4. Les caractéristiques du système sont présentées à l'annexe A.

### Opération

Les deux transducteurs du Biosonics étaient montés sur un support fixé du coté bâbord de l'embarcation à 1 m de l'antenne GPS. Les réglages du sondeur ont été fixés selon les paramètres suivants:

- transmetteur
  - impulsion: 0,1 milliseconde
  - intervalle de tir: 0,20 s (5 impulsions/s)
  - puissance: -13 db (50w)
  - mode: F1 (120 KHz)/F<sub>2</sub> (38 KHz) multiplexé



3.4 Configuration du système de profilage sismique



- receveur  
gain: -18 db  
bande passante: 5 KHz
- enregistreur  
départ: 2 m  
échelle: 10 m

Les bandes audionumériques ont été calibrées pour l'enregistrement des 2 fréquences à 4,0 Vrms (38 KHz) et 7,0 Vrms (120 KHz) avec l'oscilloscope et le multimètre numérique. Ces paramètres de réglage ont été établis suivant les conditions rencontrées lors des essais de sélection de sondeur, pour l'environnement aquatique de la zone à l'étude soit une profondeur de 0 à 10 m et une épaisseur de sédiments récents inférieure à 1 m.

L'enregistrement graphique était relié au système de positionnement GPS par l'intermédiaire d'une interface qui produisait les signaux de marque d'événements.

Les 50 km de relevés acoustiques ont été relevés en 3 jours à une vitesse approximative de 3 à 4 noeuds (1,5 à 2 m/s). Les intervalles de marques d'événements ont été fixées à 60 s (environ 120 m entre chaque marque) avec enregistrement automatique de la position.

La configuration du système d'acquisition de données et du système de profilage sismique est représentée à la figure 3.4. Les procédures d'opération pour les relevés acoustiques sont décrites à l'annexe D.

#### Calibration des sondages sismiques

Le carottage de calibration avait pour but de déterminer la nature et la stratigraphie des couches de sédiments identifiées après analyse préliminaire des enregistrements sismiques.

La correspondance établie entre les données de calibration et les profils enregistrés est assez bonne compte-tenu du remaniement potentiel lors du carottage (voir résultats à la section 4.1.7).

### Contraintes

Pendant les sondages de réflexion sismique, les deux fréquences utilisées (38 KHz et 120 KHz) ont été enregistrées simultanément sur bandes audio-numériques. Cependant, seulement la fréquence de 38 KHz a été enregistrée sur papier thermique.

Le tirage sur papier thermique des enregistrements de la fréquence à 120 KHz aurait nécessité beaucoup trop de temps (le même temps que les relevés eux-mêmes).

Des essais avec la fréquence de 120 KHz ont montré que celle-ci n'offrait pas une meilleure définition et très peu de pénétration. De plus, la fréquence de 120 KHz était complètement réfléchiée par les plantes aquatiques.

### **3.3.4 Sonar à balayage latéral**

#### Objectifs

L'utilisation du sonar à balayage latéral combiné à la réflexion sismique avait pour objectifs:

- de caractériser la nature et l'étendue des sédiments de surface;
- de vérifier la topographie du relief du fond afin de détecter la présence d'affleurements rocheux et de dunes hydrodynamiques.

Le sonar à balayage latéral produit une image en plan du fond (bande de 100 m) qui complète les profils de réflexion sismique en apportant des informations sur les textures relatives des matériaux de surface, les limites de leur zonage et les affleurements du roc.

#### Description du système utilisé

Le sonar à balayage latéral utilisé est de marque Imagenex Technology modèle 855. Le modèle 855 est un sonar à balayage à haute résolution utilisant de courtes impulsions sonores (7  $\mu$  sec) sur une fréquence porteuse à 330 KHz. Le

transducteur émet sur 2 faisceaux latéraux à grand angle (2 x 1,9 deg. x 60 deg.) chacun des faisceaux permet de couvrir le fond sur des distances de 10 m à 100 m, dépendant de la profondeur d'eau.

Les signaux reçus sont traités de façon numérique par l'unité de surface (processeur). Les enregistrements sont visibles en temps réel sur écran vidéo couleur (128 couleurs) et saisis sur bande audionumérique.

La configuration du système apparaît à la figure 3.5. Les caractéristiques techniques sont décrites à l'annexe A.

### Opération

Pour les relevés, le transducteur était monté à tribord (du coté opposé aux transducteurs du sondeur sismique) à 1 m de l'antenne du GPS.

Les réglages du sonar à balayage ont été fixés selon les paramètres suivants:

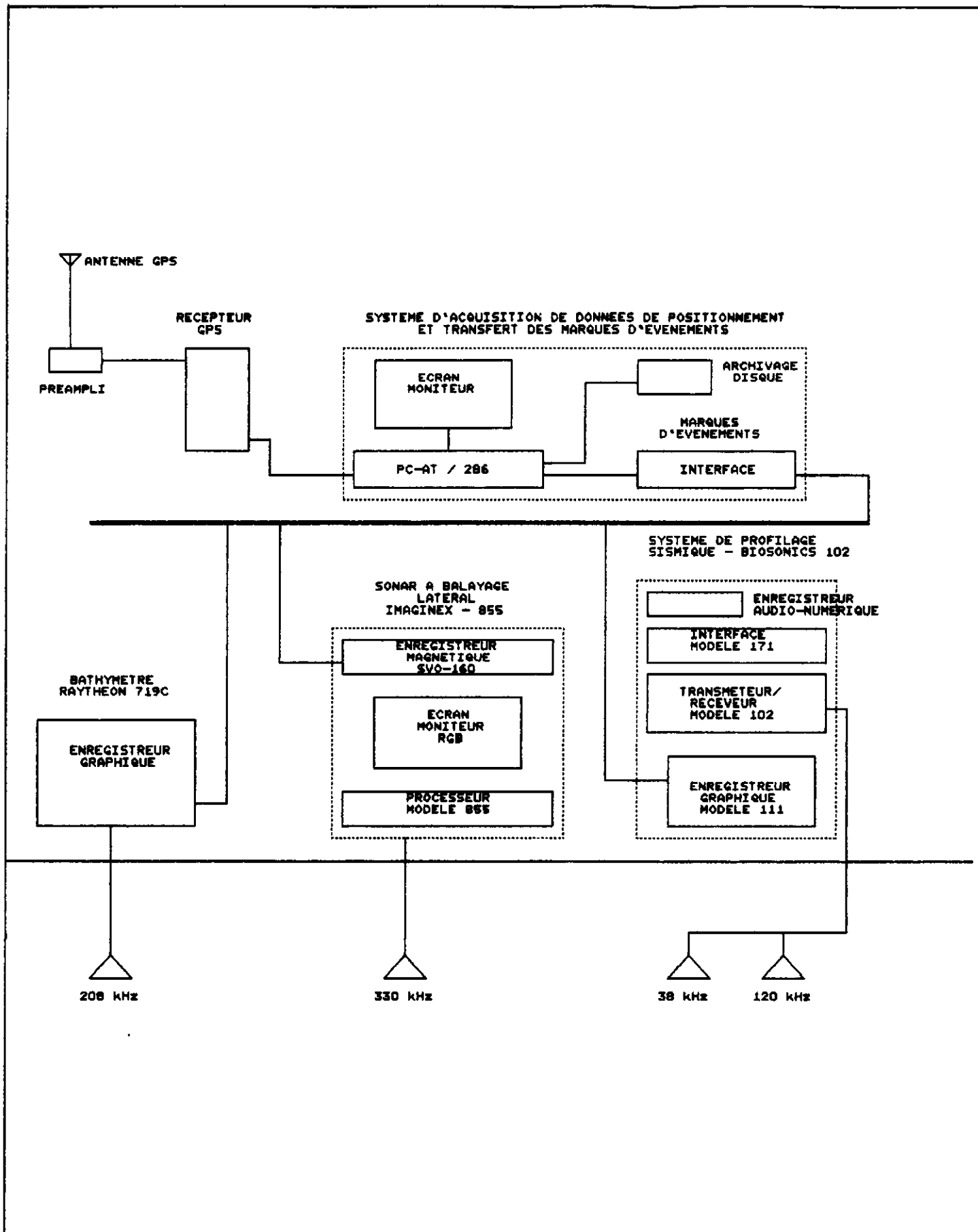
- processeur  
gain: 65 (0-100)  
échelle: 60 m
- enregistrement numérique  
gain: 5 (0-10)

Les paramètres de gain et d'échelle ont été établis pour atteindre la qualité optimale aux profondeurs variant de 0 à 10 m pour une texture du fond variant des boues aux sables au roc affleurant.

Les lignes 2, 4, 6, 8 et 16 ont été relevées au sonar latéral et totalisent approximativement 25 km. Les relevés ont été effectués après les sondages sismiques et l'échantillonnage.

### Calibration des relevés de sonar latéral

Les résultats de l'échantillonnage superficiel à la benne ont servi à calibrer les résultats du sonar latéral. Les descriptions granulométriques "in situ" ont servi à établir la corrélation entre les textures visibles sur image et la nature des sédiments rencontrés.



3.5 Configuration du système de relevés acoustiques

### Contraintes

Les relevés de réflexion sismique et de sonar latéral n'ont pas pu être effectués en parallèle. En effet, les émissions sonores générées à 38 KHz par le sondeur sismique génèrent des fréquences harmoniques qui sont des multiples de la fréquence de base (76, 152, 304 KHz) et produisent des interférences sur le sonar latéral. Ces interférences masquent en partie les résultats.

Les plantes aquatiques à un stade de développement avancé pour la période de l'année ont masqué le fond sur plus de 70% de la couverture des relevés.

**3.3.5 Sondages bathymétriques** - Des sondages bathymétriques ont été effectués conjointement aux relevés de réflexion sismique. Ces sondages avaient pour but de vérifier la définition de l'interface eau-sédiments obtenue avec le sondeur sismique de Biosonics.

Le bathymètre utilisé est un modèle Raytheon 719-C à enregistrement graphique avec transducteur à 200 KHz et faisceaux de 8°. Le transducteur était fixé sur tribord à 1m de l'antenne GPS.

Le Raythéon a été ajusté avec un gain minimum afin d'obtenir la meilleure définition de l'interface eau-sédiments sur une échelle de 0-16 m, selon la carte bathymétrique (SHC-1410).

## **3.4 Échantillonnage superficiel**

**3.4.1 Objectif** - La caractérisation physico-chimique des sédiments de surface a pour objectif:

- de déterminer l'étendue géographique de la zone d'accumulation;
- de définir la nature des sédiments de surface;
- de déterminer la nature de la contamination;

- de définir la répartition spatiale des contaminants;
- de quantifier l'importance de la contamination par rapport aux normes environnementales.

Ces objectifs ont pour but d'établir le bilan massique de la zone d'accumulation et de mieux comprendre la dynamique sédimentaire du système Saint-Laurent.

**3.4.2 Plan d'échantillonnage** - Comme nous l'avons défini dans l'approche générale (section 3.1), le secteur de la zone d'étude-pilote fut soumis à un plan d'échantillonnage systématique. La grille d'échantillonnage de 1 km x 1 km fut orientée selon les axes longitudinaux et latéraux du fleuve. Dans la partie ouest de la zone pilote, la densité d'échantillonnage fut localement augmentée à 500 m par 500 m entre les stations de façon à pouvoir mieux évaluer les apports de la rivière Outaouais.

Le plan d'échantillonnage réalisé sur la zone d'étude-pilote est présenté en annexe sur la carte 3 à l'échelle du 1: 20 000. Sur cette carte on retrouve la position géographique de chacune des stations visitées et leur identification alphanumériques. Cette identification alphanumérique correspond à:

Ex.: C-01-11

C = Identification du secteur du lac Saint-Louis

01 = varie de 01 à 11, identification de la ligne nord-sud d'échantillonnage, le numéro de ligne croît d'ouest en est dans la zone pilote.

11 = varie de 11 à 112 et de A1 à A3, identifie le numéro de station sur la ligne d'échantillonnage, le numéro de station croît du nord au sud sur chaque ligne.

La station C-04-41 se situe près de la station C-03-31 à cause d'un mauvais positionnement au moment de l'échantillonnage. A la station C-1B-01, aucun matériel sédimentaire ne pouvait être échantillonné. Cette station fut remplacé par la station C-1B-02.

**3.4.3 Opérations de terrain** - Avant la réalisation du prélèvement des échantillons sur le terrain, il fut essentiel de préparer les contenants utilisés en fonction des paramètres chimiques et physiques qui devaient être analysés. Nous avons utilisé les contenants suivants:

- paramètres physiques: sac de plastique à fermeture hermétique d'un volume de 250 à 500 ml de type "ziplock";
- paramètres chimiques organiques: récipients de métal (aluminium) de 250 et 500 ml conditionnés à l'acétone et à l'hexane;
- paramètres chimiques inorganiques: récipient de plastique de 500 ml conditionnés à l'acide sulfurique et nitrique.

Le conditionnement des récipients a été réalisé au laboratoire d'Environnement Canada de Longueuil.

Nous avons prévu deux fois plus de sacs de plastique qu'il y avait d'échantillons à prélever afin de pouvoir placer l'échantillon dans un sac de sécurité pour éviter toute contamination avenant la perforation d'un des sacs. De plus, nous avons prévu un nombre additionnel suffisant de récipients pour les échantillons de réserve.

Le prélèvement des échantillons fut réalisé à l'aide d'une benne SHIPEK 860 (figure 3.6). Dans des conditions idéales de prélèvement, cette benne recueille un échantillon d'environ 10 cm de profondeur qui est peu ou pas remanié sous l'action de fermeture de la benne.

Après les procédures de positionnement qui sont décrites à la section 3.2, la benne SHIPEK fut larguée à partir d'une ouverture centrale du bateau. Après le déclenchement de la benne et sa remontée sur le bateau, on peut juger de la quantité de matériel qui a été récupéré lors de l'essai. Lorsque le sédiment était boueux et semi-liquide, un essai était suffisant pour le sous-échantillonnage. Toutefois, lorsque le sédiment était dur, graveleux ou sableux, il était nécessaire de réaliser plus de 2 ou 3 essais afin d'obtenir suffisamment de matériel pour le sous-échantillonnage. Nous avons limité le nombre de coups de benne à 10 essais avant de déclarer forfait.

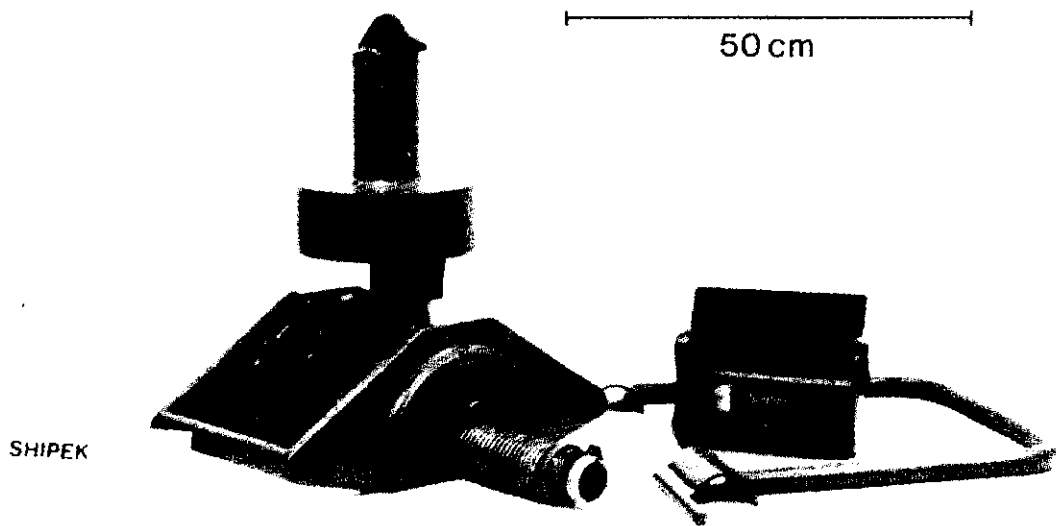
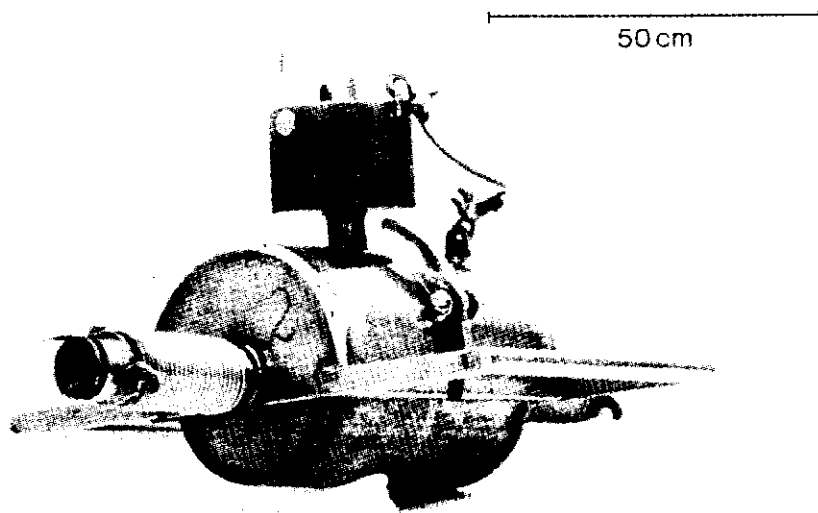


Figure 3.6 Benne Shipek modèle 860



Lorsque le matériel était semi-liquide, le sous-échantillonnage fut réalisé en prélevant les 3 à 5 premiers cm au maximum de sédiments. Le sous-échantillonnage fut réalisé directement dans le récipient de la benne en utilisant un système de quadrants. La répartition des divisions du système de quadrant est présentée à la figure 3.7. Chaque sous-échantillon est alors formé de 6 parcelles réparties sur l'ensemble du récipient.

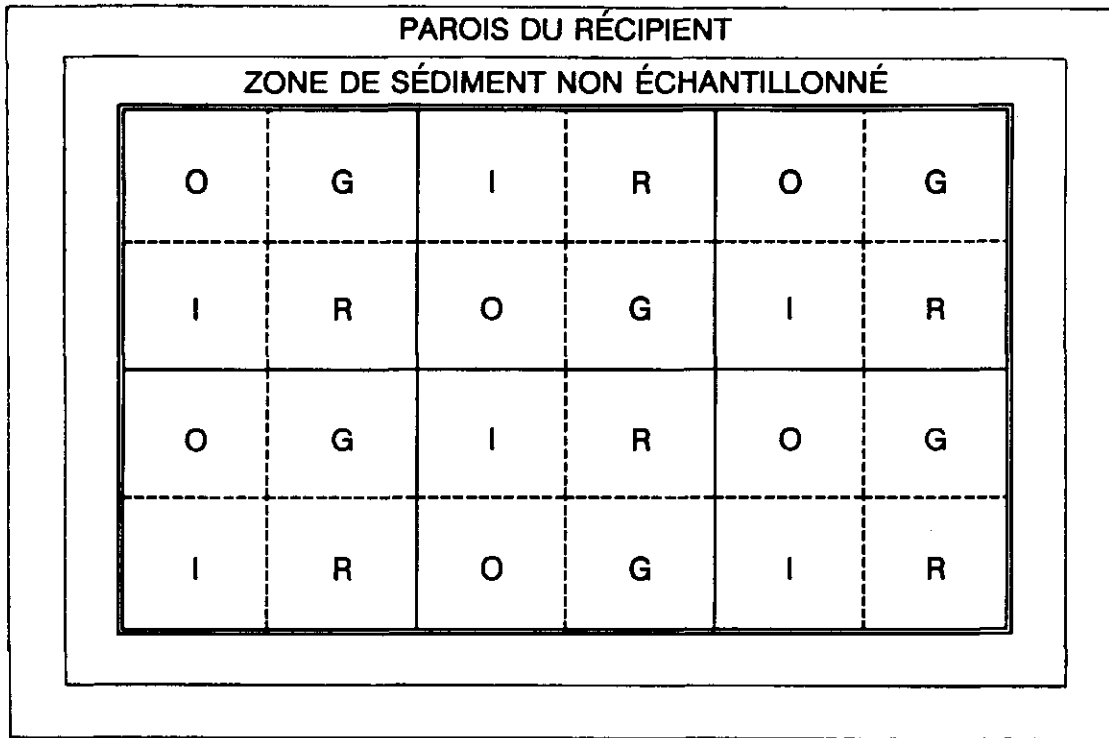
Lorsque le matériel était plus sableux ou graveleux la benne SHIPEK ne permettait pas une bonne récupération du matériel. La récupération variait généralement entre 1 et 3 cm. Compte tenu de cette faible quantité de sédiment, il était nécessaire d'effectuer plusieurs essais de benne.

Pour chaque essai le matériel recueilli était transféré dans un plateau de verre. Lorsqu'il y avait assez de matériel pour faire le sous-échantillonnage, nous avons homogénéisé le sédiment dans le récipient de verre à l'aide d'une spatule de bois. Pour obtenir un bon homogénat de couleur et de texture uniforme, il fut généralement nécessaire d'agiter le sédiment avec une spatule de bois en formant des 8 une vingtaine de fois. Ensuite le sous-échantillonnage était réalisé en utilisant le même système de quadrant décrit précédemment pour le matériel semi-liquide.

Nous avons recueilli un volume d'environ 250 à 500 g de sédiment pour chacun des groupes d'analyse de chacun des sous-échantillons.

Simultanément au sous-échantillonnage, des renseignements de terrain furent notés pour les items suivants:

- numéro des sous-échantillons;
- profondeur du prélèvement des sous-échantillons;
- couleur et variations s'il y a lieu;
- texture;
- granulométrie;
- odeurs particulières (pétrole, oeufs pourris, etc);
- présence de vie animale et/ou végétale;



**O** Analyse organique  
**I** Analyse inorganique  
**G** Analyse physique  
**R** Réserve

Figure 3.7 Division d'un échantillon en quadrants.

- compaction.

Ces renseignements de terrain furent compilés sur une fiche de terrain et informatisés par la suite. Ils sont présentés à l'annexe E.

Après le sous-échantillonnage, les récipients contenant le sédiment pour les paramètres organiques furent congelés à une température d'environ -10°C jusqu'au moment de l'analyse. Pour leur part les sous-échantillons destinés aux paramètres inorganiques et à la détermination de la granulométrie furent réfrigérés à environ 4°C jusqu'à leur expédition aux laboratoires d'analyse (Rochon et Chevalier, 1987).

L'expédition des échantillons vers les différents laboratoires s'est effectuée par autobus à l'aide de glacières dans lesquelles nous avons ajouté des sacs de glace sèche afin de garder la température aussi basse que possible pendant le transport. Notons enfin que les échantillons furent expédiés préférentiellement en début de semaine de façon à éviter qu'ils soient laissés à la gare d'autobus pendant la fin de semaine.

**3.4.4 Contraintes** - L'échantillonnage des sédiments de surface à l'aide de la benne SHIPEK est sujet à un certain nombre de contraintes physiques telles que:

- Il est fréquent que la fermeture du récipient qui recueille le sédiment soit incomplète à cause d'une roche ou d'un mollusque;
- La benne permet très peu de pénétration sur du matériel sableux ou graveleux malgré son poids (environ 40 kg);
- Lorsqu'il y a beaucoup de macrophytes, la récupération de sédiments est beaucoup moins importante;
- Le récipient de la benne est relativement petit et aurait avantage à être plus grand compte tenu de la quantité de sédiments nécessaires pour les analyses chimiques;
- A cause de la forme du récipient de la benne (demi-lune), il est difficile de faire la description stratigraphique du sédiment prélevé.

### 3.5 **Échantillonnage stratigraphique par forage**

3.5.1 **Objectifs** - L'échantillonnage stratigraphique par forage a pour principaux objectifs:

- de prélever en profondeur des sédiments de la zone d'accumulation;
- de définir les différentes unités stratigraphiques des sédiments récents;
- de définir la nature et la qualité des sédiments récents;
- d'évaluer le taux de sédimentation.

De façon générale, l'échantillonnage stratigraphique par forage avait pour but d'obtenir une description sédimentologique et stratigraphique des sédiments de la zone d'accumulation et de définir la qualité des sédiments récents et leur évolution temporelle.

3.5.2 **Plan d'échantillonnage** - Le plan d'échantillonnage pour les forages était relativement simple compte tenu du fait que le nombre de forage était limité à 3 pour la zone d'étude-pilote. A partir de l'information recueillie pendant le sous-échantillonnage des sédiments de surface (section 3.4) et à l'aide des résultats préliminaires des relevés géophysiques, nous avons positionné les trois stations de forage aux intersections de lignes 3, 5, 7 et 16 des relevés géophysiques en correspondance avec les stations de bennes C-03-33, C-05-53 et C-07-72 qui avaient montré une forte quantité de sédiments silteux et semi-liquide au moment de leur sous-échantillonnage. Nous avons, dans le présent cas, supposé que ce type de sédiments était le plus représentatif de la zone d'accumulation. La position exacte des stations de forage est présentée en annexe sur la carte 3.

**3.5.3 Opérations de terrain** - Le carottage fut réalisé selon deux méthodes différentes. L'une fut réalisée par plongée à l'aide de tube carottier enfoncé à la main par le plongeur et l'autre à partir de bateau à l'aide d'une foreuse vibrasonique de marque Rossfelder. Cette foreuse utilise des tubes d'aluminium de 10 cm de diamètre permettant de réduire au minimum la compaction des sédiments. La récupération de l'échantillon est assurée par la mise en place d'un panier à l'extrémité du tube. Ce type de foreuse a déjà montré son efficacité à pénétrer plusieurs types de sédiments (vase, sable, gravier) sans perturber de façon importante les structures présentes.

La foreuse, montée sur le bateau est amenée sur le site de forage et positionnée à l'aide d'un système GPS (section 3.2). Quand l'embarcation est bien stable, la base et la tête vibrante sont descendues au fond à l'aide de treuils électriques. La profondeur d'eau est notée. Le forage se poursuit jusqu'à la longueur limite du tube ou jusqu'au refus de pénétration. Grâce aux plongeurs qui effectuaient des carottages à proximité il fut possible de marquer le tube à l'interface eau-sédiment afin de vérifier la longueur forée. Le travail des plongeurs a également permis de vérifier la bonne marche du carottier au fond et de contrôler la verticalité du tube.

La carotte était ensuite amenée à la surface, débarrassée du tube en trop, bouchée aux deux extrémités et marquée. Les trois carottes d'un même site furent prélevées à quelques mètres les unes des autres. A chaque carotte, une nouvelle position est notée.

Pour la zone d'étude-pilote, les longueurs de carottes ont varié entre 0,8 m et 1,35 m. Le tableau 3.1 fournit une comparaison entre les longueurs forées et les longueurs réelles. La différence entre les longueurs réelles récoltées et les longueurs forées est due à :

- une perte d'une certaine partie de l'échantillon situé à l'extrémité du carottier lors de la remontée de celui-ci;
- une compaction du matériel à l'intérieur du carottier.

Bien que nous n'ayons pu quantifier la contribution de chacun de ces phénomènes, nous avons remarqué des pertes pouvant atteindre plus de 30 cm.

**Tableau 3.1 Comparaison des longueurs de carottes forées et des longueurs réelles récoltées**

# carotte	longueur forée (cm)	longueur réelle (cm)	profondeur d'eau (m)
F3A	134	90	4.5
3B	150	110	
3C	150	110	
5A	150	100	6
5B	150	94	
5C	150	94	
7A	150	133	5.5
7B	150	101	
7C	150	80	

Le carottage par vibration a permis de traverser, dans tous les cas, les couches de sédiments récents qui varient en épaisseur de 30 à 60 cm et l'argile glacio-lacustre sous-jacent.

L'importance du panier destiné à retenir les sédiments et dont est muni le bout du tube a été démontrée sur le site 3. Un essai sans panier a donné lieu à une récupération nulle. Le poids du sédiment associé à la liquéfaction d'une mince couche d'argile sur le pourtour de la carotte favorise le glissement de tout l'échantillon lors du retrait du carottier.

Toutes les carottes furent transportées en position verticale dans une camionnette jusqu'au laboratoire pour le sous-échantillonnage. Les carottes destinées aux analyses organiques furent échantillonnées au moment de leur arrivée au laboratoire tandis que celles destinées aux analyses inorganiques furent congelées. Les carottes servant aux analyses tomodynamométriques ont été transportées à Rimouski et conservées dans un réfrigérateur de l'UQAR.

Les opérations de forage par plongée ont été réalisées par l'INRS-Eau et les carottes prélevées ont servi aux analyses radio-isotopiques.

**3.5.4 Extrusion et sous-échantillonnage** - Le tube d'aluminium de la première carotte sous-échantillonnée (F3C) fut coupé sur sa longueur à l'aide d'une toupie munie d'une pointe au carbure. Cette technique fut abandonnée pour les autres carottes car il y avait introduction de limaille d'aluminium dans le sédiment pendant la procédure de coupe. Nous avons alors opté pour une extrusion de la carotte de sédiment à l'aide d'une extrudeur adapté au diamètre du tube d'aluminium. Cette technique remanie uniquement les quelques premiers mm de sédiments situés en périphérie de la carotte et entraîne un taux de compaction inférieur à 10% de la longueur totale de la carotte.

Le sous-échantillonnage effectué sur les carottes fut le suivant:

- Carottes A
  - . Sous-échantillons des paramètres physiques;
  - . Sous-échantillons de réserve.
- Carotte B
  - . Sous-échantillons des paramètres inorganiques;
  - . Sous-échantillons des radio-isotopes;
  - . Tomodensitométrie.
- Carotte C
  - . Sous-échantillons des paramètres organiques.

Le sous-échantillonnage était effectué à tous les cm pour les 10 premiers cm; à tous les 2 cm pour la section entre 10 et 20 cm; à tous les 3 cm pour la section restante. Chaque sous-échantillon avait une épaisseur de 1 cm qui était divisée en deux parties égales pour les carottes A et B. Le sous-échantillonnage s'est effectué à l'aide d'une spatule de plastique pour les paramètres inorganiques et physiques et déposé dans des récipients de plastique pour les paramètres organiques. Pour les paramètres inorganiques, il fut réalisé à l'aide d'une spatule de métal et déposés dans des récipients de métal.

Le système de numérotation des échantillons (ex: F5003) comprend l'identification de la carotte (F5) et la position de l'échantillon en profondeur (003 cm).

Simultanément au sous-échantillonnage des carottes de sédiment, une description visuelle du sédiment et des structures observables étaient réalisées selon la technique décrite par Mudie *et al* (1984). A la section 4.1.3, nous présentons la description et l'interprétation des lithologies et des structures de chacune des stations de forage.



**3.5.5 Conservation** - Tous les sous-échantillons de carottes furent congelés afin de les conserver. Ensuite, ils ont été expédiés par autobus jusqu'aux laboratoires d'analyse à l'aide des glacières contenant de la glace sèche.

**3.5.6 Contraintes** - L'utilisation d'une foreuse vibrasonique submersible facilite les opérations de forage sur le terrain mais impose certaines contraintes:

- compaction plus ou moins importante de la carotte de sédiment;
- utilisation d'un panier récupérateur sur le tube d'échantillonnage;
- difficulté à remonter le train de tige à cause de la succion produite par l'argile;
- le tube d'aluminium est difficile à couper.

### **3.6 Analyses**

Les analyses réalisées sur les sous-échantillons de la zone d'étude-pilote ont pour objectifs:

- d'identifier la nature des sédiments;
- d'identifier les contaminants présents dans ces sédiments;
- de mesurer et quantifier le degré de contamination de ces sédiments;
- de définir les limites physiques des zones contaminées;
- de définir l'évolution temporelle des contaminants.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons fait réaliser des analyses physiques, chimiques, radio-isotopiques et tomodynamométriques. Le nombre et le type d'analyse furent limités en fonction des budgets disponibles. Cependant, de façon à optimiser le nombre d'analyses, nous avons sélectionné les sous-échantillons de la façon suivante:

- Analyses physiques:
  - tous les sous-échantillons de bennes et de carottes

- **Analyses chimiques:**
  - tous les sous-échantillons de benne contenant des boues sableuses, silteuses ou argileuses;
  - tous les sous-échantillons de benne localisées à l'intérieur des zones contaminées identifiées par les travaux de Champoux et Sloterdijk (1988);
  - tous les sous-échantillons de carottes pour les paramètres inorganiques;
  - un sous-échantillon sur deux sur le profil vertical des carottes pour les paramètres organiques.
- **Analyses radio-isotopiques:**
  - tous les sous-échantillons de carottes.
- **Analyses tomodensitométriques:**
  - une carotte de chaque station.

Notons enfin que l'effort d'analyse chimique fut axé sur les paramètres inorganiques de type non-résiduel de façon à minimiser les coûts analytiques.

**3.6.1 Analyses physiques** - Les analyses physiques réalisées sur les sédiments de la zone d'étude-pilote par le laboratoire d'Environnement Canada de Burlington comprenaient l'analyse granulométrique, l'analyse du carbone total et du carbone organique total et la mesure de la densité de chaque échantillon.

La méthodologie utilisée pour les analyses granulométriques était tirée de Duncan et Lahaie (1979). Cette méthode utilise le tamisage pour la fraction supérieure à 0,062 mm et le "Sedigraph" pour la fraction inférieure à 0,062 mm. Cette méthode permet de définir la distribution granulométrique à tous les  $\frac{1}{2}$  phi selon l'échelle de Krumbein qui consiste en une transformation logarithmique du système de classification de Wentworth (Folk, 1974). En plus des différentes classes de particules (tableau 3.2), le programme informatique de traitement des données (SIZDIST) permet la quantification des indices et les définitions suivantes:

Tableau 3.2

Fractions granulométriques utilisées pour les analyses.

Type de particules	Échelle Wentworth	Échelle Krumbein
Gravier grossier et cailloux	> 16 mm	Phi $\phi$ < -4
Gravier moyen	< 16 mm et > 8 mm	Phi $\phi$ > -4 et < -3
Gravier fin et très fin	< 8 mm et > 2 mm	Phi $\phi$ > -3 et < -1
Sable	< 2 mm et > 0,062 mm	Phi $\phi$ > -1 et < 4
Silt	< 0,062 mm et > 0,004 mm	Phi $\phi$ > 4 et < 8
Argile	< 0,004 mm	Phi $\phi$ > 8

- percentile (5, 16, 25, 50, 75, 84, 95%);
- moyenne;
- déviation standard;
- indice de tri (kurtosis);
- indice d'asymétrie (skewness);
- appellation selon Folk;
- appellation selon Shepard;
- rapport silt/silt + argile;
- rapport gravier + sable/silt + argile.

Le carbone organique total (COT) et le carbone total (Ct) furent analysés à l'aide de l'appareil "CR-12 Carbon Determinator 781-600". Notons que pour l'analyse du COT, l'appareil utilise environ 1 g de sédiments prétraités à l'acide phosphorique afin d'éliminer la fraction carbonatée.

L'analyse de la densité fut calibrée à l'aide de deux standards: des billes d'acier de densité 2,4 g/cm<sup>3</sup> et des billes de grenat de densité 3,85 g/cm<sup>3</sup>. La densité est mesurée à cinq reprises pour chaque échantillon sec sur un volume standard d'environ 0,35 cm<sup>3</sup>. Cette densité de l'échantillon sec est ensuite transformée en densité de l'échantillon humide à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Densité éch. humide} = \frac{(\% \text{ humidité} * \text{densité eau})}{100} + \frac{(100\% - \% \text{ humidité} * \text{densité éch. sec})}{100}$$

### 3.6.2 Méthode d'analyses chimiques

Les échantillons de sédiments recueillis dans la zone d'étude-pilote furent quantifiés pour plusieurs paramètres organiques et inorganiques. Le tableau 3.3 présente chacun de ces paramètres analysés et le tableau 3.4 en donne les méthodes analytiques et les limites de détection fournies par les laboratoires. Les méthodologies détaillées des analyses chimiques sont présentées à l'annexe G.

**Tableau 3.3 Paramètres chimiques analysés**

Regroupement	Paramètres individuels analysés
<b>BPC congénères</b>	71, 77, 81, 105, 118, 126, 128, 137, 138, 146, 153, 156, 169, 170
<b>Pesticides organochlorés</b>	Hexachlorobenzène, Heptachlore, Aldrine, p.p'-DDE, Mirex, a-BHC, b-BHC, d-BHC, Lindane, Epoxyde d'Heprachlore, Trans-Chlordane, cis-Chlordane, o.p'-DDD, o.p'-DDt, p.p'-DDD, p.p'-DDT, Methoxychlore, a-Endosulfane, Dieldrine, Endrine.
<b>Pesticides organophosphorés et triazines</b>	Demeton-O, Phorate, Demeton-S, Dimethoate, Atrazine, Atrazine-désopropylé, Atrazine dé-éthylé, Diazinon, Métribuzine, Parathon méthyl, Féntrothion, Malathion, Parathion éthyl, Azenphos méthyl, Disulfoton, Phosphoamidon.
<b>Chlorophénols Chlorocatéchols Chlorogulacols</b>	4-Chloro-3-méthylphénol, 2-chlorophénol, ( (2,5) (2,4/2,6) (3,5) (2,3) (3,4) Dichlorophénol ) ( (2,4,6) (2,3,6) (2,3,5) (2,4,5) (2,3,4) Trichlorophénol ), Pentachlorophénol ( (2,3,5,6) (2,3,4,6) (2,3,4,5) Tetrachlorophénol ), 4.5 - Dechlorogulacol, Tetrachloroquiacol ( (3,4,5) (4,5,6) Trichlorogulacol ), 4.5 - Dichlorocatécol, 3.4.5 - Trichlorocaticol, Tetrachlorocatécol
<b>Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques</b>	Naphthalène, Acenaphthylène, Acenaphthène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo (A) Anthracène, Chrysène, Benzo (B+K) fluoronthène, Benzo (A) pyrène, Indeno (1,2,3-cd) pyrène, Dibenzo (AH) anthracène, Benzo (GHI) pérylène, Tetralin, 2-Methylnaphthalène, Méthylnaphthalène, 2-Chloronaphthalène
<b>Inorganiques</b>	Cuivre, Zinc, Plomb, Nickel, Chrome, Arsenic, Mercure, Cadmium, Selenium, Phosphore total et inorganique, Aluminium, Lithium, Manganèse, Fer

**Tableau 3.4 Méthodes analytiques et limite de détection des paramètres chimiques**

PARAMETRES	METHODES ANALYTIQUES	LIMITE DE DÉTECTION
Biphényles polychlorés (BPC) congénères Pesticides organochlorés	Méthode EPA 608 Purification sur colonne de florissil et analysé au chromatographe en phase gazeuse avec la détection à capture d'électrons	BPC congénère = 0.1 ppb pesticides OC = 1 ppb
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)	Méthode EPA 625 Purification sur gel de silice et analyse au CPG/SM muni d'un détecteur sélectif des ions	HAP = 0.01 ppm et 0.02 ppm pour indénopyrène; Dibenzo anthracène; Benzopérylène
Composés phénoliques	Extraction avec dichlorométhane-hexane-acétone et renversé dans l'eau-alcaline analysé par la méthode d'acétylation in situ	chlorophénols et chloroguaiacals = 5 ppb
Pesticides organophosphorés et triazines	Analysé par chromatographie en phase gazeuse avec la détection d'azote-phosphoré sur une colonne DB-5 megabore et une colonne DB-1 pour confirmation	Pesticides OP et triazine = 0.05 ppm
Cuivre Zinc Plomb Nickel Chrome Cadmium	Digestion ouverte $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ Dosage par absorption atomique avec technique à la flamme (Cr, Cu, Zn, Ni) et au four à graphite (Cd, Pb) <hr/> Extraction du non-résiduelle au HCl (1N) Dosage par absorption atomique identique à la digestion ouverte	Cu, Zn, Cr, Cd = 1 ppm Pb = 5 ppm Ni = 1 ppm <hr/> Cu, Zn, Cr, Cd = 0.1 ppm Pb = 0.5 ppm Ni = 0.1 ppm
Mercure	Digestion $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ en milieu acide Absorption atomique sans flamme	Hg = 0.01 ppm
Arsenic	Digestion $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ Génération d'hydrures et absorption atomique	As = 0.2 ppm

**3.6.3 Analyses radio-isotopiques** - Les analyses radio-isotopiques sont importantes lorsque l'on veut faire une caractérisation des sédiments dans le temps et l'espace. Grâce à la demi-vie de certains radio-isotopes on peut calculer l'âge de déposition et le taux de sédimentation (Mudroch et Joshi, 1991; Sherkla and Joshi, 1989).

Les radio-isotopes utilisés sont les suivants:

- $\text{Be}^7$  pour la dernière année de sédimentation;
- $\text{Cs}^{137}$  pour les 30 à 40 dernières années;
- $\text{Pb}^{210}$  pour les 200 dernières années.

Après une lyophilisation du sédiment, chacun des sous-échantillons de carottes furent placés dans des contenants en aluminium et scellés. Ils furent ensuite analysés au laboratoire de INRS-Eau par le Dr Carignan.

Le comptage des radio-isotopes a été fait à l'aide d'un spectromètre gamma muni d'un détecteur au germanium et d'un correcteur pour l'effet Compton (anneau d'iodure de sodium). Enfin, les données de comptage furent corrigées pour la géométrie et la densité de l'échantillon à l'aide de standards de  $\text{U}^{230}$  provenant d'Energie Atomique du Canada (M. Carignan, communication personnelle).

Le  $\text{Be}^7$  qui est introduit dans le système fluvial via les précipitations, permet d'évaluer les courtes périodes de sédimentation à cause de sa demi-vie de 53.3 jours. Le comptage de ce radio-isotope fut réalisé environ 3 semaines après le prélèvement.

Le  $\text{Cs}^{137}$  est un radionucléide artificiel produit par les centrales nucléaires et par les explosions nucléaires atmosphériques. On note une abondance de ces explosions dans les années 1952-54. Les retombées de  $\text{Cs}^{137}$  furent maximales vers 1962-63 et ne cessent de diminuer depuis (Sérodès, 1978). Afin de calculer le taux de sédimentation, on établit le profil vertical des teneurs en  $\text{Cs}^{137}$  dans le sédiment et on associe l'année 1962 au maximum observé. Le taux de sédimentation ( $\text{SCs}^{137}$ ) est alors défini par l'équation suivante:

$$\text{SCs}^{137} = \frac{\text{Profondeur du maxima en Cs}^{137}}{\text{année du prélèvement (1991) - année du maxima (1962)}}$$

Le  $\text{Pb}^{210}$  est un des produits de désintégration du  $\text{Ra}^{226}$ . Le  $\text{Pb}^{210}$  formé par

cette désintégration est appelé "Pb supporté" (demie-vie de 22.26 ans) et est normalement en équilibre radioactif avec le Ra. Cet équilibre peut être perturbé par différentes sources produisant un apport supplémentaire de  $Pb^{210}$  dans les sédiments. La principale source de  $Pb^{210}$  en excès au " $Pb^{210}$  non-supporté" provient généralement de l'atmosphère (Oldfield and Appleby, 1984). Le profil du  $Pb^{210}$  non-supporté dans une carotte de sédiment est généralement décrit par l'équation suivante (Sherkla and Joshi, 1989)

$$A(x) = A(o) * \exp (-hx/s)$$

soit:

$$\ln A(x) = \ln A(o) - \frac{hx}{s}$$

d'où l'équation du taux de sédimentation (S):

$$SPb^{210} = \frac{hx}{\ln A(o) - \ln A(x)}$$

Dans cette dernière équation

S = Taux de sédimentation en cm/an;

h = Constante de désintégration du  $Pb^{210}$   
soit  $0,693/22.26 \text{ ans} = 0.0311$ ;

x = profondeur en cm;

A(o) = activité du  $Pb^{210}$  non supporté à l'interface eau-sédiment en DPM/g;  
(DPM/g = désintégration par minute par gramme de matériel)

A(x) = activité du  $Pb^{210}$  non supporté à la profondeur x en DPM/g

A partir du taux de sédimentation qui est exprimé en cm/année et de la profondeur x, il est alors facile de calculer l'âge du sédiment (T) et de définir l'année de déposition.



$$T = \frac{X}{S}$$

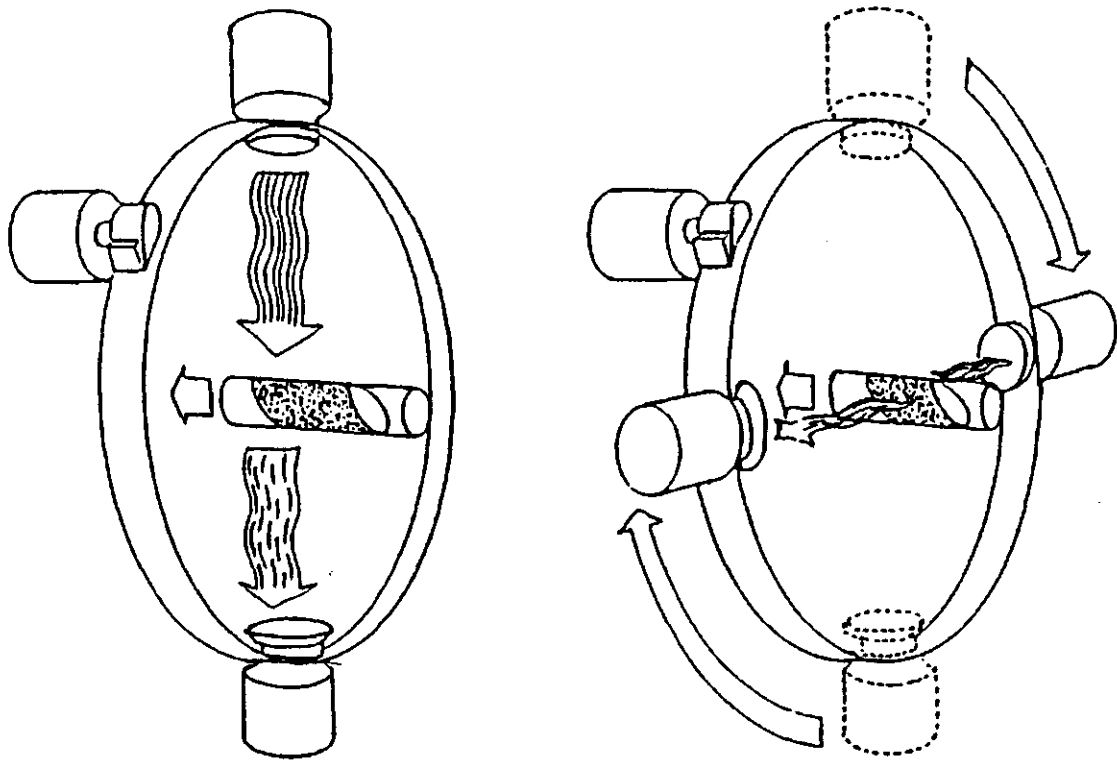
**3.6.4 Analyses tomодensitométriques** - Les carottes ont été analysées à l'aide du tomодensitomètre (CGE) du Centre Hospitalier régional de Rimouski, avec la collaboration des responsables du service de radiologie. Le mode de fonctionnement de l'appareil est relativement simple. Il est basé sur l'absorption des rayons X par la matière. Le tomодensitomètre est composé de deux parties: un anneau qui contient les sources de rayons X (120 Kv, 100 à 200 ma) et les détecteurs électroniques et un lit sur lequel la carotte est posée et dont le déplacement s'effectue avec une précision millimétrique. L'ensemble sources-détecteurs tourne autour de la carotte en obtenant des valeurs de densité du matériel traversé, selon plusieurs angles (figure 3.8 ).

A la fin du mouvement de balayage, l'ordinateur a en mémoire un très grand nombre de mesures correspondant aux différentes densités enregistrées. L'exploitation de ces données nécessite l'application d'algorithmes complexes qui permettent de reconstruire les images. C'est en fait une reconstruction mathématique de la structure du matériel traversé, dans le plan de parcours du faisceau de rayons X.

Deux types d'images sont reconstitués: des sections longitudinales (dans l'axe de la carotte) et des sections transversales (coupes perpendiculaires à l'axe de la carotte).

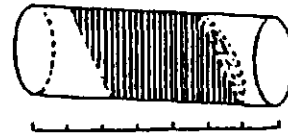
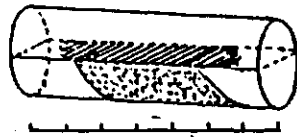
Les valeurs de densité relative qui apparaissent sur les radiographies scanner sont des unités arbitraires, 0 étant la densité de l'eau, -1000 celle de l'air. Pour des carottes de sédiments, les densités enregistrées sont souvent supérieures à +1000 (densité d'un os dense).

Les éléments de densité supérieure apparaissent uniformément blancs et les éléments de densité inférieure, uniformément noirs. Une console permet d'effectuer très rapidement ces réglages, à l'aide d'un curseur, et de choisir l'image qui fait ressortir, avec le plus de précision, les structures et l'hétérogénéité du matériel.



SECTION LONGITUDINALE E-W

SECTION LONGITUDINALE N-S



SECTIONS TRANSVERSALES

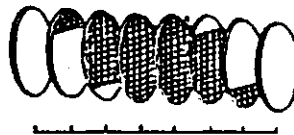


Figure 3.8 Principe d'utilisation du tomodensitomètre pour l'obtention de coupes orientées.

**3.6.5 Contrôle de la qualité** - Le contrôle de la qualité des analyses physiques et chimiques fut réalisé conjointement avec les chimistes du Laboratoire du Capitaine Bernier d'Environnement Canada à Longueuil. L'ensemble des analyses à contrôler fut divisé par groupes analytiques. A chacun de ces groupes furent ajoutés des replicats d'échantillon et/ou de matériaux de référence (tableau 3.5) pour le contrôle de qualité externe. Ensuite en combinant les résultats de ce contrôle de qualité externe avec le contrôle de qualité interne réalisé par le laboratoire sous-traitant, il fut possible d'évaluer la précision et l'exactitude des résultats analytiques.

L'analyse des résultats de contrôle pour les paramètres organiques a montré que la précision analytique sur les BPC était de  $\pm 7,4\%$  et le pourcentage de récupération pour les analyses de HAP était de 47% des valeurs attendues des MRC (tableau 3.6). La reproductivité des résultats analytiques est acceptable pour les BPC et la récupération obtenue sur les MRC de HAP est comparable à celle déjà obtenue dans d'autres projets (Procéan, 1991).

Pour les paramètres inorganiques non-résiduels et totaux, le contrôle de qualité indique que la précision est bonne à excellente pour le Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Al, Fe et Mn et plus faible pour le Li. Dans la majorité des cas, la précision est inférieure à 15% d'écart. Pour l'exactitude, le pourcentage de récupération est supérieur à 75% sauf pour l'aluminium (38%). On peut conclure que les résultats analytiques des paramètres inorganiques sont précis et exacts.

Les résultats détaillés du contrôle de la qualité sont présentés à l'annexe H.

Tableau 3.5 Répartition du contrôle de la qualité des analyses.

Paramètre	Nombre et type d'échantillons	Nombre d'analyses de contrôle	Pourcentage de contrôle (%)
Arsenic	29 (carottes) 25 (bennes)	3 MRC (PACS-1; WQB-1; BCSS-1) 4 replicats	10 16
Métaux non-résiduels (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni)	45 (carottes) 40 (bennes)	6 replicats 4 replicats	13 10
Métaux non-résiduels et digestion ouverte (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Al, Li, Fe, Mn)	5 (bennes)	3 replicats 3 MRC (PASC-1; MESS-1; BCSS-1)	60
Hg, Se, P(t) et P(o)	5 (bennes)	Aucun contrôle	0
BPC	19 (carottes) 10 (bennes)	4 replicats	14
HAP	16 (bennes)	2 MRC (HS3 et HS6)	13
Autres organiques	3 (bennes)	1 replicat	33
Granulométrie	57 (bennes) et	25 replicats	24
COT	48 (carottes)	16 replicats	15
C(t)		3 MRC (MESS-1; PACS-1; BCSS-1) 19 replicats	21

Tableau 3.6 Précision et exactitude analytique des analyses chimiques.

Paramètres	Précision		Exactitude
	Contrôle externe (%)	Contrôle interne (%)	Récupération (%)
<b>Métaux non résiduels</b>			
Cd	6	6	-
Cr	28	9	-
Cu	11	13	-
Ni	8	7	-
Pb	12	22	-
Zn	5	5	-
Al	18	12	-
Fe	4	9	-
Li	124	58	-
Mn	15	4	-
<b>Métaux totaux</b>			
Cd	27	0	-
Cr	11	4	69
Cu	3	7	105
Ni	3	4	89
Pb	12	3	103
Zn	5	10	91
Al	9	8	38
Fe	3	8	77
Li	7	14	-
Mn	2	12	81
As	4	12	102
BPC	7.4	-	-
HAP	-	-	47

### 3.7 **Traitement des données**

3.7.1 **Relevés acoustiques** - L'interprétation des données acoustiques a été effectuée suivant 2 étapes principales:

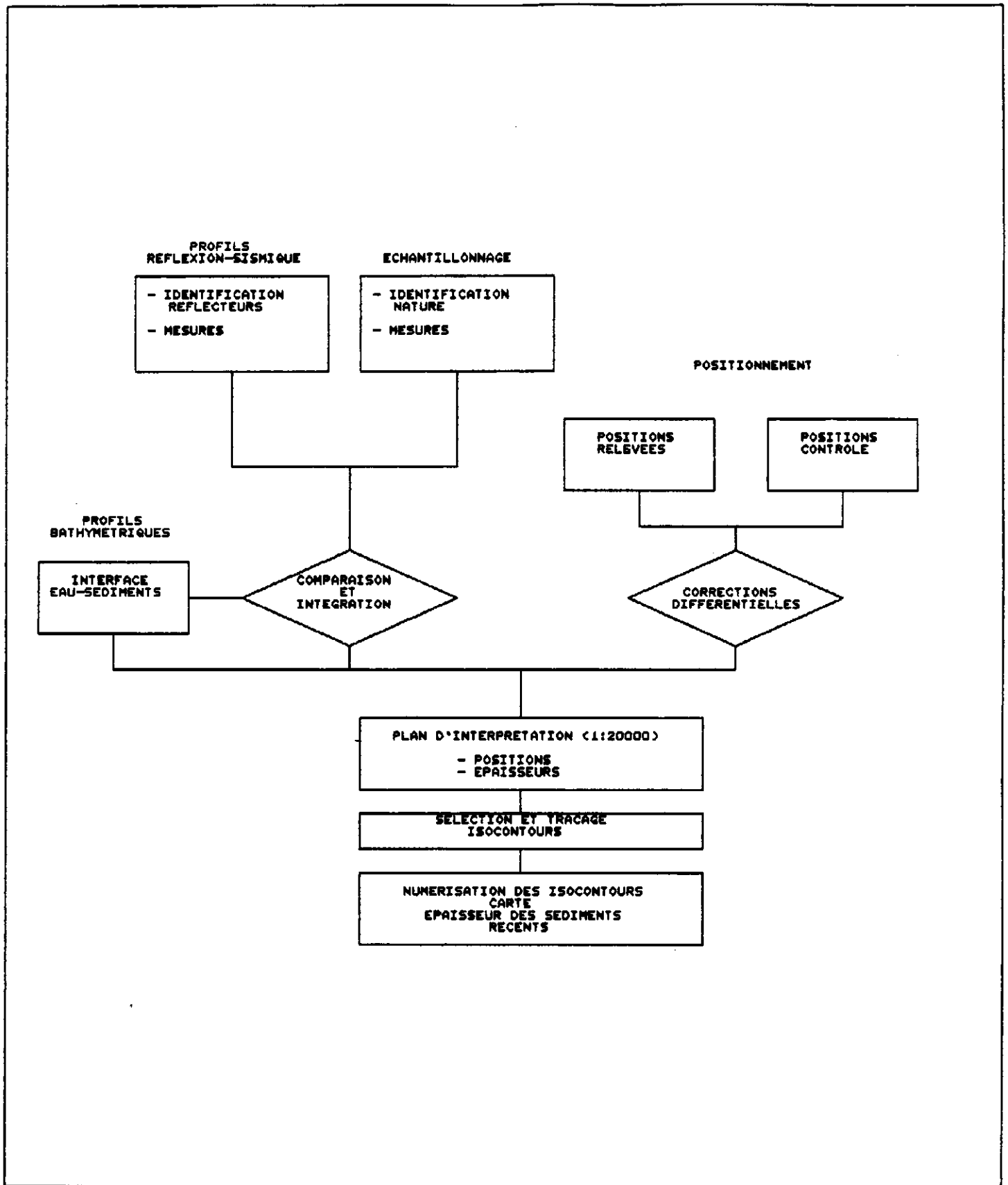
- La première étape consiste à effectuer séparément, pour chaque catégorie d'instrumentation, le dépouillement et l'analyse des enregistrements (profils sismiques, images de sonar latéral et profils bathymétriques).
- La deuxième étape consiste à compiler, intégrer et valider les informations des diverses sources. L'interprétation est transférée sur 2 plans d'interprétation qui sont:
  - . plan d'interprétation de l'épaisseur des sédiments récents;
  - . plan d'interprétation de la texture des sédiments de surface.

Les figures 3.9 et 3.10 présentent les organigrammes de traitement de données acoustiques qui ont servi à produire les plans d'interprétation.

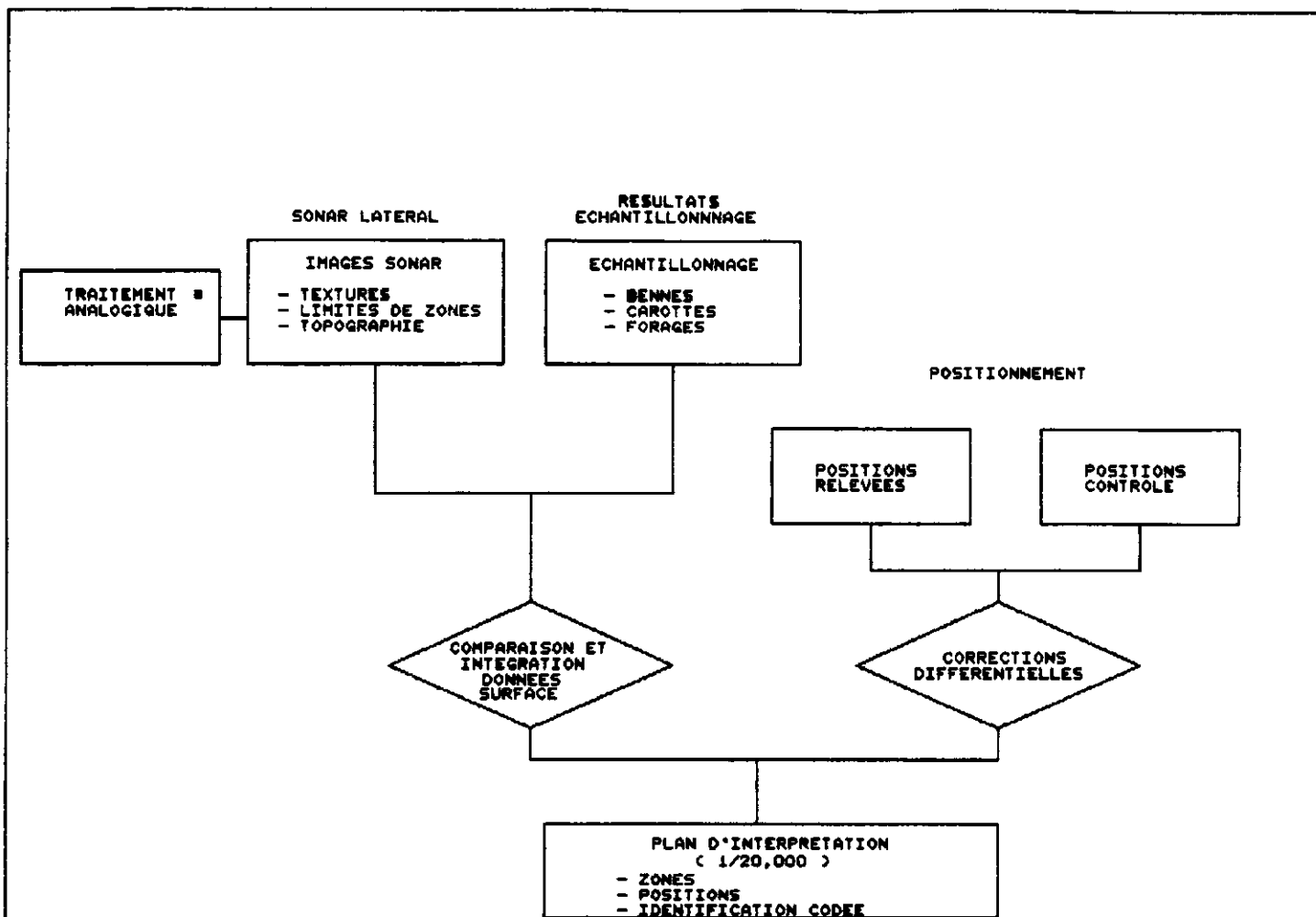
3.7.2 **Résultats analytiques de surface** - Après la validation des résultats analytiques de surface par le contrôle de qualité, les données chimiques ont été traitées dans leur ensemble. Les données ont d'abord été saisies sur micro-ordinateur à l'aide du logiciel Quattro Pro et les coordonnées de positionnement ont été ajoutées aux données analytiques correspondantes.

Le calcul de la moyenne et de l'écart-type de chacun des paramètres a été effectué directement à partir du fichier informatique Quattro Pro et la matrice des coefficients de corrélation de Kendall a été calculé à partir du logiciel Systat.

Les données analytiques et les coordonnées de positionnement ont ensuite été reprises par le Système Geostat International (SGI) afin d'étudier la variabilité spatiale de chaque paramètre. Le logiciel Vario 3 de SGI permet de calculer la portée statistique de chaque paramètre en fonction de sa variabilité dans l'espace. La portée est un paramètre important qui permet de définir l'influence d'un échantillon par rapport à un autre. Ce paramètre est par la suite intégré à la modélisation de chaque paramètre.



3.9 Organigramme de traitement des données acoustiques. Épaisseur des sédiments.



NOTE: LE TRAITEMENT ANALOGIQUE PERMET LORS DE L'ANALYSE DES ENREGISTREMENTS AUDIO-NUMÉRIQUES, D'AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'INFORMATION OBTENUE POUR EN ARRIVER À LA MEILLEURE IDENTIFICATION POSSIBLE. LE TRAITEMENT COMPORTE: VARIATION DE GAIN, FILTRAGE, TRAITEMENT DE SIGNAL EN MONOCHROME, EN IMAGE INVERSÉE, COULEURS ...ETC.

3.10 Organigramme de traitement des données acoustiques. Texture des sédiments de surface.



La modélisation fut réalisée à partir du logiciel SPAN. Ce logiciel permet de modéliser l'ensemble des données pour un paramètre donné et de visualiser cette modélisation à l'écran. La modélisation se fait à partir d'un cône de décroissance des teneurs qui a pour base la distance de la portée. La courbe de décroissance des teneurs le long du cône a une forme parabolique d'une distance focale inférieure à la distance d'échantillonnage. La validation de la modélisation se fait en comparant les teneurs in situ de chaque échantillon avec les teneurs modélisées. La modélisation est acceptée lorsque la correspondance est parfaite. Pour chacun des paramètres, les cartes modélisées sont tracées à l'écran et sur papier. Les classes de teneurs sont définies à partir du niveau 2 des critères de qualité des sédiments (Procéan, 1991). La couleur verte correspond aux teneurs inférieures à  $\frac{1}{2}$  fois le niveau 2 du critère, la couleur bleue correspond aux teneurs comprises entre  $\frac{1}{2}$  et 1 fois le niveau 2; la couleur jaune comprend les teneurs entre le niveau 2 et le niveau 3. Enfin, la couleur rouge englobe toutes les teneurs supérieures au niveau 3 du critère de qualité.

**3.7.3 Résultats analytiques des forages** - Le dépouillement des résultats analytiques des carottes de forage des sédiments se fait après leur validation par le contrôle de qualité des sédiments. Les résultats analytiques sont ensuite saisis sur micro-informatique à l'aide du logiciel Quattro Pro et classés selon la profondeur de prélèvement des échantillons pour chacune des carottes. Ensuite, les profils chimiques, physiques et radio-isotopiques sont dessinés sur un même tableau de manière à pouvoir comparer rapidement et facilement les résultats entre eux. La variation des teneurs le long des profils est interprétée afin d'établir l'épaisseur de sédiments récents contaminés et les teneurs moyennes de contaminants dans ces sédiments récents.

On définit l'épaisseur de sédiments récents contaminés comme la portion supérieure de la carotte où les variations de teneurs chimiques sont plus élevées que la normale géochimique (Sérodès; 1978). Sous cette portion les teneurs chimiques sont généralement constantes et près de leurs limites de détection analytique.

Les teneurs moyennes des contaminants dans le sédiment sont calculées en utilisant l'aire sous les courbes des profils. On obtient alors une moyenne qui tient compte de la variation des teneurs en fonction de l'épaisseur de sédiments.

**3.7.4 Analyse de la dynamique sédimentaire et évaluation des volumes de sédiments contaminés** - L'analyse et l'interprétation sont basées sur l'ensemble des données et des résultats. Cependant les éléments suivants ont été retenus comme étant les principaux éléments à haute valeur interprétative:

- les résultats granulométriques:
  - . le(s) mode(s);
  - . l'indice de tri (méthode des moments);
  - . l'indice d'asymétrie (méthode des moments);
- le contenu en carbone organique total;
- les éléments texturaux et structuraux visibles au sonar à balayage latéral;
- les descriptions stratigraphiques.

L'ensemble de ces informations combinées sur un fond de carte bathymétrique a permis de comprendre la dynamique sédimentaire. Les cartes modélisées à partir du logiciel SPANS n'ont pas été utilisées parce que les contacts dessinés ne reflétaient pas la réalité du milieu.

**3.7.5 Bilan massique** - L'analyse de la nature et de la contamination des carottes ont permis de déterminer le pourcentage moyen des sédiments récents qui montraient des teneurs en contaminants dépassant les teneurs naturelles.

Le bilan massique des contaminants individuels a été déterminé en suivant les étapes suivantes:

- superposition des cartes d'isoépaisseur de sédiments récents et d'isoconcentration d'un contaminant donné, modélisées à partir du logiciel SPANS;

- génération d'une matrice de classe d'isoépaisseur et d'isoconcentration;
- calcul des surfaces par classes;
- calcul de la masse du contaminant par unité de surface utilisant la formule suivante:

$$M = S \times D \times C \times \% \times E$$

ou

M = masse du contaminant (g)

S = surface (m<sup>2</sup>)

D = densité (kg/m<sup>3</sup>)

C = concentration (g/kg)

% = pourcentage des sédiments récents contaminés/sédiments récents totaux (voir section 3.7.3)

E = épaisseur (m)

L'ensemble de ces opérations ont été réalisées sur le logiciel d'analyse spatiale SPANS et le chiffrier Quattro Pro.

## 4. RÉSULTATS

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats caractérisant la nature des sédiments et la contamination associées. Ces deux éléments forment les deux sections principales de ce chapitre. L'interprétation globale et la discussion forme le chapitre suivant (chapitre 5).

### 4.1 Caractérisation sédimentologique

**4.1.1 Description visuelle** - Comme nous l'avons indiqué aux sections 3.4 et 3.6, les échantillons de sédiments de surface recueillis à l'aide de la benne Shipeck furent décrits et analysés pour différents paramètres physiques. La description visuelle des 57 échantillons est présentée au tableau 4.1. Outre la localisation et l'épaisseur de récupération de la benne, on y retrouve une description de la nature du sédiment, des unités sédimentaires observées et de leur épaisseur.

Au cours de l'échantillonnage, nous avons noté la présence d'argile grise compacte sur 13 stations et principalement près des rives de l'île de Montréal. Au dessus de ces argiles, on retrouve généralement des sédiments sableux et/ou graveleux. Au centre du bassin, les sédiments sont surtout composés de boue grise et noire accompagnée de débris coquilliers et de mollusques vivants. L'argile grise est beaucoup plus compacte et correspond possiblement à une origine marine ou glacio-lacustre tandis que la boue grise est beaucoup plus molle et correspond à des sédiments récemment déposés dans le lac Saint-Louis.

TABLEAU 4.1 DESCRIPTIONS VISUELLES DES SÉDIMENTS DE SURFACE.

NO: STATION	ZONE	UTM_EST mètre	UTM_NORD mètre	DATE	HEURE hh:mm	VITESSE DU VENT km/h	DIRECTION DU VENT	NOMBRE D'ESSAIS	PROFONDEUR RÉCUPÉRÉE cm	PROFONDEUR cm	DESCRIPTION	
C 01	11	18	587708	5027879	08/07/91	14: 45	00-05	NO	1	10	00-10	BOUE GRIS FONCÉ AVEC BIVALVES ET PLUS COMPACTE EN PROFONDEUR
C 01	12	18	587813	5028884	08/07/91	14: 45	00-05	NO	1	10	00-01	BOUE GRISE AVEC BIVALVES ET MACROPHYTES
C 01	13	18	587845	5025835	08/07/91	15: 15	00-05	NO	2	8	01-10	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 01	A1	18	588181	5027423	10/07/91		10-15	NO	2	8	00-02	BOUE GRISE
C 01	A2	18	588204	5028383	10/07/91		10-15	NO	1	10	02-07	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 02	21	18	588808	5029057	08/07/91	13: 45	00-05	NO	1	10	07-08	ARGILE GRISE COMPACTE
C 02	22	18	588880	5028181	08/07/91	13: 20	00-05	NO	1	10	00-01	BOUE GRISE LIQUIDE
C 02	23	18	588735	5027137	08/07/91	13: 00	00-05	NO	1	15	01-04	BOUE NOIRE SEMI-LIQUIDE
C 02	24	18	588819	5028178	08/07/91	12: 20	00-05	NO	3	3	04-08	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 02	A1	18	588908	5028840	10/07/91		10-15	NO	3	3	00-01	BOUE GRISE AVEC MACROPHYTE
C 02	A2	18	588973	5028583	10/07/91		10-15	NO	1	12	01-10	BOUE NOIRE AVEC BIVALVES
C 02	A3	18	589124	5027572	10/07/91		10-15	NO	1	10	00-10	BOUE GRIS FONCÉ
C 02	A4	18	589150	5028857	10/07/91		10-15	NO	2	5	00-04	BOUE GRISE AVEC DE GROS GASTÉROPODES
C 03	31	18	589480	5030187	08/07/91	08: 50	00-05	NO	3	5	04-08	SABLE ET GRAVIER
C 03	32	18	589558	5029175	08/07/91	10: 30	00-05	NO	1	12	08-10	ARGILE GRISE COMPACTE
C 03	33	18	589848	5028153	08/07/91	11: 25	00-05	NO	2	8	00-01	BOUE GRISE LIQUIDE
C 03	34	18	589723	5027157	08/07/91	11: 28	00-05	NO	2	8	01-15	BOUE NOIRE AVEC QUELQUES COQUILLES
C 03	A1	18	589843	5028884	10/07/91		05-10	NO	4	4	00-03	SABLE BOUEUX
C 03	A4	18	590110	5028820	10/07/91		05-10	NO	3	3	00-02	SABLE ET GRAVIER
C 04	41	18	589488	5030283	05/07/91	18: 45	10-15	NO	2	7	02-03	ARGILE GRISE COMPACTE
C 04	42	18	589580	5028381	05/07/91	15: 55	10-15	NO	1	10	00-01	BOUE GRISE AVEC MACROPHYTE
C 04	43	18	589588	5028371	05/07/91	15: 25	10-15	NO	1	15	01-10	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 04	44	18	589714	5027381	08/07/91	16: 00	00-05	NO	2	6	01-12	BOUE NOIRE AVEC PETITS LITS DE BOUE GRISE - BEAUCOUP DE BIVALVES
C 04	A1	18	589832	5030012	08/07/91		25-30	NO	4	3	00-02	BOUE GRISE LIQUIDE
C 04	A2	18	589888	5028880	08/07/91		25-30	NO	1	15	01-05	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 04	A3	18	5891052	5028101	08/07/91		15-20	NO	1	10	05-08	SABLE ET GRAVIER GRIS
C 05	51	18	5891484	5030888	05/07/91	10: 45	10-15	NO	3	5	00-01	BOUE GRISE LIQUIDE
											00-01	SABLE ET GRAVIER
											01-04	ARGILE GRISE COMPACTE
											00-12	BOUE GRISE AVEC MACROPHYTE
											12-15	BOUE NOIRE
											00-03	BOUE GRISE AVEC COQUILLES ET MACROPHYTES
											04-07	SABLE ET GRAVIER GRIS
											00-02	ARGILE GRISE COMPACTE
											02-10	BOUE GRISE LIQUIDE
											00-02	BOUE GRISE AVEC LITAGE DE BOUE NOIRE
											02-15	BOUE GRISE LIQUIDE
											02-02	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE AVEC PETITES COQUILLES
											02-08	BOUE GRISE LIQUIDE
											00-01	BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
											01-03	BOUE SABLEUSE DE COULEUR GRIS
											00-08	ARGILE GRISE COMPACTE
											08-15	BOUE GRISE SEMI-LIQUIDE
											01-10	BOUE NOIRE
											00-05	BOUE GRISE AVEC MACROPHYTE
											00-05	ARGILE COMPACTE ET STRATIFIÉE + TACHES DE ROUILLE

TABLEAU 4.1 DESCRIPTIONS VISUELLES DES SÉDIMENTS DE SURFACE (SUITE).

NO. STATION	ZONE	UTM_EST mètre	UTM_NORD mètre	DATE	HEURE hh:mm	VITESSE DU VENT km/h	DIRECTION DU VENT	NOMBRE D'ESSAI	PROFONDEUR RÉCUPÉRÉE cm	PROFONDEUR cm	DESCRIPTION
C 05	52	18	501532	5029888	06/07/91	12: 45	10-15	NO	1	10	00-06 BOUE GRISE LIQUIDE 05-07 BOUE NOIRE PLUS COMPACTE AVEC 5 A 10% DE GASTÉROPODES 07-10 BOUE NOIRE COMPACTE AVEC BIVALVES
C 05	53	18	501825	5028676	06/07/91	13: 20	10-15	NO	1	10	00-10 BOUE NOIRE AVEC MACROPHYTES
C 05	54	18	501880	5027718	06/07/91	14: 00	10-15	NO	1	10	00-10 BOUE NOIRE AVEC GASTÉROPODES ET MACROPHYTES
C 05	A1	18	501922	5030277	09/07/91		15-20	NO	2	3	00-03 SABLE ET GRAVIER AVEC BIVALVES
C 05	A2	18	502019	5029386	09/07/91		15-20	NO	1	15	00-02 BOUE GRISE SEMI-LIQUIDE 02-15 BOUE NOIRE AVEC 10% COQUILLES
C 05	A3	18	502078	5028528	09/07/91		15-20	NO	1	15	00-01 BOUE GRISE SEMI-LIQUIDE 01-15 BOUE NOIRE AVEC COQUILLES ET *** ODEUR DE PETROLE ***
C 08	81	18	502429	5030872	07/07/91	09: 45	00-05	NO	7	3	00-01 SABLE ET GRAVIER 01-03 ARGILE GRISE COMPACTE
C 08	82	18	502538	5029888	07/07/91	10: 30	00-05	NO	1	10	00-02 BOUE GRISE LIQUIDE 02-09 BOUE NOIRE AVEC BEAUCOUP DE COQUILLES 09-10 ARGILE GRISE COMPACTE
C 08	83	18	502582	5028771	07/07/91	11: 05	00-05	NO	1	10	00-01 BOUE GRISE AVEC UN PEU DE COQUILLES 01-10 BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 08	A1	18	502911	5030513	10/07/91		10-15	NO	2	4	00-03 SABLE ET GRAVIER AVEC COQUILLES 03-04 ARGILE GRISE COMPACTE
C 08	A2	18	502908	5029435	10/07/91		10-15	NO	1	10	00-01 BOUE GRISE 01-08 BOUE NOIRE SEMI-LIQUIDE 06-10 BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 07	71	18	503443	5031087	08/07/91	17: 30	00-05	NO	6	0	00-00 GRAVIER - GROS CAILLOUX DE 20 CM - PAS D'ÉCHANTILLON
C 07	72	18	503528	5029885	08/07/91	17: 10	00-05	NO	1	10	00-02 BOUE GRISE LIQUIDE AVEC COQUILLES 02-10 BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 07	A1	18	503887	5030780	10/07/91		10-15	NO	1	12	00-02 BOUE GRISE AVEC 25% COQUILLES 02-12 BOUE NOIRE PLUS COMPACTE
C 07	A2	18	504017	5029777	10/07/91		10-15	NO	2	10	00-01 BOUE GRISE 01-09 BOUE NOIRE AVEC 25% COQUILLES 09-10 ARGILE GRISE COMPACTE
C 08	81	18	504322	5032717	07/07/91	13: 15	00-05	NO	3	8	00-08 BOUE SABLEUSE GRISE AVEC BEAUCOUP D'ALGUES
C 08	82	18	504378	5032082	07/07/91	12: 58	00-05	NO	1	10	00-10 BOUE GRISE SEMI-LIQUIDE
C 08	83	18	504429	5031108	07/07/91	11: 50	00-05	NO	2	5	00-05 SABLE AVEC COQUILLES
C 08	84	18	504541	5030012	07/07/91	12: 20	00-05	NO	1	10	00-02 BOUE GRISE LIQUIDE 02-10 BOUE NOIRE AVEC COQUILLES
C 08	A2	18	504801	5031874	10/07/91		10-15	NO	3	4	00-04 SABLE ET GRAVIER AVEC MACROPHYTES
C 08	A3	18	504899	5030543	10/07/91		10-15	NO	3	3	00-03 SABLE FIN GRIS A NOIR AVEC 50% COQUILLES ET AVEC MACROPHYTES
C 09	91	18	505331	5032817	07/07/91	14: 15	05-10	NO	10	2	00-02 SABLE ET GRAVIER AVEC MACROPHYTE
C 09	92	18	505371	5032138	07/07/91	15: 00	05-10	NO	2	6	00-08 SABLE ET GRAVIER
C 09	93	18	505409	5031128	07/07/91	18: 00	10-15	NO	8	6	00-08 BOUE NOIRE AVEC 95% DE COQUILLES
C 10	101	18	508382	5031158	08/07/91	10: 30	05-10	NO	2	7	00-07 BOUE NOIRE AVEC 95% DE COQUILLES
C 11	111	18	507417	5031797	08/07/91	11: 15	05-10	NO	3	4	00-02 SABLE ET GRAVIER 02-04 ARGILE GRISE COMPACTE
C 11	112	18	507427	5031293	08/07/91	11: 30	05-10	NO	3	6	00-08 SABLE ET GRAVIER AVEC 70% DE COQUILLES
C 12	121	18	508435	5031798	08/07/91	13: 35	05-10	NO	2	3	00-03 SABLE ET GRAVIER
C 14	141	18	508399	5031844	08/07/91	14: 15	10-15	NO	8	0	00-00 POSSIBLEMENT SUR UN AFFLEUREMENT - PAS D'ÉCHANTILLON
C 1A	01	18	504755	5032819	07/07/91	13: 40	00-05	NO	2	8	00-08 BOUE SABLEUSE GRISE AVEC BEAUCOUP D'ALGUES
C 1B	01	18	507919	5031894	08/07/91	12: 30	05-10	NO	3	0	00-00 GRAVIER ET GROS CAILLOUX - PAS D'ÉCHANTILLON
C 1B	02	18	507900	5031787	08/07/91	13: 15	05-10	NO	3	4	00-04 SABLE BOUEUX GRIS

**4.1.2 Granulométrie** - Les résultats analytiques détaillés sont présentés à l'annexe I. La granulométrie globale des 57 échantillons de sédiments de surface est présentée à la figure 4.1 sur un diagramme ternaire. Ce diagramme ternaire s'inspire des classifications de Folk (1974) et Shepard (1954). Il a été modifié (Procéan, 1990) de façon à pouvoir être calculé facilement par le support informatique. Les résultats présentés sur ce diagramme montrent que la granulométrie des sédiments varie du sable et gravier jusqu'à l'argile. Cependant trois (3) regroupements de points apparaissent:

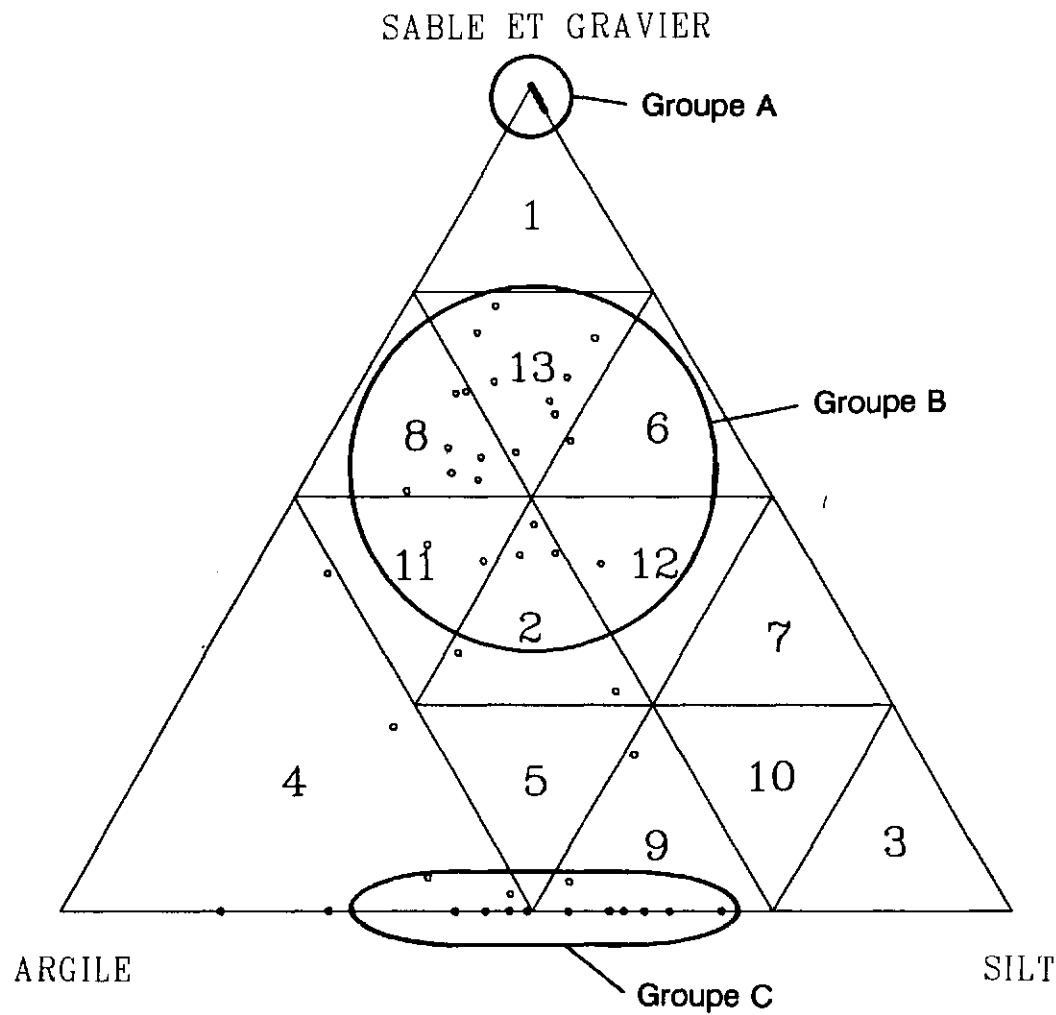
- Groupe A: sédiments composés à plus de 95% de sable et de gravier
- Groupe B: sédiments comportant 40 à 75% de sable dans une matrice composée à part égale de silt et d'argile
- Groupe C: sédiments composés à plus de 90% de silt et d'argile

Les autres points situés en dehors de ces groupes peuvent être le résultat du mélange de deux de ces groupes ou comme dans le cas des deux échantillons très argileux, être d'origine ancienne (argile post-glaciaire de la mer de Champlain).

Les figures 4.2 et 4.4 présentent la répartition spatiale des différentes fractions granulométriques (sable et gravier, silt et argile). En combinant les informations visuelles, le diagramme ternaire et la répartition spatiale des fractions granulométriques, on peut considérer que la zone d'accumulation des sédiments fins se situe au centre de la zone d'étude-pilote et qu'elle est allongée parallèlement à la rive de l'île de Montréal entre la baie de Valois et l'île Perrot. Cette zone d'accumulation est principalement composée d'une boue grise et noire de nature silteuse et argileuse.

A proximité des berges on retrouve des dépôts de sable et gravier provenant des dépôts terrestres introduits dans le milieu aquatique par l'action des vagues et du ruissellement. Ces sables et graviers reposent sur des argiles marines possiblement d'âge quaternaire.

Lorsque l'on compare les cartes granulométriques de l'étude-pilote (figure 4.2 à 4.4) avec celles produites par Rukavina *et al* (1990) on constate que la répartition granulométrique est pratiquement similaire. On doit toutefois souligner que les deux



◦ Echantillon de sédiment

- 1 -SABLE ET GRAVIER
- 2 -SABLE ET BOUE
- 3 -SILT
- 4 -ARGILE
- 5 -SILT ET ARGILE
- 6 -SABLE SILTEUX
- 7 -SILT SABLEUX
- 8 -SABLE ARGILEUX
- 9 -SILT ARGILEUX
- 10-SILT SABLO-ARGILEUX
- 11-SABLE ET ARGILE
- 12-SABLE ET SILT
- 13-SABLE BOUEUX

\* Selon Procéan, 1990

4.1 Diagramme ternaire des fractions granulométriques des sédiments de surface



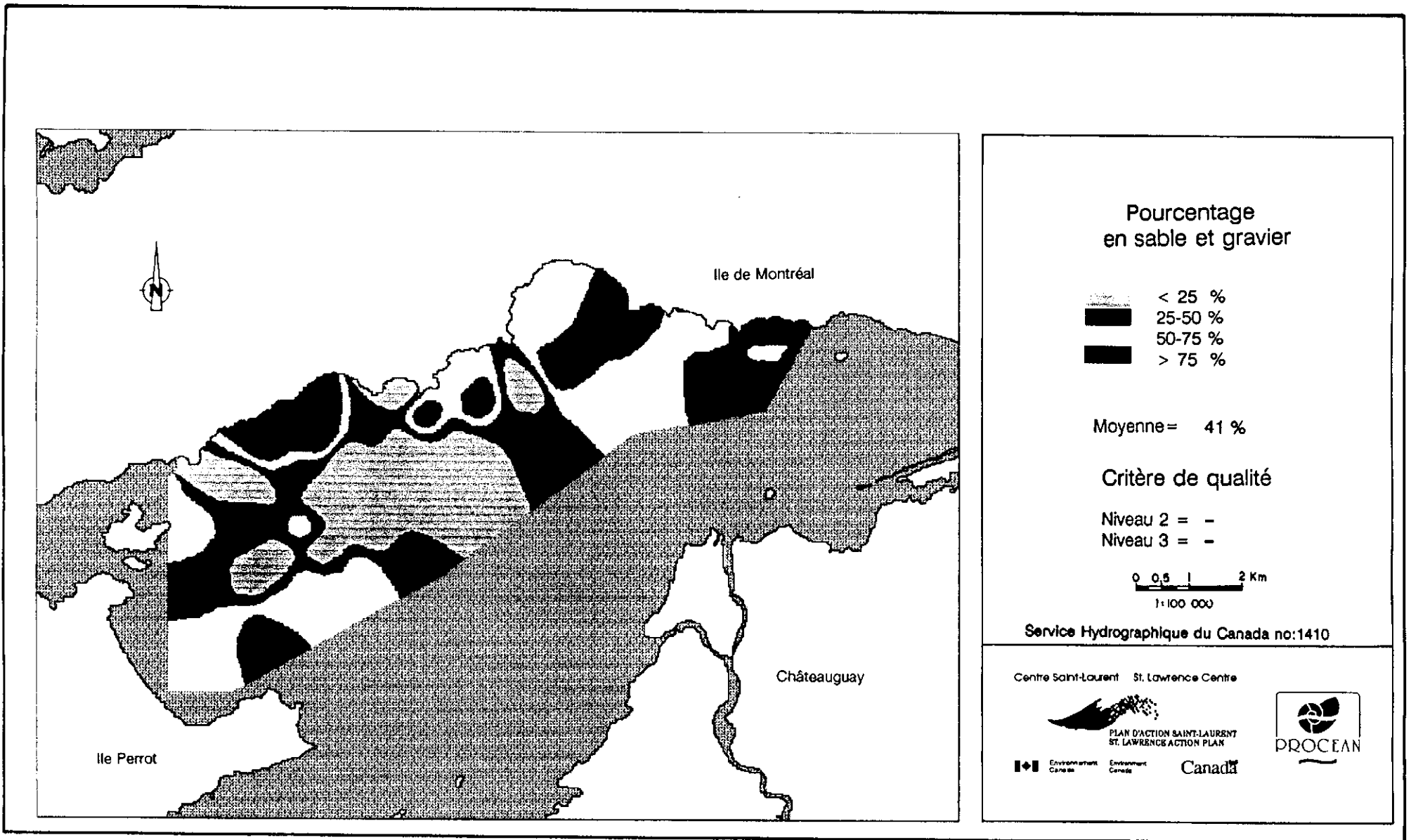


Figure 4.2 Concentration en sable et gravier des sédiments de surface

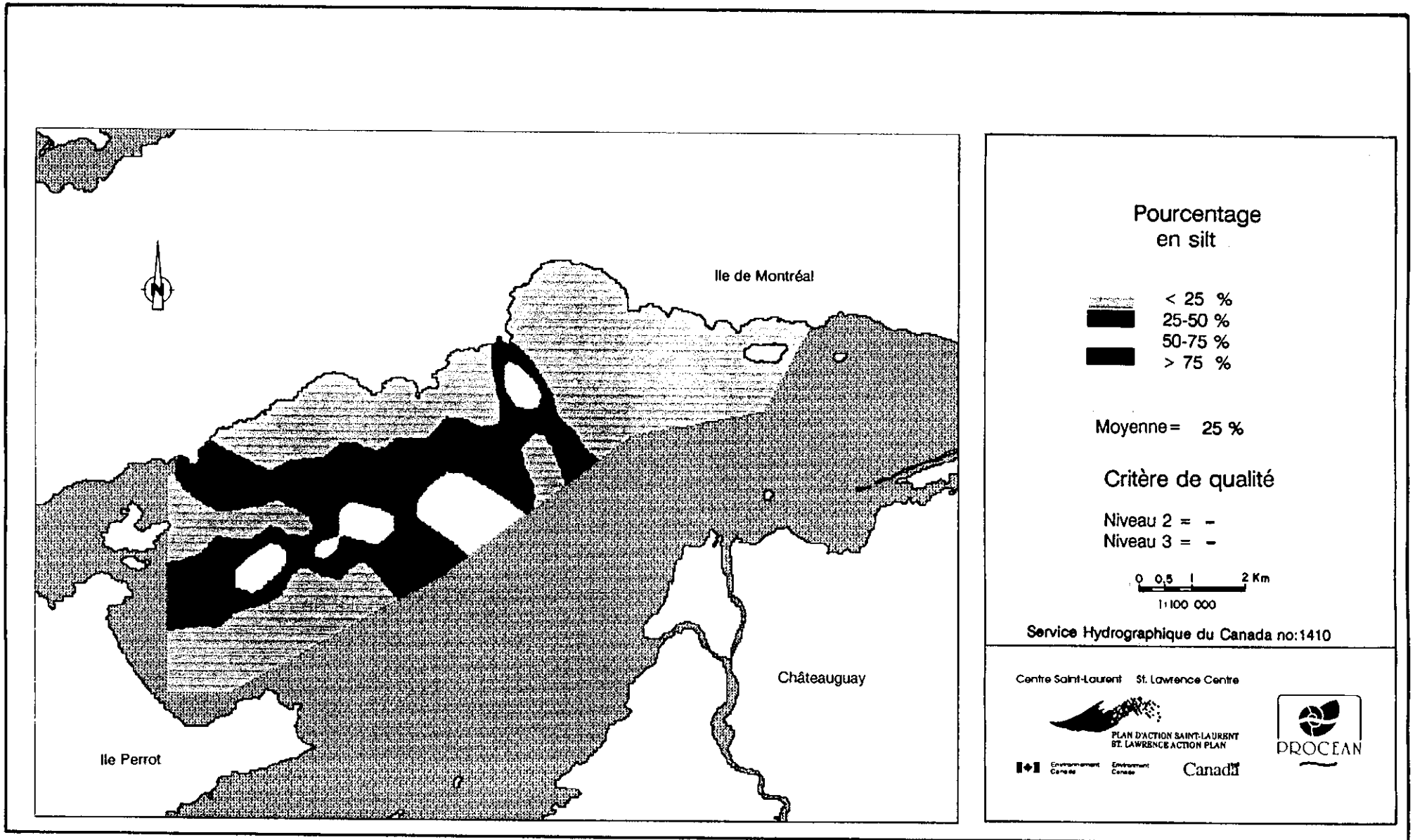


Figure 4.3 Concentration en silt des sédiments de surface

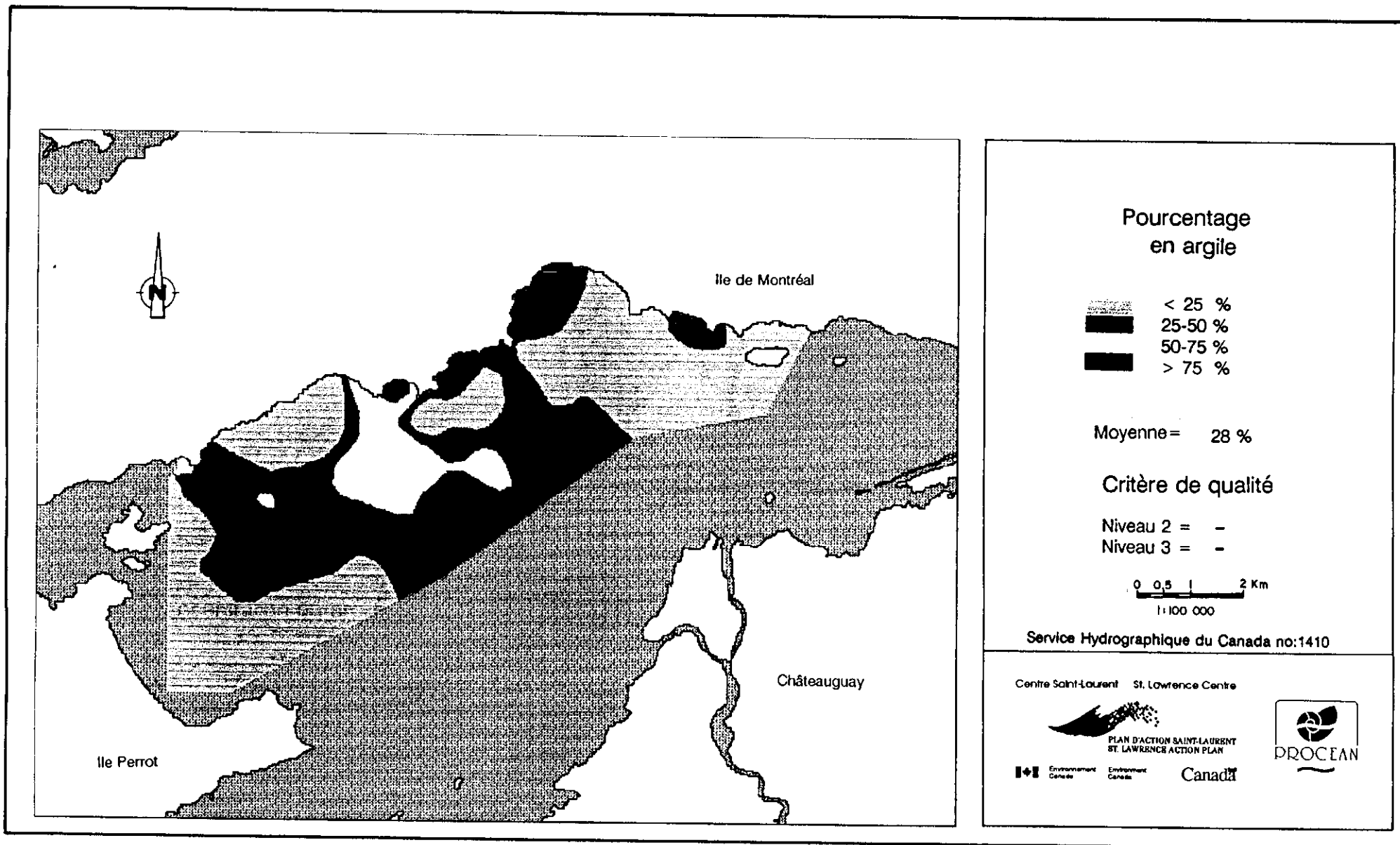


Figure 4.4 Concentration en argile des sédiments de surface

zones de sédiments fins identifiées par Rukavina *et al* (1990) forment en réalité une seule zone très allongée sur plus de 7 km.

La carte 4 (en pochette) présente l'ensemble des histogrammes de fréquence granulométrique pour chacun des échantillons de surface. L'étude des différentes populations granulométriques et des modes associés met en relief les points suivants:

- les modes sablo-graveleux varient de -3,0 phi (cailloux) à 4,0 phi (sable très fin);
- le sable très fin (phi = 3,0-4,0) est un mode particulièrement important dans la partie sud-ouest de la zone d'étude;
- les modes sablo-graveleux dominent la partie nord et est de la zone d'étude;
- la partie centrale de la zone d'étude est caractérisée par des sédiments boueux dont le mode principal s'affine vers le nord passant de 5,0 phi (silt) à 8,5 phi (argile);
- certains échantillons décrits sur le terrain comme un argile compact présente un mode très fin (phi > 10.5); cette argile correspond aux dépôts post-glaciaires d'origine marine et/ou lacustre;
- certains échantillons montrent clairement l'existence de deux populations différentes; cette situation est confirmée par la description visuelle qui indique un mélange de deux strates superposées (indiquées par un xx sur la carte).

Ces différentes courbes granulométriques peuvent se regrouper en faciès sédimentaires:

- les faciès sableux et sablo-graveleux entourant la partie centrale plus fine;
- les faciès de sable boueux visibles dans la baie de Valois et à la limite des faciès sableux et boueux;

- les faciès boueux formant le centre ouest de la zone d'étude; cette boue ne contient pas de sable;
- le faciès argileux relique puisqu'il correspond à des conditions hydrodynamiques marines visibles surtout dans la partie nord et à l'extrême ouest et sud-ouest; il est habituellement mélangé avec le sable sus-jacent.

Les données statistiques (indice de tri et d'asymétrie) n'ont pas été utilisées à cause du trop grand nombre de distributions bimodales qui ont pour effet de biaiser les résultats statistiques (Pelletier, 1982).

**4.1.3 Carbone organique total** - La distribution des concentrations en carbone organique total est présentée sur la figure 4.5. Celle-ci varie de moins de 0,5% à plus de 5%. Généralement la teneur en carbone organique total montre une bonne correspondance avec la distribution des sédiments constitués de silt et argile. La seule exception se retrouve dans la partie nord où la concentration minimale a été enregistrée (.44%). A cet endroit l'échantillon était composé d'argile compact d'origine post-glaciaire dont le mode granulométrique se situait à 10.5-11.0 phi.

**4.1.4 Teneur en eau et densité** - Les répartitions spatiales des teneurs en eau et de la densité sont présentées aux figures 4.6 et 4.7. A cause de la méthode de calcul de la densité (section 3.6.1) ces deux paramètres sont inversement proportionnels et présentent une répartition spatiale très différente. De ce fait, les densités élevées ( $> 1,8\text{g/cm}^3$ ) correspondent à des sédiments ayant une faible quantité d'eau ( $< 40\%$ ) et une granulométrie plus grossière tandis que les faibles densités ( $< 1,5\text{g/cm}^3$ ) sont associées aux sédiments boueux contenant une forte quantité d'eau ( $> 60\%$ ). La teneur en eau varie d'un minimum à 18 % jusqu'à un maximum à 63 %. La teneur moyenne est de 42 %. La densité varie de 1.29 à  $2.30\text{g/cm}^3$  avec une moyenne de  $1.65\text{g/cm}^2$ .

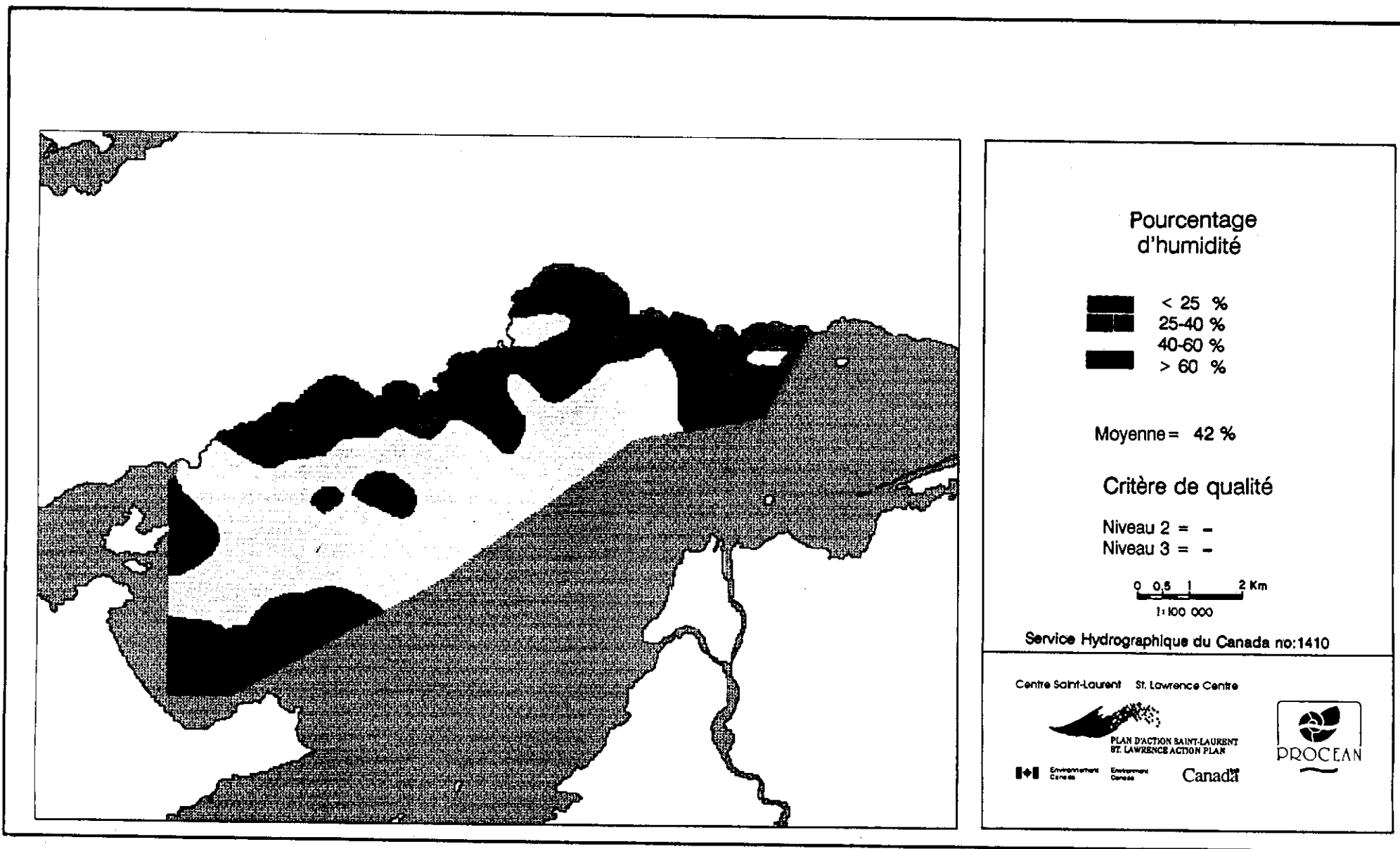
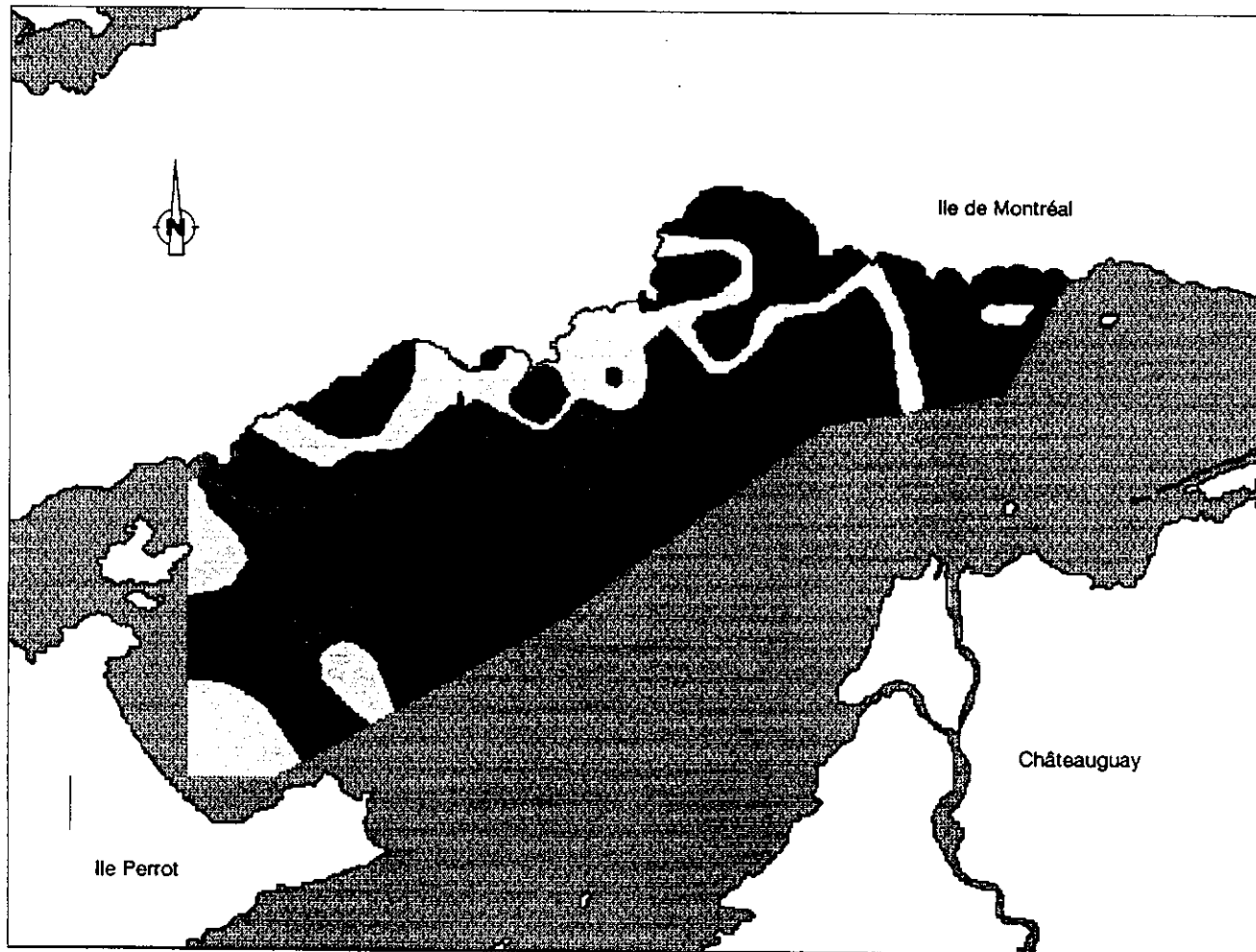


Figure 4.6 Teneur en eau des sédiments de surface



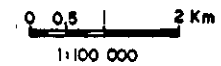
Densité  
du sédiment

- $< 1.5 \text{ g/cm}^3$
- $1.5-1.7 \text{ g/cm}^3$
- $1.7-1.9 \text{ g/cm}^3$
- $> 1.9 \text{ g/cm}^3$

Moyenne =  $1.65 \text{ g/cm}^3$

Critère de qualité

Niveau 2 = -  
Niveau 3 = -



Service Hydrographique du Canada no:1410

Centre Saint-Laurent St. Lawrence Centre



PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT  
ST. LAWRENCE ACTION PLAN



Environnement  
Canada

Canada



Environnement  
Canada

Canada



Environnement  
Canada

Canada



Environnement  
Canada

Canada

Figure 4.7 Densité des sédiments de surface

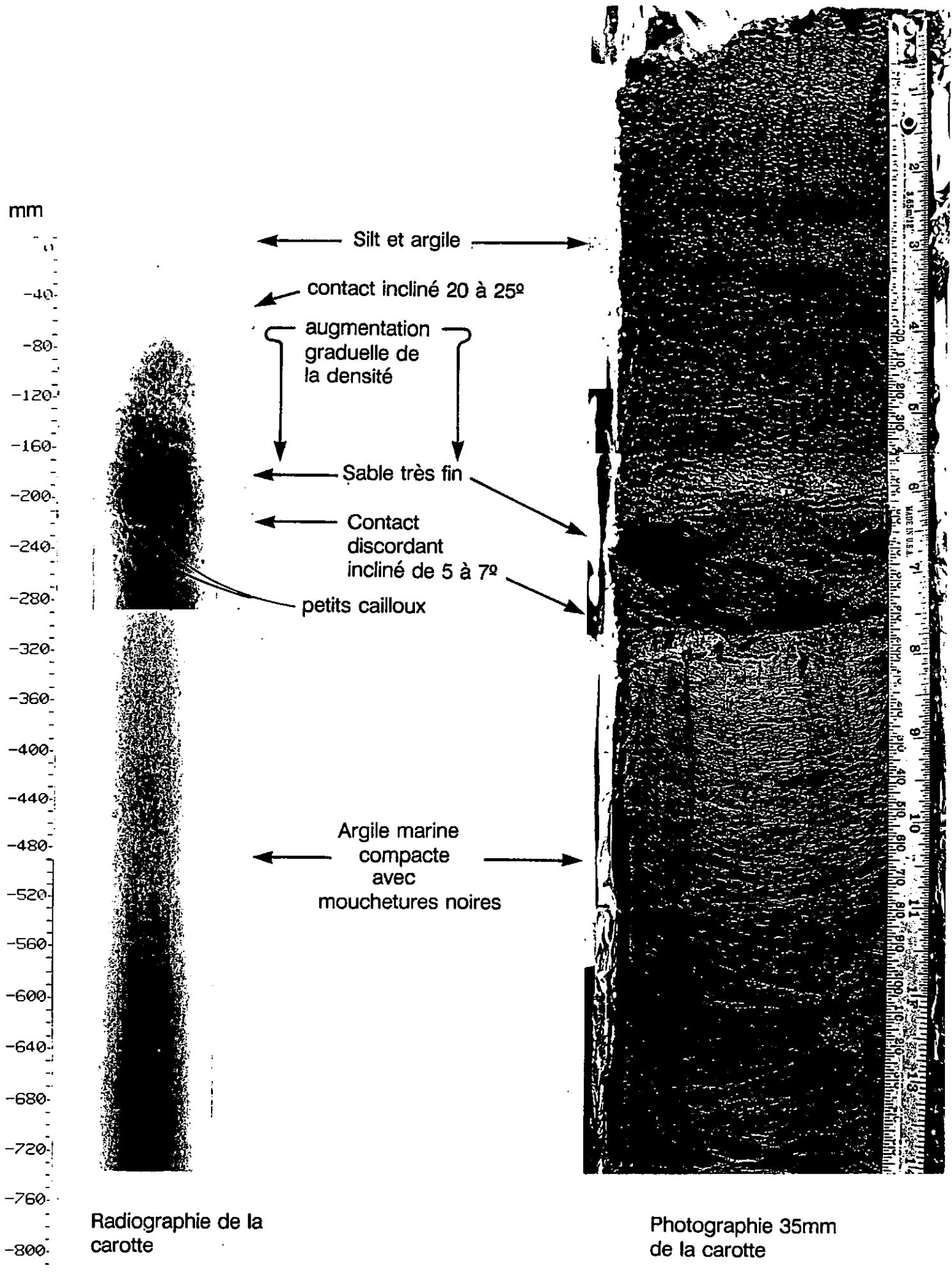




Figure 4.9 Radiographie et photographie de la carotte F5-C

Photographie 35 m

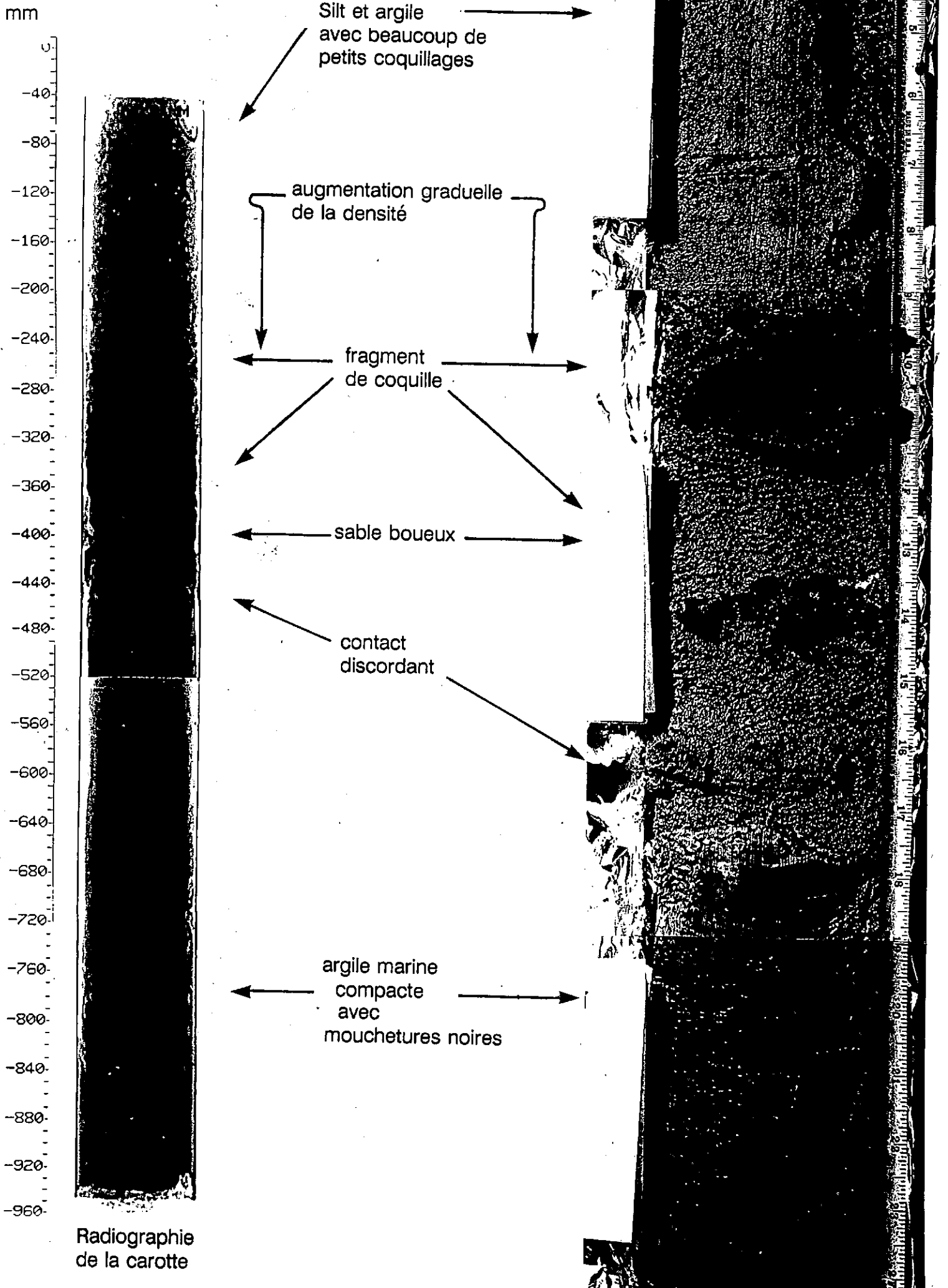
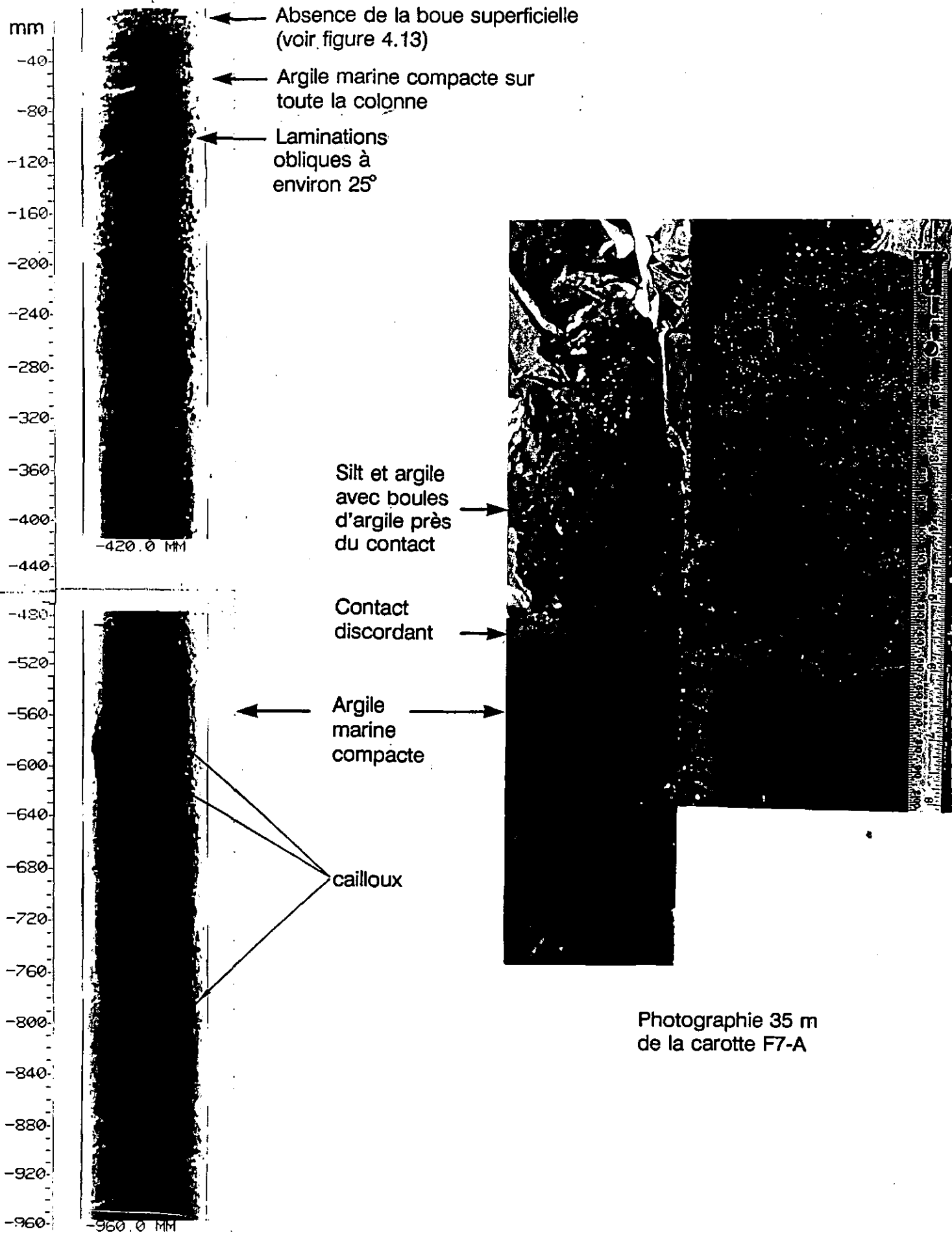


Figure 4.10

Radiographie et photographie des carottes F7-A et F7-C



Radiographie de la carotte F7-C

**4.1.5 Distribution spatiale** - La carte 5 présente la distribution spatiale des différentes textures du sédiment de la zone d'étude. Cette carte a été dressée à partir d'une synthèse de l'information existante sur les sédiments de surface (section 3.7.4). Les contacts ont été interprétés à partir de l'analyse des relevés au sonar à balayage latéral, de la description visuelle des échantillons prélevés et des analyses physiques des échantillons.

Les différentes unités cartographiées font référence aux classes granulométriques présentées sur le diagramme ternaire. Celles-ci sont présentées individuellement:

#### Silt et argile

Cette unité comprend les classes 4 et 9 du diagramme ternaire. Elle correspond aux boues molles tapissant la sortie du chenal situé au nord de l'île Dowker et les zones profondes (généralement supérieures à 3,5 m). Cette unité peut être subdivisée en deux sous-unités, la première plus argileuse se retrouve dans la partie nord-ouest alors que la deuxième à dominance de silt se retrouve au sud et à l'extrême est. Cette unité est caractérisée par un contenu en carbone organique total supérieur à 3%.

#### Argile silteuse compacte

Cette unité est visible en périphérie de la zone d'étude. Elle est généralement recouverte de sable à l'exception d'un affleurement situé dans la partie centre-nord de la zone d'étude. Cette argile est compacte et cohésive et se différencie facilement de l'unité de silt et argile qui est beaucoup plus molle. Elle est très pauvre en carbone organique total (< .5%). Cette unité serait d'origine post-glaciaire.

#### Sable et gravier

Cette unité est constituée à plus de 95% de sable et gravier (classe 1). Elle caractérise les fonds de la partie nord de la zone de la profondeur de 3 m jusqu'à la rive.

#### Sable boueux

Cette unité comprend principalement la classe 13 mais aussi certains échantillons des classes 6 et 8. Cette unité est distribuée sur toute la partie sud, ouest et est de la zone d'étude.

#### Boue sableuse

Cette unité regroupe les classes 2, 11 et 12 et caractérise la zone profonde de la baie de Valois et la partie ouest entre le faciès silt et argile et le faciès sable boueux.

#### Zone remaniée

Cette unité comprend plusieurs échantillons de granulométrie hétérogène caractérisant la zone de dépôts de déblais de dragage située dans la partie sud-est de la zone d'étude et indiquée sur la carte hydrographique (carte no 1410).

#### Affleurements rocheux

Les affleurements rocheux caractérisent la partie sud-est de la zone d'étude. Seul les affleurements visibles sur les enregistrements du sonar latéral ont été cartographiés. Cependant, il est possible qu'il existe d'autres affleurements rocheux sous une mince couche de sédiments.

La couverture de macrophytes lors des relevés acoustiques était particulièrement importante. Plus de 50% de la zone d'étude était recouverte par des macrophytes ce qui a rendu l'interprétation très difficile.

La partie nord près de la rive présentait une topographie irrégulière apparentée à une surface d'érosion (Annexe J). Celle-ci se serait développée sur les argiles compactes d'origine post-glaciaire.

La zone remaniée est aussi caractérisée par une topographie irrégulière formée de monticules et dépressions et d'affleurements rocheux. Cependant, cette topographie est causée principalement par le dépôt de déblais de dragage de la voie maritime du Saint-Laurent.

**4.1.6 Stratigraphie des carottes** - Au total trois carottes de sédiments (F3A, F5C et F7C) furent radiographiées à l'aide d'un tomodynamomètre. Ces carottes furent également photographiées lors de leur extrusion, à l'aide d'une caméra 35 mm et d'un éclairage artificiel de couleur blanche. Les radiographies et les photographies sont présentées aux figures 4.8 à 4.10. En marge de ces photographies nous avons indiqué les principales observations tomodynamométriques et visuelles. Les flèches indiquent la position et la présence de l'observation. Notons que la radiographie de la carotte F7-C ne présentait pas d'unité surmontant les argiles marines et que nous avons présenté la photographie de la carotte F7-A afin de compléter l'information manquante. Les figures 4.11 à 4.13 présentent les descriptions visuelles pour chacune des carottes prélevées dans le bassin de la zone d'étude-pilote. Les unités stratigraphiques de chacune des stations y sont corrélées et décrites pour l'ensemble des carottes de chaque station.

En somme, les informations recueillies et présentées montrent qu'il existe trois unités stratigraphiques dans le bassin de sédimentation:

- 1- Unité de silt et argile superficielle de couleur grise à noire contenant des fragments de coquilles et des végétaux. Cette unité est généralement dépourvue de laminations ou de structures particulières. Seule la carotte F7-C présente des laminations. Cependant, l'attitude de ces structures suggère qu'ils sont d'origine anthropique (déblais de dragage);
- 2- Unité de sable très fin silteux de couleur gris brunâtre plus compact contenant quelques débris de coquilles;

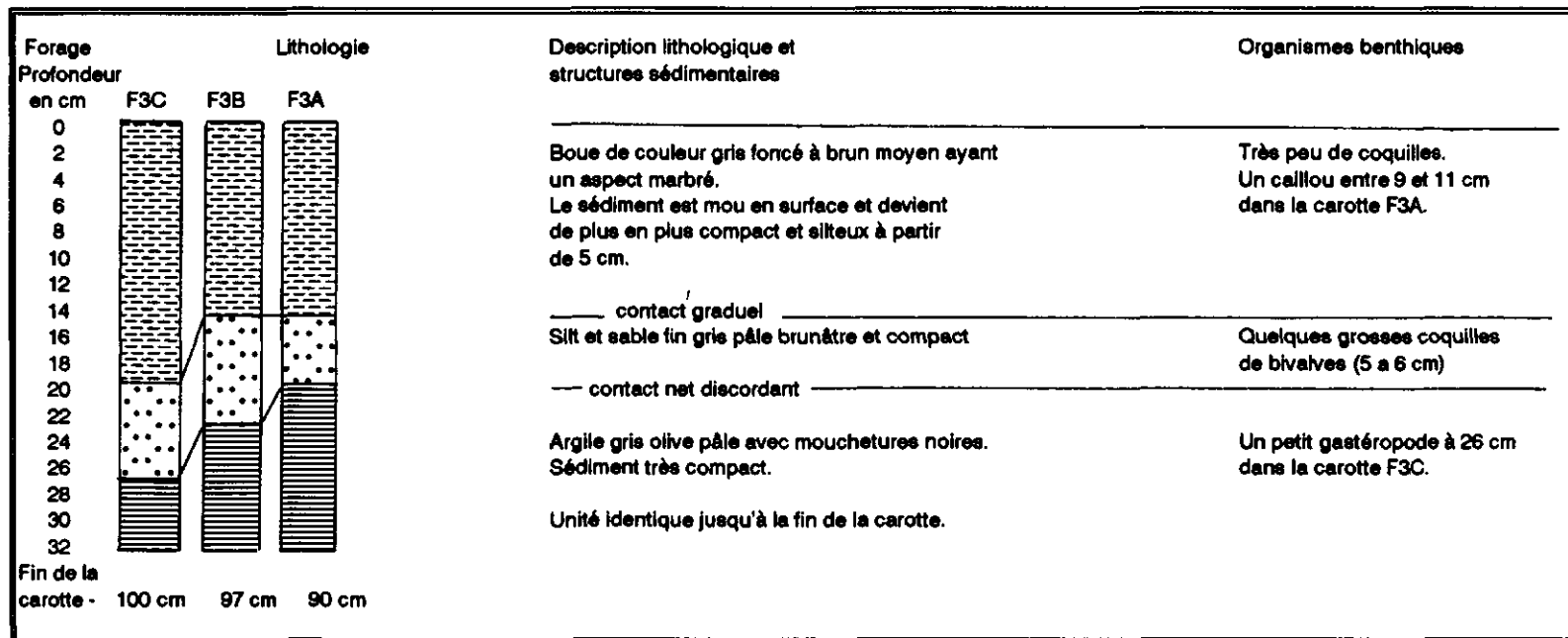


Figure 4.11 Descriptions visuelles des carottes prélevées à la station F3

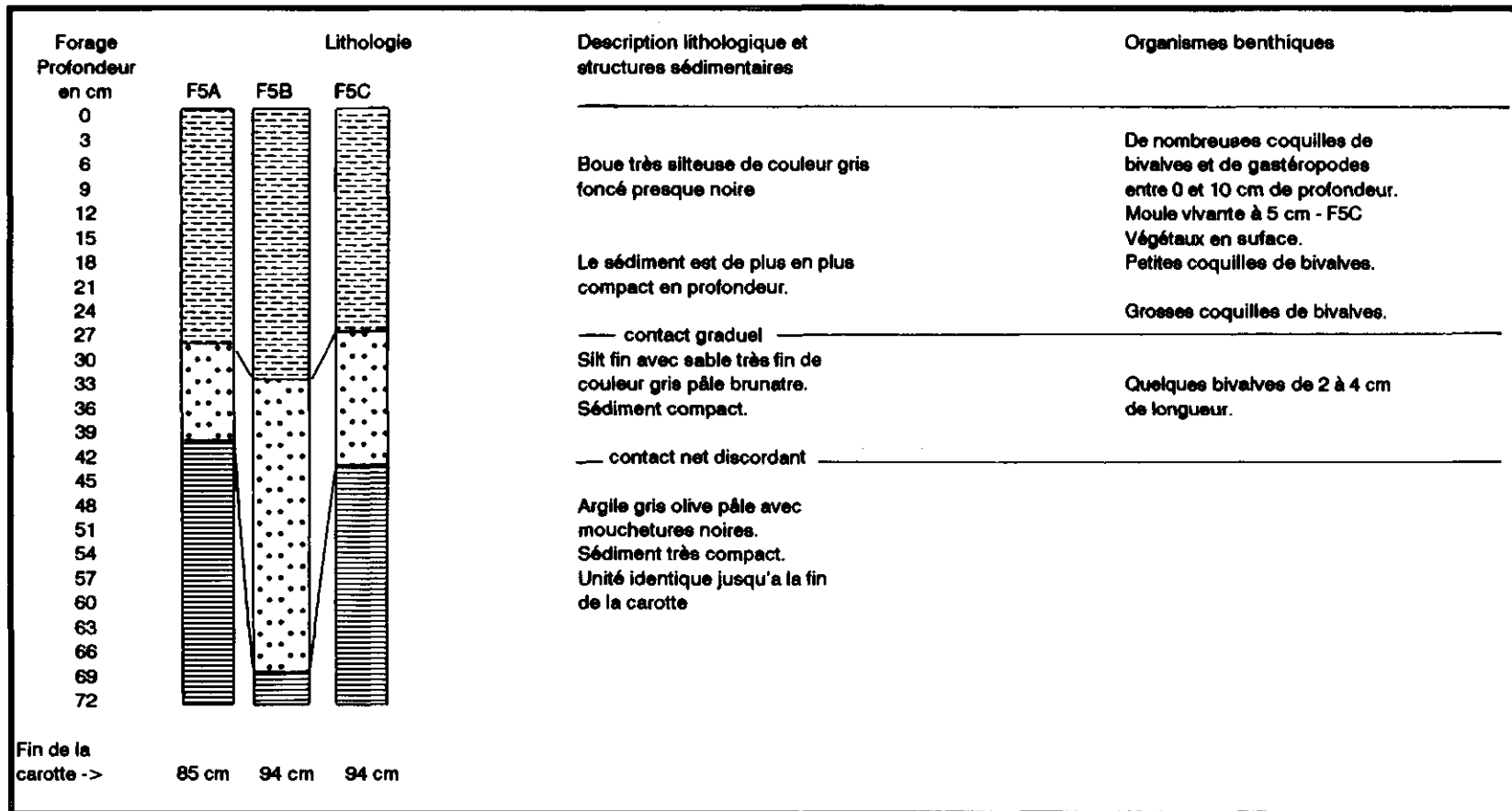


Figure 4.12 Descriptions visuelles des carottes prélevées à la station F5

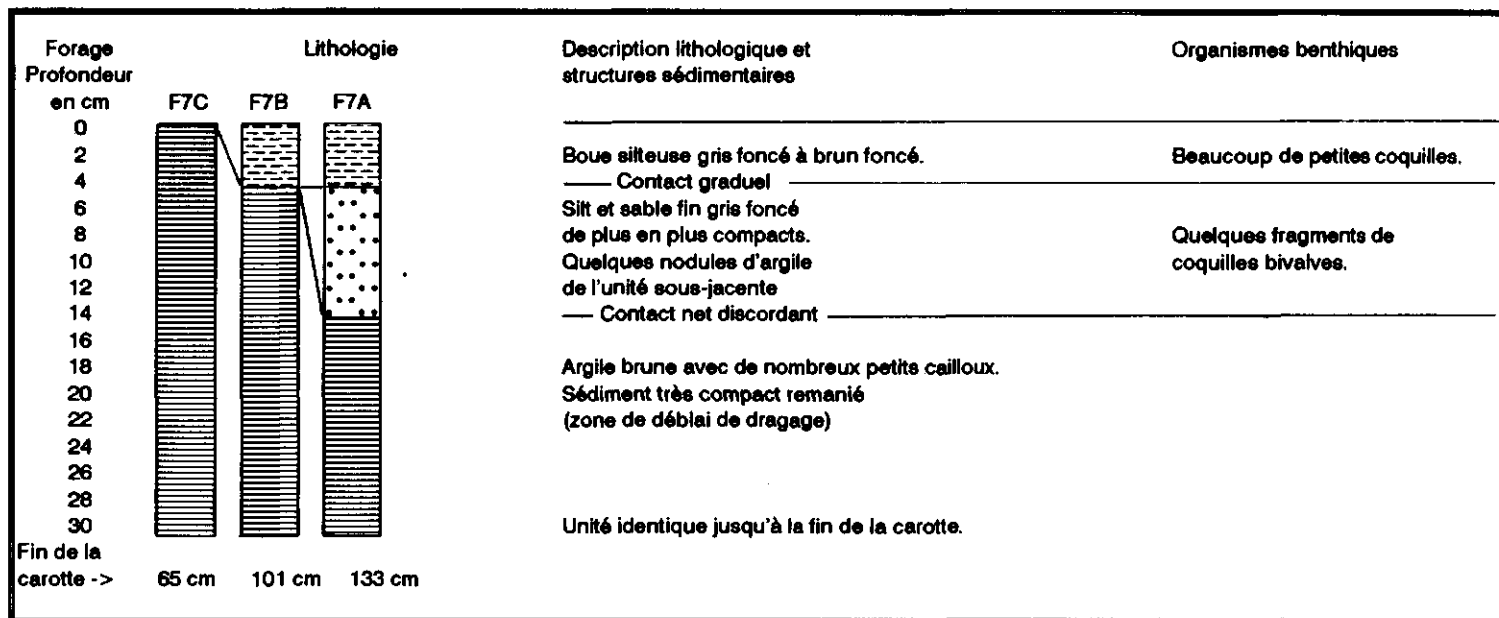


Figure 4.13 Descriptions visuelles des carottes prélevées à la station F7



- 3- Unité d'argile marine compacte de couleur gris olive avec mouchetures noires.

Ces trois unités sont présentes à toutes les stations de forage. L'épaisseur moyenne des deux premières unités est maximale à la station F5 (51 cm) au centre du bassin sédimentologique et minimale (7 cm) à l'est (station F7) près de la zone de déblais de matériaux de dragage. Notons également que le passage de l'unité 1 à l'unité 2 se fait de façon graduelle tant au niveau de la texture que de la couleur, seule la présence de grosses coquilles permet de les différencier.

Enfin, à la station F7, l'unité d'argile marine semble composée d'argile remaniée et déposée mécaniquement dans la zone de remblais. Cette argile ne présente pas les mêmes caractéristiques visuelles que celle rencontrée aux autres stations de forage.

L'analyse des paramètres physiques sur les sédiments des carottes est présentée de façon détaillée à l'annexe I et aux figures 4.23 à 4.25 à la section 4.2.3. La quantité de COT, le pourcentage d'humidité, la granulométrie et la densité relative obtenue par tomodynamométrie varient graduellement en fonction de la profondeur jusqu'à l'unité argileuse. Généralement, lorsque la profondeur augmente, le pourcentage d'humidité et la teneur en COT diminuent et le diamètre des particules augmente.

Ces observations témoignent bien du passage graduel d'une boue silto-argileuse en surface à un sable silteux au contact avec l'argile.

**4.1.7 Épaisseur des sédiments récents** - L'analyse et l'interprétation combinées des profils de réflexion sismique et des données de calibration par carottage ont conduit à la cartographie de l'épaisseur des sédiments récents.

La carte 6 présente une section interprétative de la ligne 5 qui a servi à la calibration des relevés de réflexion sismique. La section montre un profil sismique avec les réflecteurs identifiés. Les résultats des carottes de validation numérotées C-1 à C-5 illustrent la nature et l'épaisseur des sédiments rencontrés.

La section interprétative montre dans sa partie gauche (nord) un réflecteur de forte amplitude correspondant à un affleurement rocheux. Un second réflecteur de forte amplitude (point 449) associé à une surface d'érosion ancienne dans les argiles marines plonge jusqu'à 4 m pour former un bassin d'accumulation.

Dans la partie centrale, deux réflecteurs superposés, de plus faible amplitude montrent des couches de sédiments d'environ 40 à 60 cm. Ces réflecteurs moins bien définis et discontinus suggèrent que la nature des contacts subit des variations latérales.

La carotte C-5 effectuée au point 459 confirme la présence dans le prolongement des réflecteurs de deux couches variant de la boue au silt, superposées à une couche d'argile plus compacte. Les carottages effectués en C-2 et C-3 confirment une épaisseur de sédiments récents inférieure à 15 cm. sur des argiles marines compactes.

Les données de calibration par carottage présentent une correspondance assez forte avec les profils sismiques enregistrés. La carte no 7 présente les isocontours d'épaisseur de sédiments récents. L'équidistance des contours est de 5 cm compte tenu de la limite de résolution du sondeur sismique utilisé (15 cm) pour caractériser l'épaisseur des sédiments récents en continu, la limite supérieure est fixée au contour de 15 cm.

La carte no 7 montre que les sédiments d'origine récente sont concentrés dans le bassin nord-ouest du lac Saint-Louis. L'épaisseur varie de 20 à 60 cm. Les sédiments comblent une dépression dans les argiles marines anciennes sous-jacentes.

La bordure de la rive nord jusqu'à la baie de Valois est caractérisée par une épaisseur de sédiments inférieure à 15 cm, superposée aux argiles marines et/ou au roc. Le secteur nord-est de la zone à l'étude à proximité de l'île Dorval est caractérisé par des épaisseurs de sédiments inférieures à 15 cm superposés au roc qui affleure à plusieurs endroits.

Il est à noter que la carte no 7 montrant l'épaisseur des sédiments récents est issue de l'interprétation des profils sismiques. Ces profils sismiques sont discontinus en plusieurs endroits à cause de la forte concentration de macrophytes (50%) surtout dans les secteurs de faible profondeur.

## 4.2 Caractérisation chimique

4.2.1 **Analyse statistique de la contamination** - Les résultats analytiques des échantillons de sédiment de surface furent informatisés et traités à l'aide du logiciel Quattro Pro afin d'établir les principales statistiques de base nécessaires à l'interprétation.

Le tableau 4.2 présente les teneurs minimum et maximum observées ainsi que les moyennes et les écarts-types relatifs à la distribution des teneurs.

Malheureusement, en ce qui a trait aux analyses des métaux, nous ne pouvons pas comparer directement les teneurs moyennes des fractions non-résiduelles de l'étude pilote avec les fractions totales des études de Champoux et Sloterdijk (1988) ou de Sérodes (1978).

Comme nous l'avons souligné précédemment (section 3.6.2) quelques échantillons furent également analysés par digestion ouverte afin de connaître la fraction totale de métaux présents dans la matrice sédimentaire. Les résultats de 8 analyses réalisées pour 5 stations sont présentés à l'annexe I. Soulignons d'abord que l'analyse de la fraction non-résiduelle (HCl 1N) des sédiments permet de connaître la quantité de métaux contenue sous la forme d'ions échangeables, d'ions adsorbés sur les particules et en partie de ceux qui se retrouvent sous la forme de carbonate et d'oxyde, alors que la digestion ouverte (HCl-HNO<sub>3</sub>-HF) inclus en plus les ions présents sous la forme lithogénique (Pickering, 1981; Baudo *et al.*, 1990). La fraction non-résiduelle pourrait ainsi représenter la fraction chimique disponible ou potentiellement disponible avenant un changement dans les conditions physiques du milieu (Bradly et Cox, 1987).

Les résultats des 5 stations montrent une relation linéaire entre les deux types d'analyse pour le Cd, Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb et Zn. Bien que l'ordonnée à l'origine n'est pas zéro et que le nombre d'analyses est faible (8), on peut toutefois conclure qu'il existe une relation entre les données analytiques des fractions non-résiduelles et des fractions totales (Bradly et Cox, 1987). Afin d'illustrer cette relation, nous avons calculé le pourcentage de la fraction non-résiduelle par rapport à la fraction totale (%NR) de ces 5 stations de l'étude (tableau 4.3). Ce tableau présente également le pourcentage de la

**Tableau 4.2 Statistiques de base des échantillons de surface**

<b>Paramètres</b>	<b>Nombre d'échantillon</b>	<b>Teneur minimum</b>	<b>Teneur maximum</b>	<b>Teneur moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Critère* de qualité</b>
Cd (ppm)	40	0.3	3.5	1.2	0.8	0.9
Cr (ppm)	40	2.8	18.1	9.7	4.1	55
Cu (ppm)	40	3.7	34.4	16.6	9.5	28
Ni (ppm)	40	3.8	18.0	10.0	3.7	35
Pb (ppm)	40	1.6	53.6	27.6	12.9	42
Zn (ppm)	40	45.1	329.3	159.6	73.6	150
As (ppm)	25	2.9	125.6	19.4	26.4	6.7
BPC (t) (ppb)	13	1.3	7.6	4.7	1.7	160
HAP (t) (ppm)	21	0.00	0.86	0.22	0.23	2.41
C(t)(%)	57	0.7	6.0	2.8	1.5	-
COT (%)	57	0.4	5.3	2.2	1.3	-
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	57	1.3	2.3	1.7	0.3	-
Humidité (%)	57	18.3	64.4	41.8	12.9	-
Gravier (%)	56	0.0	45.8	6.1	12.6	-
Sable (%)	56	0.0	100.0	40.5	31.0	-
Silt (%)	56	0.0	69.5	25.1	20.3	-
Argile (%)	56	0.0	82.9	28.3	20.9	-

\* Procéan (1991b)

**Tableau 4.3 Pourcentage de la fraction chimique non-résiduelle par rapport à la fraction totale. (% NR)**

Paramètres	Sédiments de surface Étude pilote 1991		% NR <sup>1</sup>	Sédiments de surface Étude pilote 1991	Sédiments de surface Étude pilote 1991	Champoux et Sloterdijk,* 1988	Sérodes 1978*
	Moyenne Fraction non-résiduelle n = 8	Moyenne Fraction totale n = 8		Moyenne Fraction non-résiduelle n = 40	Fraction totale estimée <sup>2</sup>	Moyenne Fraction totale n = 31	Moyenne Fraction totale n = 20
Lj (ppm)	0.5	24	2				
Cr (ppm)	10.5	68	15	10	67	139	69
Al (%)	0.9	5.1	18				
Fe (%)	1.8	8	23				
Ni (ppm)	11.4	38	30	10	33	33	34
Cu (ppm)	20.3	37	55	17	31	33	31
Zn (ppm)	19.1	313	61	160	262	242	241
Pb (ppm)	34.0	50	68	28	41	41	38
Cd (ppm)	1.5	1.7	88	1.2	1.4	1.5	-
Mn (ppm)	1860	2095	89				

\* Seuls les échantillons prélevés par ces auteurs dans le secteur de la zone d'étude-pilote furent considérés.

<sup>1</sup> % NR = Fraction non-résiduelle / Fraction totale \* 100

<sup>2</sup> Fraction totale estimée = Moyenne des fractions non-résiduelles 1991 / (% NR/100)

fraction chimique non-résiduelle des analyses de toutes les stations de sédiments de surface de 1991 et les fractions totales des analyses réalisées dans le secteur de la zone-pilote par Champoux et Sloterdijk (1988) et par Sérodes (1978).

Le calcul du pourcentage (NR analyse non-résiduelle/analyse totale \* 100) permet d'obtenir une estimation de la fraction potentiellement disponible et permet de comparer les données analytiques antérieures à celles présentées dans cette étude. Ce pourcentage varie selon le paramètre analysé pour les cinq stations de l'étude-pilote. Le Cu, le Zn, le Pb, le Cd et le Mn (% NR > 50%) possèdent un potentiel de disponibilité qui est nettement plus élevé que le Li, le Cr, l'Al, le Fe et le Ni (% NR < 30%) rendant ces paramètres potentiellement plus contaminants pour le milieu. A l'aide du % NR, nous avons estimé la valeur de la moyenne des analyses totales que nous devrions obtenir sur les sédiments de l'étude pilote (tableau 4.3). A priori, les teneurs obtenues par cette estimation sont plus près des tenues moyennes observées par Sérodes (1978), principalement pour le Cr, que celles obtenues par Champoux et Sloderdijk (1988). Nous croyons que cette similitude est principalement reliée à la technique d'échantillonnage qui était identique à celle des travaux de Sérodes (Benne Shipek 860, échantillon non remanié) qu'à celle de Champoux et Sloterdijk (Benne Ekman, échantillon non remanié et en vrac). Nous avons également comparé les résultats d'analyse de quatre stations d'échantillonnage à la benne de 1991 avec des stations d'échantillonnage à la benne de Champoux et Sloterdijk, 1988. Les stations de comparaison furent:

-	<u>Station de 1991</u>	<u>Station de 1988</u>
	C-0111	39A
	C-0552	121 et 34A
	C-0663	36A
	C-0883	125 et 25

Les teneurs chimiques non-résiduelles du Cr, Cu, Ni, Pb et Zn de 1991 furent estimées en teneurs chimiques totales à l'aide du % NR. Cette comparaison a permis de constater qu'en moyenne, les teneurs chimiques totales estimées de 1991 sont toujours plus faibles que les teneurs observées par Champoux et Sloterdijk (1988).

L'écart est d'environ -8 à -15 % sauf pour le Cr, qui a un écart de -51 %. Comme nous l'avons déjà souligné, cet écart peut être causé par des techniques d'échantillonnage différentes.

Enfin, nous croyons que l'estimation réalisée à l'aide du % NR pourrait être utilisée dans le but de comparer l'ensemble de l'étude de 1991 avec les études antérieures. Toutefois, un choix des stations et des paramètres à comparer devra être fait et tout en gardant à l'esprit qu'il s'agit d'une estimation et non de teneurs chimiques mesurées.

La matrice des coefficients de corrélation de Kendall fut calculée à l'aide du logiciel Systat et est présentée au tableau 4.4. Les coefficients de corrélation calculés pour chacun des paramètres permettent de constater que tous les métaux (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr et Cd) sont fortement reliés entre eux avec des coefficients qui varient entre 0,45 et 0,77. Le Cu, Cr et Cd sont reliés au HAP ( $> 0,50$ ) et le Cd, Cu et Zn sont reliés au COT ( $> 0,56$ ). Tous ces paramètres (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, HAP et COT) sont également corrélés à la fraction silteuse du sédiment.

A cause de la corrélation du COT avec la fraction silteuse, il est difficile de préciser si les métaux sont associés aux oxydes de Fe et Mn (Champoux et Sloterdijk, 1988; Jarry *et al*, 1985) ou à la matière organique (Mudrock, 1981). En effet, pour pouvoir définir ce type d'association avec la fraction minérale ou organique, il serait nécessaire de réaliser des attaques chimiques sélectives sur les différentes fractions du sédiment (Campbell *et al*, 1988).

Pour l'arsenic les corrélations sont nulles ou négatives avec les autres paramètres. L'arsenic possède cependant une forte corrélation avec les graviers ce qui pourrait indiquer que la source de ce contaminant est située en rive.

Enfin, les BPC sont plus ou moins reliés avec les autres paramètres chimiques avec des coefficients qui varient entre 0.29 et -0.05. Ils sont corrélés avec la fraction argileuse (0.48) indiquant que leur origine est plus éloignée.

**Tableau 4.4 Matrice des coefficients de corrélation de Kendall**

PARAMÈTRES	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	BPC(t)	HAP(t)	COT	Argile	Silt	Sable	Gravier
Cd	n \ cc	0.56	0.70	0.47	0.45	0.75	-0.43	0.24	0.57	0.68	0.41	0.68	-0.62	-0.42
Cr	40	n \ cc	0.71	0.77	0.55	0.61	-0.34	0.07	0.50	0.41	0.41	0.54	-0.55	-0.29
Cu	40	40	n \ cc	0.69	0.45	0.63	-0.38	0.16	0.60	0.63	0.53	0.64	-0.70	-0.34
Ni	40	40	40	n \ cc	0.61	0.66	-0.18	-0.05	0.41	0.42	0.44	0.46	-0.54	-0.16
Pb	40	40	40	40	n \ cc	0.69	-0.09	0.29	0.15	0.40	0.23	0.32	-0.35	-0.01
Zn	40	40	40	40	40	n \ cc	-0.15	0.07	0.39	0.56	0.27	0.53	-0.49	-0.18
As	40	40	40	40	40	40	n \ cc	--	--	-0.18	-0.35	-0.31	0.26	0.53
BPC	13	13	13	13	13	13	--	n \ cc	--	0.33	0.48	0.13	-0.25	-0.12
HAP	19	19	19	19	19	19	--	--	n \ cc	0.28	0.39	0.50	-0.46	-0.45
COT	40	40	40	40	40	40	25	13	19	n \ cc	0.45	0.54	-0.51	-0.28
Argile	40	40	40	40	40	40	25	13	19	57	n \ cc	0.61	-0.71	-0.47
Silt	40	40	40	40	40	40	25	13	19	57	57	n \ cc	-0.67	-0.53
Sable	40	40	40	40	40	40	25	13	19	57	57	57	n \ cc	0.33
Gravier	40	40	40	40	40	40	25	13	19	57	57	57	57	n \ cc

- \* n = 57; 0.15: P < 0.05; 0.27: P < 0.001
- n = 40; 0.18: P < 0.05; 0.33: P < 0.001
- n = 25; 0.23: P < 0.05; 0.43: P < 0.001
- n = 19; 0.28: P < 0.05; 0.51: P < 0.001
- n = 13; 0.35: P < 0.05; 0.64: P < 0.001

cc → coefficient de corrélation  
n - nombre d'échantillons



**4.2.2 Répartition spatiale des contaminants** - Les résultats d'analyses chimiques des échantillons de bennes sont présentés à l'annexe I pour chacun des paramètres quantifiés. Tous les résultats d'analyse ont été cartographiés à l'exception de ceux n'ayant pas montré de teneurs significatives supérieures à la limite de détection analytique. La représentation spatiale fut produite à l'aide du logiciel SPANS et de l'éditeur de dessin Micro-Station. La modélisation algorithmique utilisée pour la représentation spatiale des contaminants est basée sur la décroissance conique des teneurs sur une distance maximale de 1,3 km (tableau 4.5). Cette distance maximale correspond à la portée moyenne ou distance d'influence moyenne d'un échantillon sur son environnement qui fut calculé à partir des données de l'étude-pilote. Le cône de décroissance des teneurs a la forme d'une parabole avec une courte distance focale s'établissant généralement entre 150 et 200 m. Cette distance focale représente la demi-distance entre deux points d'échantillonnage. Cette demi-distance est la limite maximale d'interpolation entre deux points d'échantillonnage. Elle permet d'obtenir une meilleure validation des teneurs observées par rapport aux isocontours générés par la modélisation.

Les cartes de répartition spatiale sont présentées aux figures 4.14 à 4.22 à une échelle du 1:100 000 pour les paramètres suivants:

- Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd (non résiduel)
- As, HAP (t), BPC (t)

La valeur des différents niveaux de concentration fut établie en utilisant le niveau 2 et le niveau 3 des critères de qualité des sédiments d'Environnement Canada (Procéan, 1991b) pour chacun des paramètres. Le niveau 2 représente le seuil d'effets mineurs (SEM) sur les organismes benthiques et le niveau 3 le seuil d'effets néfastes (SEN). Ce dernier indique les concentrations au-dessus de laquelle les dommages aux organismes benthiques sont majeurs (Environnement Canada/MENVIQ, 1990). Ces critères ainsi que les moyennes arithmétiques des teneurs observées sont présentés dans la légende de chaque figure.

Les cartes de répartition spatiale des paramètres analysés permettent de visualiser les relations inter-paramètres observées à l'aide des coefficients de corrélation et de préciser l'origine de ces contaminants dans le bassin sédimentaire.

**Tableau 4.5 Variabilité spatiale des paramètres chimiques et physiques**

<b>Paramètres</b>	<b>Variance</b>	<b>Portée</b>
<b>Cu</b>	<b>9.58 ppm</b>	<b>1 300 m</b>
<b>Zn</b>	<b>74.57 ppm</b>	<b>1 300 m</b>
<b>Pb</b>	<b>11.27 ppm</b>	<b>1 300 m</b>
<b>Ni</b>	<b>3.72 ppm</b>	<b>1 300 m</b>
<b>Cr</b>	<b>4.16 ppm</b>	<b>1 300 m</b>
<b>Cd</b>	<b>0.80 ppm</b>	<b>1 250 m</b>
<b>As*</b>	<b>8.94 ppm</b>	<b>-</b>
<b>BPC*</b>	<b>1.76 ppm</b>	<b>-</b>
<b>HAP*</b>	<b>0.23 ppm</b>	<b>-</b>
<b>COT</b>	<b>1.31 %</b>	<b>1 300 m</b>
<b>Sable</b>	<b>23.7 %</b>	<b>700 m</b>
<b>Silt</b>	<b>20.1 %</b>	<b>1 400 m</b>
<b>Argile</b>	<b>16.2 %</b>	<b>2 500 m</b>

**\* nombre insuffisant de données pour définir une portée**

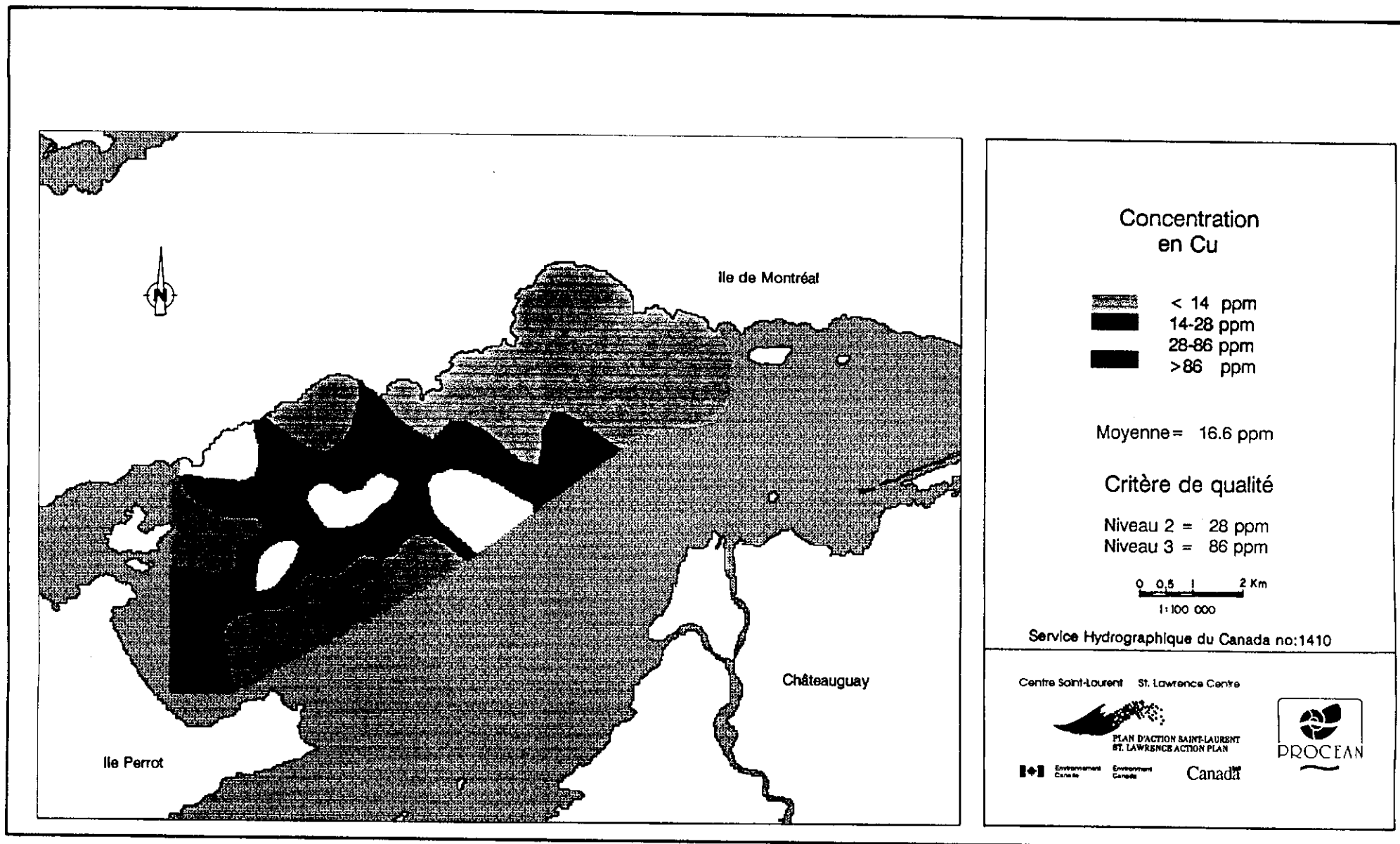


Figure 4.14 Répartition spatiale du cuivre (non-résiduel)

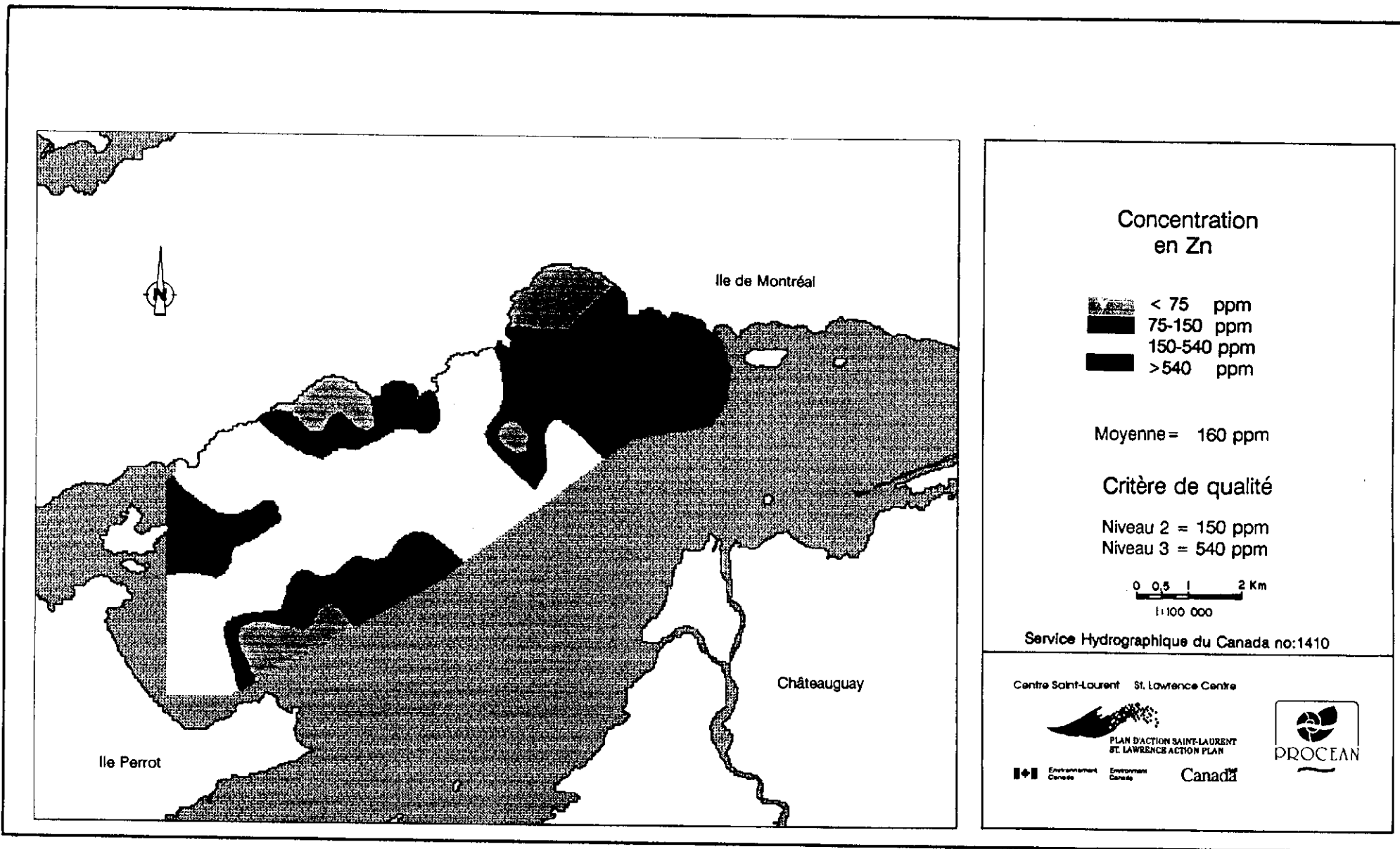


Figure 4.15 Répartition spatiale du zinc (non-résiduel)

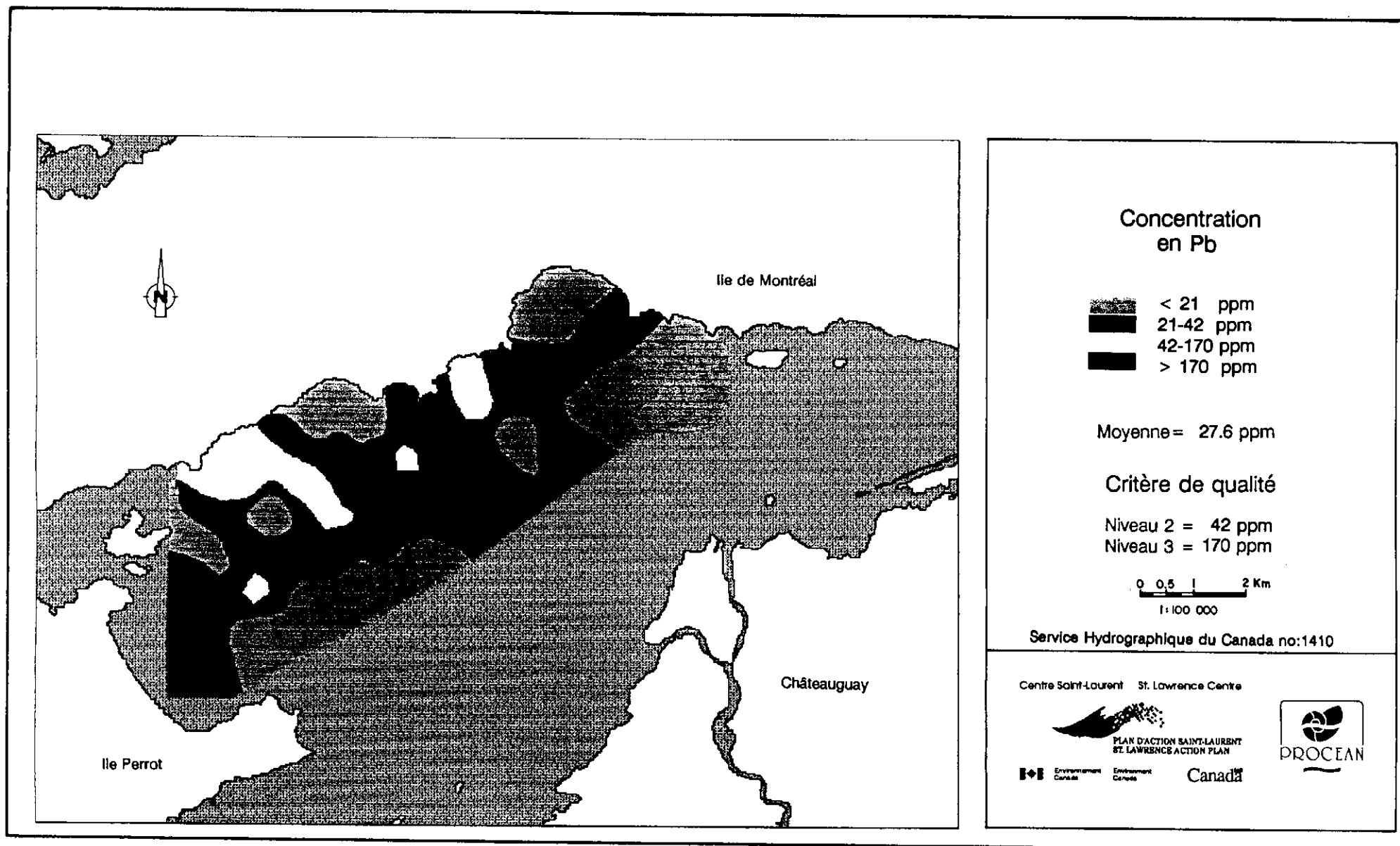
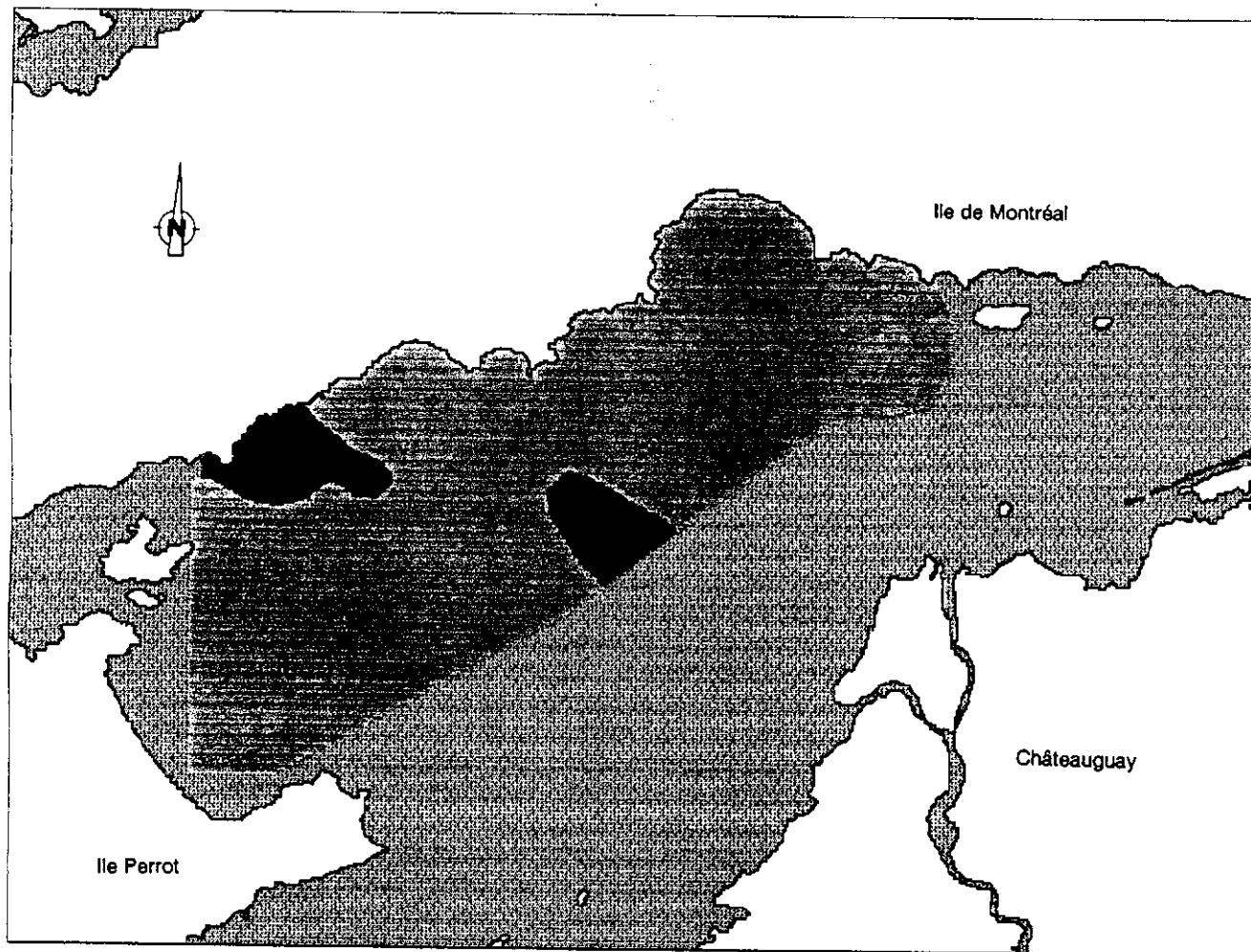
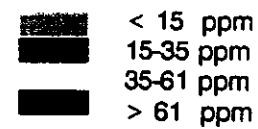


Figure 4.16 Répartition spatiale du plomb (non-résiduel)



Concentration  
en Ni

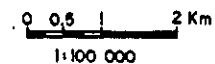


Moyenne = 10.0 ppm

Critère de qualité

Niveau 2 = 35 ppm

Niveau 3 = 61 ppm



Service Hydrographique du Canada no:1410

Centre Saint-Laurent St. Lawrence Centre



PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT  
ST. LAWRENCE ACTION PLAN



Environnement  
Canada

Environment  
Canada

Canada



Figure 4.17 Répartition spatiale du nickel (non-résiduel)

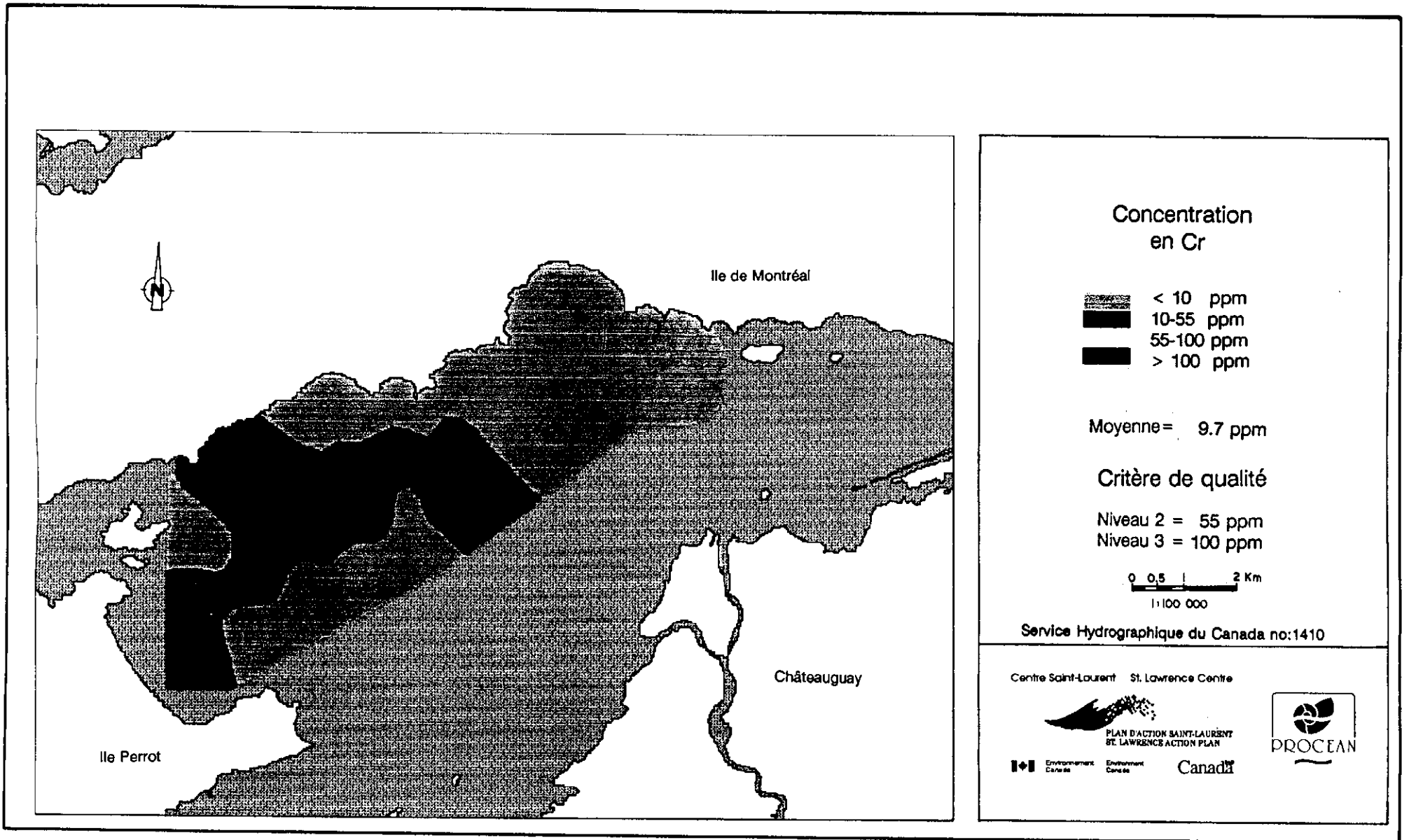


Figure 4.18 Répartition spatiale du chrome (non-résiduel)

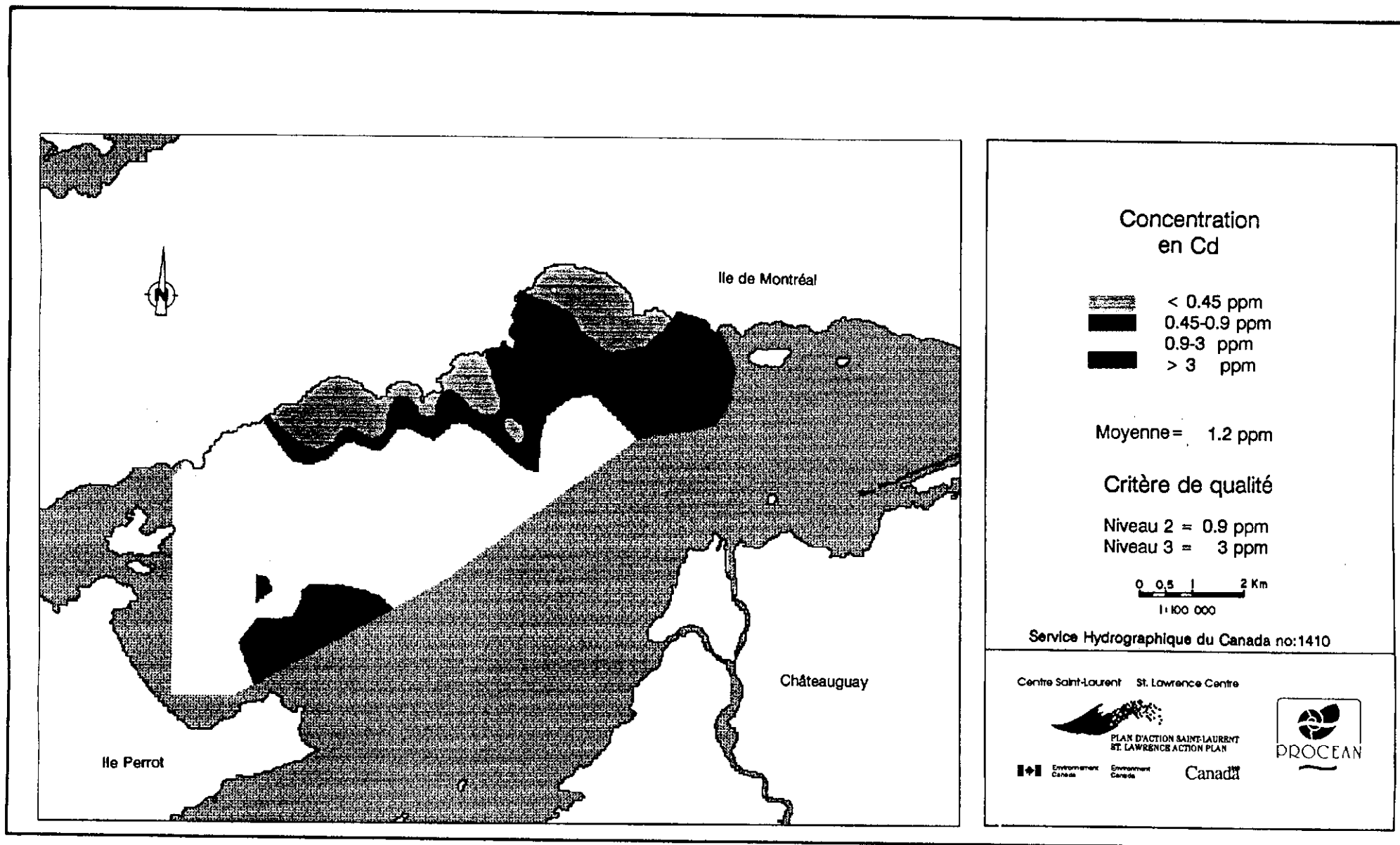


Figure 4.19 Répartition spatiale du cadmium (non-résiduel)



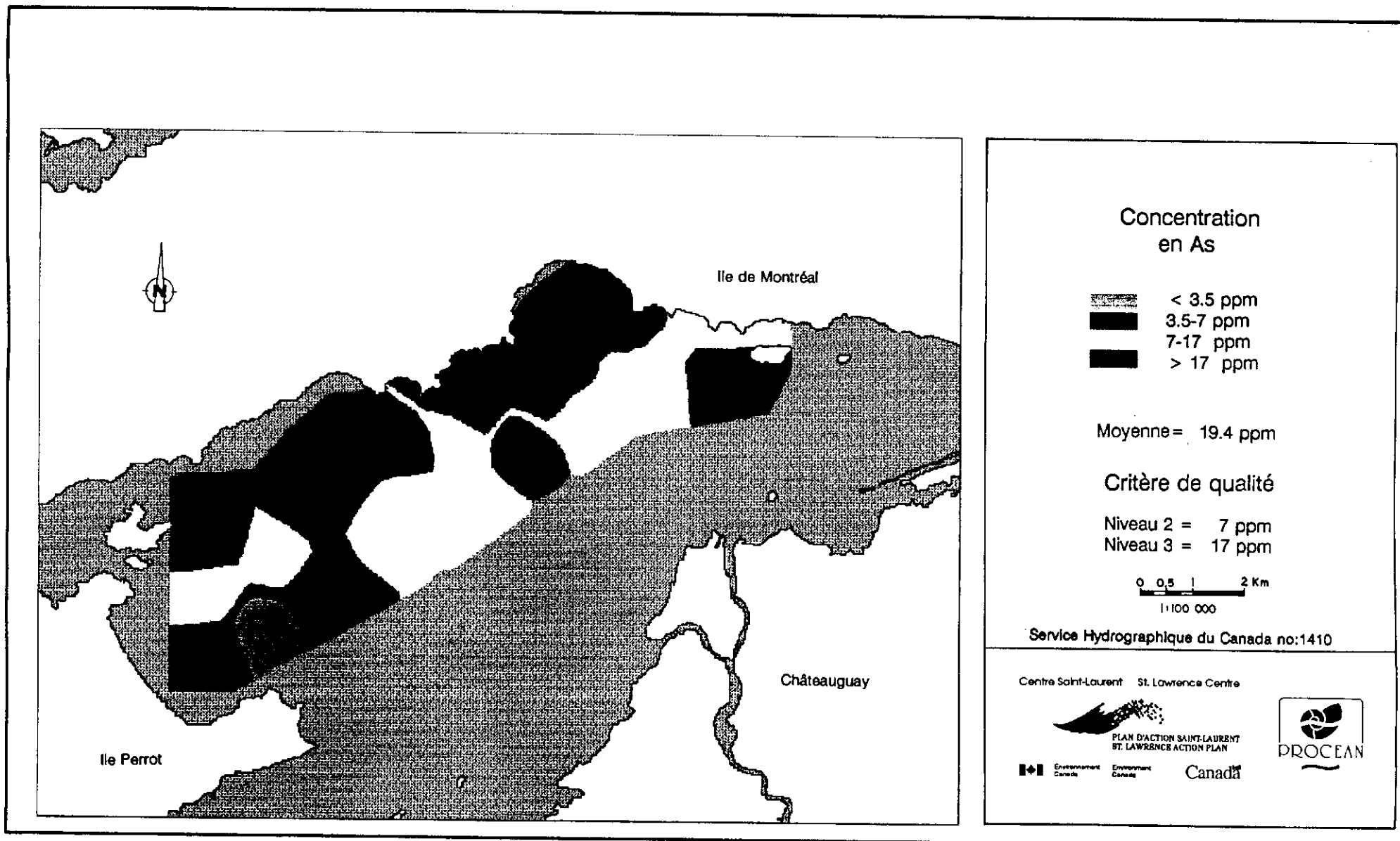


Figure 4.20 Répartition spatiale de l'arsenic (extractible)

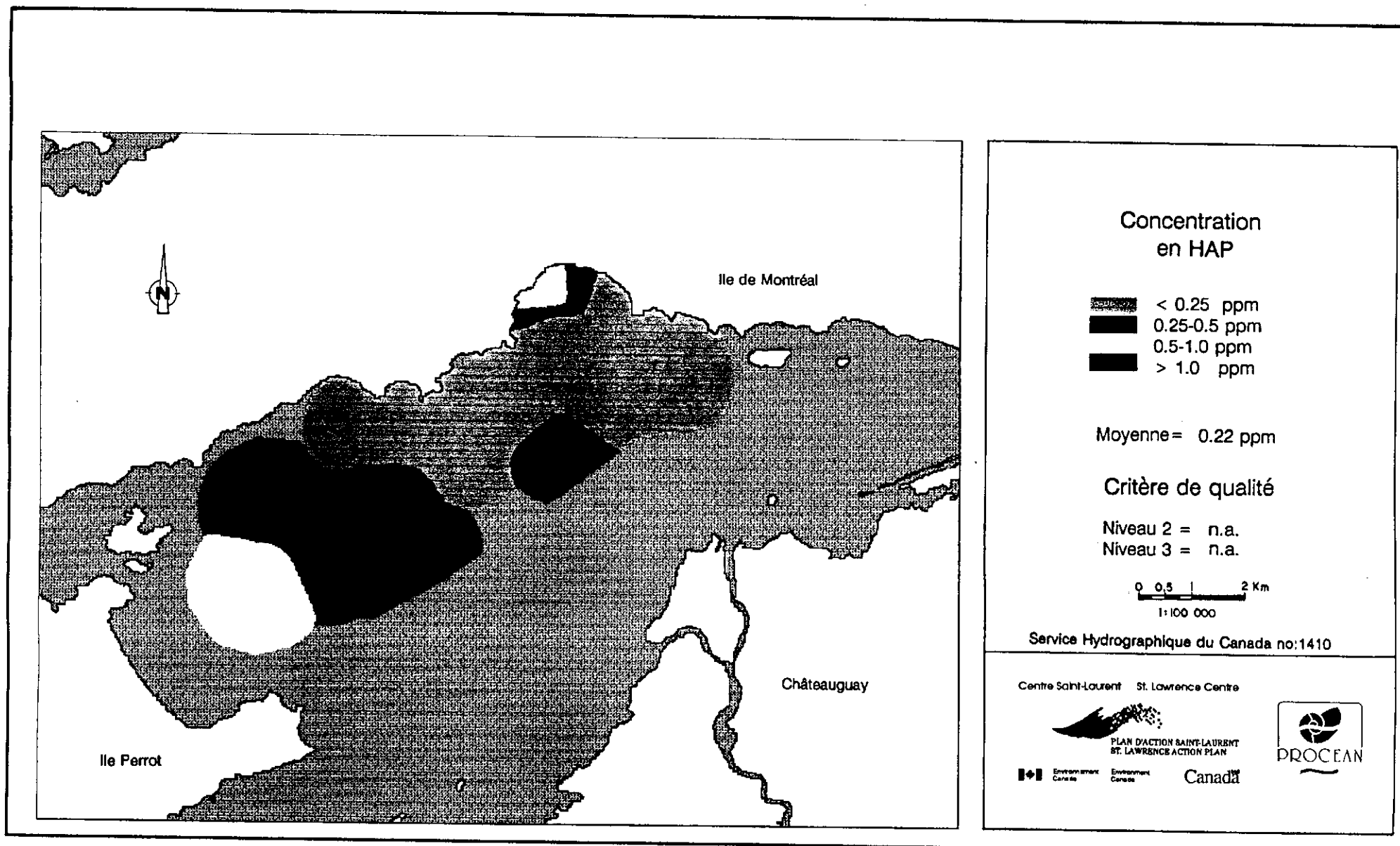


Figure 4.21 Répartition spatiale des HAP (totaux)

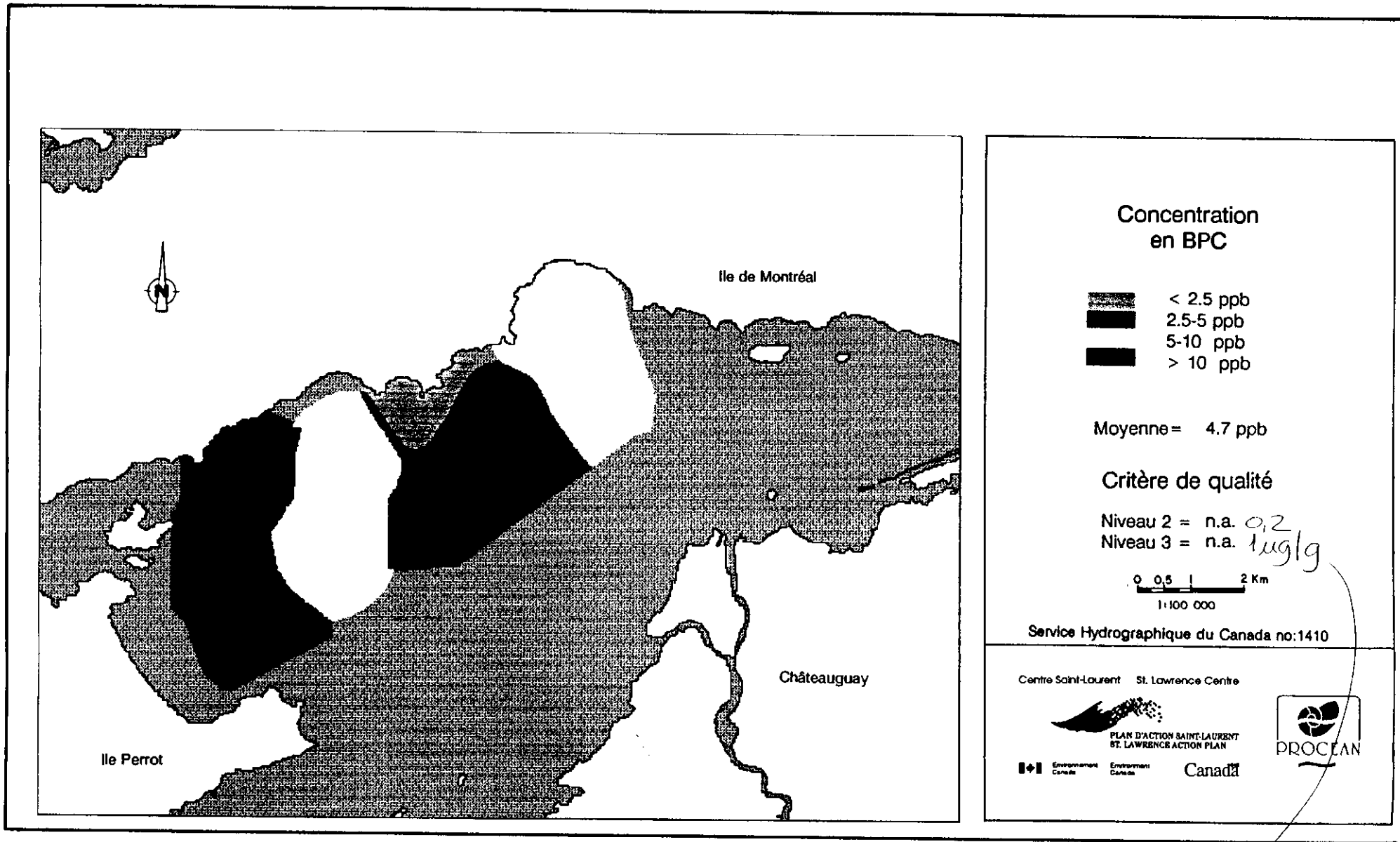


Figure 4.22 Répartition spatiale des BPC (congénères totaux)

*à voir*

Les concentrations en Cu, Zn, Pb, Cd, Cr et Ni présentent toutes les mêmes images géochimiques. Les teneurs les plus élevées se regroupent principalement au centre et à l'ouest du bassin sédimentaire. Cette zone de teneurs élevées est parallèles à l'orientation du bassin sur une longueur moyenne de 6 à 7 km. En tenant compte de la direction d'écoulement des eaux (ouest-est), la source de cette contamination pourrait être l'apport de la rivière Outaouais via la Baie de Vaudreuil et le canal Lynch (Jarry *et al*, 1985).

L'arsenic présente une image géochimique complètement différente des autres paramètres. Les teneurs les plus élevées se situent dans la baie de Valois et à la Pointe Claire. La contamination se prolonge ensuite vers l'est dans le sens du courant jusqu'au sud de l'île Dorval. Comme le suggère Jarry *et al*, (1985) et Champoux et Sloterdijk, (1988), l'origine de l'arsenic dans ce secteur du lac est probablement reliée à des sources ponctuelles (ruisseaux, égouts) situés près des pointes Claire et Charlebois et de la baie de Valois. Les niveaux de teneurs (> 125 ppm) suggèrent que la ou les sources sont encore actives.

Les teneurs en BPC sont relativement faibles par rapport à celles observées par Champoux et Sloterdijk (1988). Les BPC sont présents dans la baie de Valois et dans la zone d'accumulation. La répartition des BPC et leur faible concentration semblent montrer que les BPC n'originent pas de la rivière des Outaouais mais plutôt d'autres sources telles que le fleuve Saint-Laurent et/ou des sources riveraines comme les égouts municipaux (tel que suggéré par Champoux et Sloterdijk, 1988). On ne peut comparer les analyses de BPC des travaux antérieurs car il s'agit d'analyses des Aroclor et nos analyses dosent les congénères de BPC. Notons que les congénères 105, 118, 138 et 153 contribuent à plus de 75% de la valeur totale des 14 congénères de BPC analysés (voir annexe I) et que les congénères 105 et 118 font partie des formes de BPC les plus toxiques (Tanabé *et al*, 1989).

La présence de HAP au fond de la baie de Valois permet d'appuyer les propos de Champoux et Sloterdijk qui estimaient que ce contaminant provenait des égouts municipaux. On peut noter une légère diminution des HAP(t) d'une valeur

moyenne de 0,86 ppm (Champoux et Solterdijk, 1988) à 0,22 ppm (étude-pilote) qui est possiblement reliée à la mise en service du collecteur urbain en 1988.

Notons enfin, que les résultats analytiques des pesticides organo-chlorés et organo-phosphorés, des phénols, des catéchols et des guiacols ont tous montrés des teneurs inférieures à la limite de détection, sauf pour les HCB, les DDE, les DDD et le pentachlorophénol. On peut consulter ces résultats à l'annexe I.

**4.2.3 Évolution temporelle** - L'évolution temporelle de la contamination décrite dans cette section a été interprétée à partir du calcul des taux de sédimentation à l'aide des analyses radio-isotopiques et des résultats des analyses physiques et chimiques. Les résultats de BPC, de granulométrie et de COT présentés sur les profils verticaux de cette section ont été corrigés pour tenir compte des variations stratigraphiques d'une carotte à l'autre pour une station donnée. Cette correction a été établie en n'utilisant que l'épaisseur de sédiments actuels composée de boue limitée par le contact boue/sable.

#### Radio-isotopie

L'analyse radio-isotopique de  $Pb^{210}$ , du  $Cs^{137}$  et du  $Be^7$  fut réalisée sur deux carottes de sédiment prélevées aux stations F3 et F5. Les analyses furent réalisées par le Dr. Carignan de l'Institut National de Recherche Scientifique Eau. Les données analytiques du  $Be^7$  n'ont pas montré de résultats significatifs. Les résultats analytiques du  $Cs^{137}$  et du  $Pb^{210}$  sont présentés à l'annexe I et aux figures 4.23 et 4.24 sous la forme de profil en fonction de la profondeur de sédiment.

Pour chacune des carottes, l'activité maximale de  $Cs^{137}$  représente l'année de déposition 1962. Elle se situe à 4,5 cm de profondeur pour la carotte de la station F3 et à 8,5 cm pour celle de la station F5. Ces deux positions du maximum de  $Cs^{137}$ , permet d'obtenir des taux de sédimentation ( $S_{Cs^{137}}$ ) de 0,16 cm/année et de 0,29 cm/année pour chacune des stations.

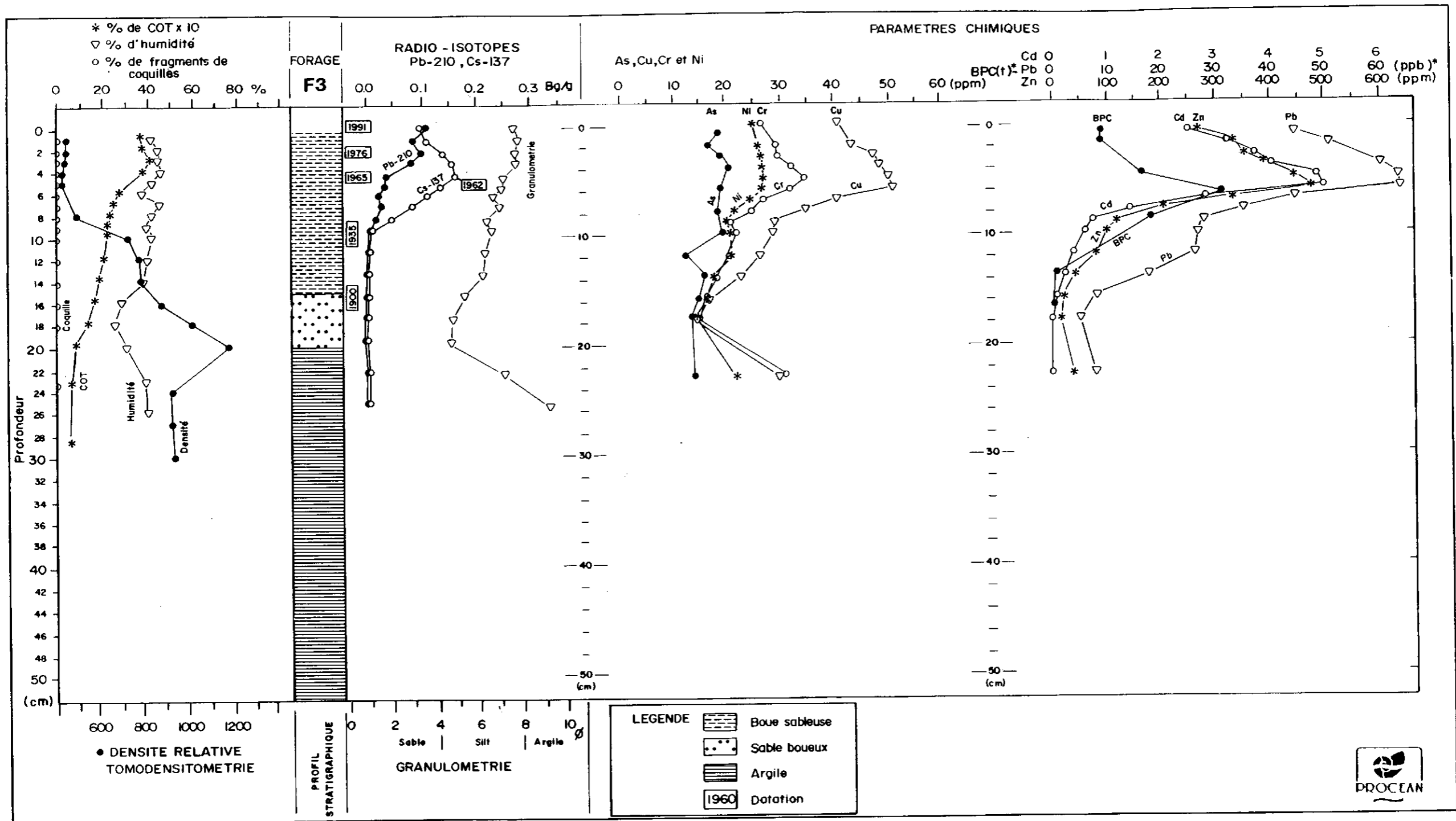


Figure 4.23 Profils verticaux des résultats analytiques. Station F3



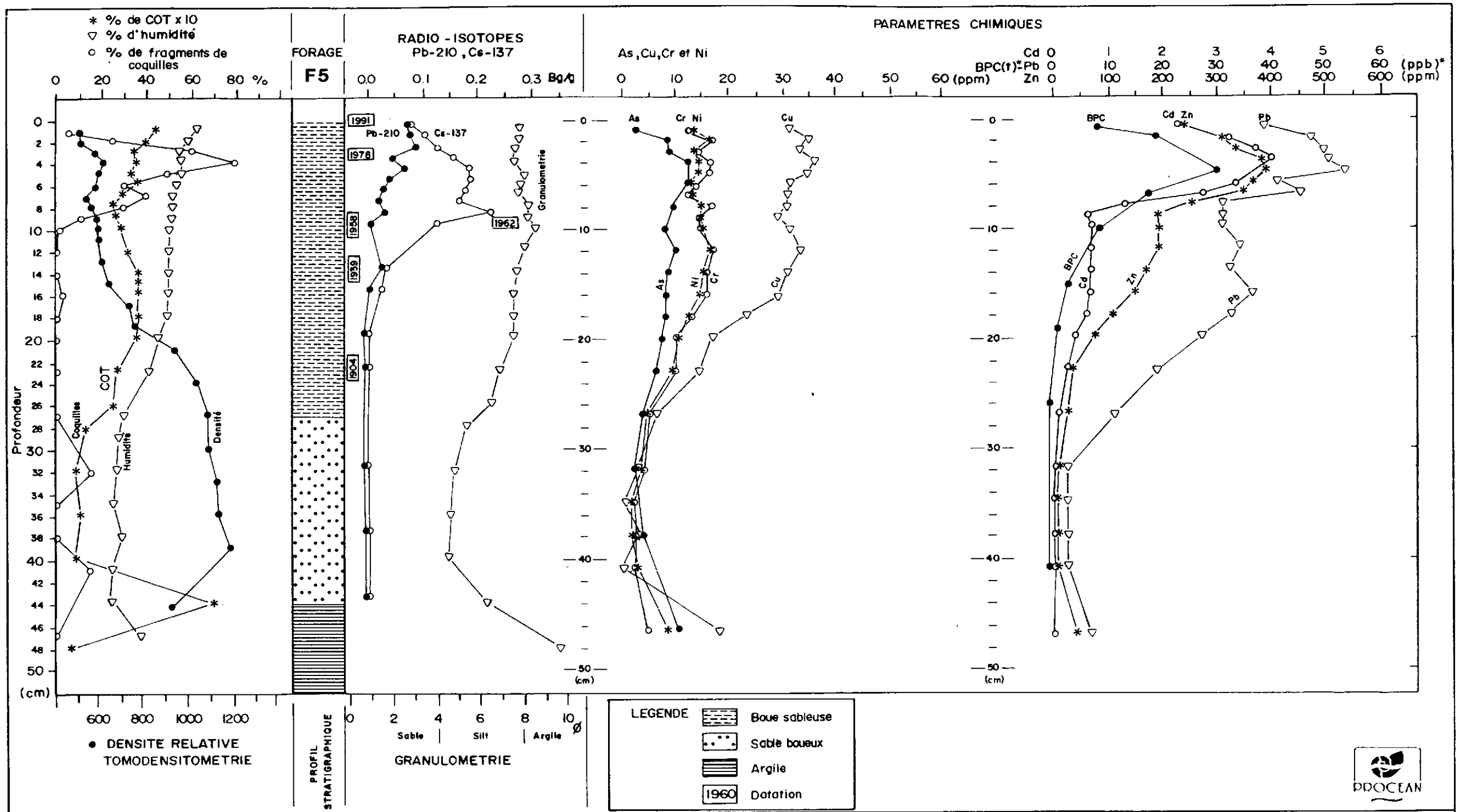


Figure 4.24 Profils verticaux des résultats analytiques. Station F5

La méthodologie détaillée de calcul du taux de sédimentation obtenu à l'aide du  $Pb^{210}$  a été présentée à la section 3.6.3 et les résultats bruts sont reportés à l'annexe I. Sur les figures 4.24 et 4.25, nous avons indiqué les âges obtenus par ce calcul en fonction de la profondeur. Les âges maximum encore significatifs se situent au contact entre l'unité de boue superficielle et l'unité de sable très fin silteux sous-jacente. L'âge de ce contact serait d'environ une centaine d'années et les taux de sédimentation ( $SPb^{210}$ ) de chacune des carottes seraient de 0,17 cm/année à la station F3 et de 0,26 cm/année à la station F5. En somme, les taux de sédimentation calculés à chacune des stations (F3 et F5) sont presque similaires pour les deux radio-isotopes utilisés. On peut établir le taux moyen de sédimentation 0,16 cm/année à la station F3 et de 0,28 cm/année à la station F5.

#### Contamination

Les sous-échantillons de chacune des carottes de sédiment furent analysés pour les paramètres inorganiques (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, As) et pour les BPC (congénères). Les résultats analytiques détaillés sont présentés à l'annexe I. Ils sont synthétisés sous la forme de profils aux figures 4.23 à 4.25.

Les profils chimiques montrent une augmentation des teneurs de chacun des paramètres en fonction de la profondeur jusqu'à un maximum qui se situe à environ 5 à 6 cm pour les forages F3 et F5. Ensuite les teneurs diminuent plus ou moins rapidement avec la profondeur pour atteindre des concentrations minimales dans l'unité de sable très fin.

A la station F7, les profils chimiques montrent des teneurs maximales en surface qui diminuent rapidement avec la profondeur. Les teneurs minimales se situent également dans l'unité de sable très fin.

Dans l'ensemble, seule l'unité de surface de silt et d'argile est contaminé. Cette contamination est apparue, selon les datations, au début du 20e siècle pour atteindre son maximum dans les années 60 et 70. Depuis cette date, la contamination semble diminuer.



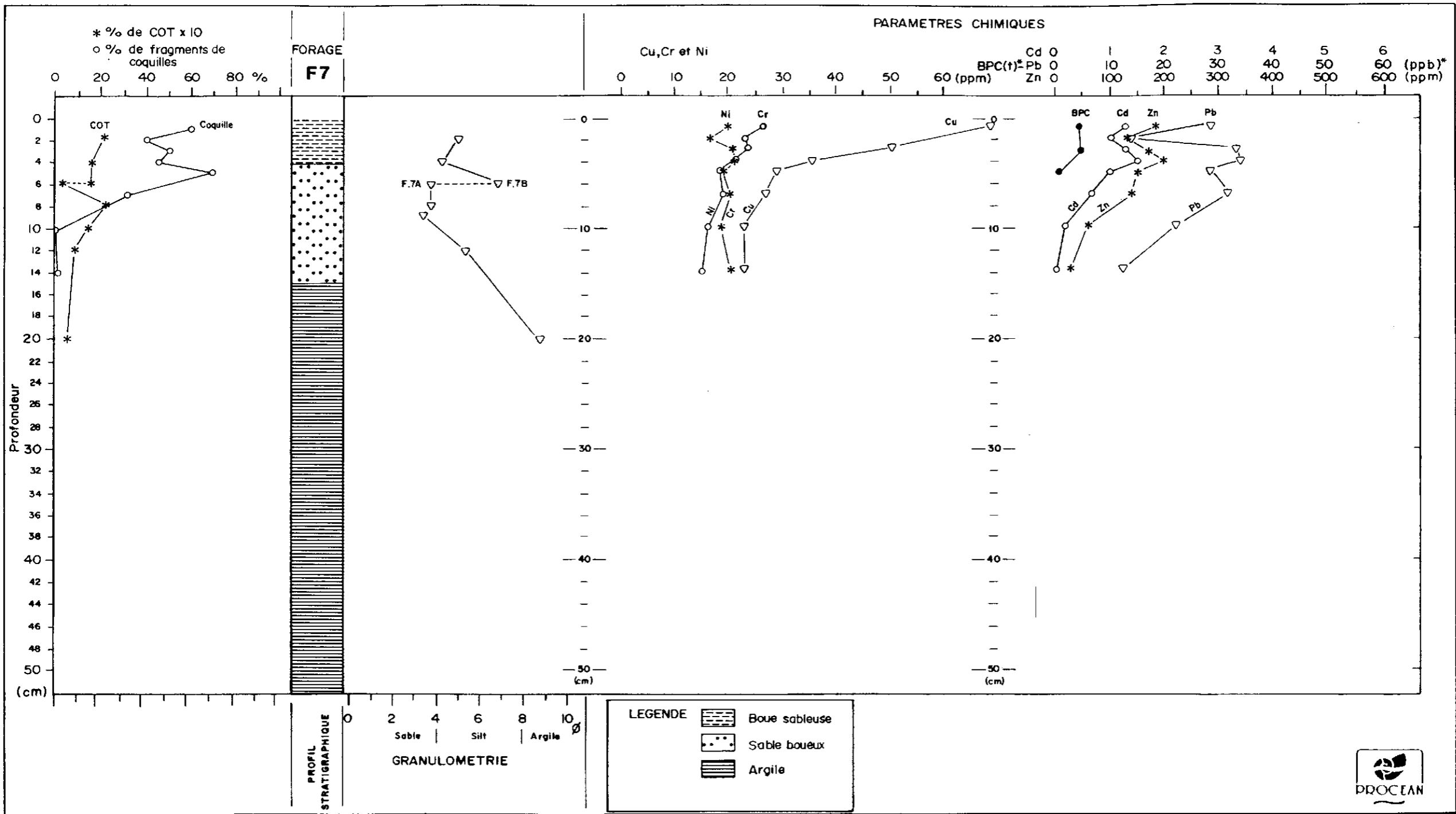


Figure 4.25 Profil vertical des résultats analytiques. Station F7



Dans le but de pouvoir réaliser le calcul du bilan massique de chaque contaminant (section 5.2) nous avons calculé les teneurs moyennes de chacun des paramètres dans la zone contaminée identifiée sur les profils des carottes. Ces teneurs moyennes furent ensuite comparées avec les teneurs moyennes des 5 premiers cm de sédiments prélevés et analysés pour la répartition superficielle des contaminants. Comme on pouvait s'y attendre, on constate que les teneurs moyennes des sédiments de surface sont toujours plus élevées que les teneurs moyennes pour l'ensemble des carottes.

Le pourcentage des concentrations de surface a été calculé comme suit:

$$\frac{\text{Teneur moyenne de l'ensemble}}{\text{Teneur moyenne des 5 premiers cm}} \times 100$$

Cette proportion représente le facteur de pondération qu'il faut attribuer aux teneurs chimiques des sédiments de surface afin d'obtenir les teneurs attribuables aux sédiments récents contaminés (tableau 4.6). Nous attribuerons ce facteur de pondération aux teneurs chimiques des échantillons de benne au moment du calcul du bilan massique.

### Évolution

Afin de pouvoir comprendre l'évolution temporel de la contamination dans le bassin de l'étude-pilote, nous avons regroupé sur la figure 4.26 les profils de quatre carottages de sédiments réalisés depuis 1976:

- station C49 de Sérodes, 1978;
- station 3 de Rukavina *et al*, 1990;
- station F3 et F5 de l'étude-pilote.

Nous avons utilisé comme point de comparaison la profondeur de l'année 1962 qui fut obtenue par datation radio-isotopique et les profils du zinc qui constitue un des contaminants importants du bassin et qui a été analysé dans toutes ces études.

**Tableau 4.6 Pourcentage de la concentration de contaminants en surface (5cm) sur la concentration moyenne des carottes**

Paramètres	F3		F5		Proportion des teneurs
	5° cm	Ensemble	5° cm	Ensemble	
<b>Cu (ppm)</b>	<b>36.2</b>	<b>24.6</b>	<b>34.4</b>	<b>25.3</b>	<b>71%</b>
<b>Zn (ppm)</b>	<b>357.2</b>	<b>213.7</b>	<b>330.6</b>	<b>177.1</b>	<b>57%</b>
<b>Pb (ppm)</b>	<b>56.8</b>	<b>37.5</b>	<b>47.9</b>	<b>32.0</b>	<b>67%</b>
<b>Cd (ppm)</b>	<b>3.7</b>	<b>2.0</b>	<b>3.4</b>	<b>1.3</b>	<b>45%</b>
<b>Cr (ppm)</b>	<b>20.9</b>	<b>14.9</b>	<b>15.7</b>	<b>13.4</b>	<b>78%</b>
<b>Ni (ppm)</b>	<b>12.7</b>	<b>17.0</b>	<b>14.5</b>	<b>12.7</b>	<b>81%</b>
<b>As (ppm)</b>	<b>9.3</b>	<b>7.8</b>	<b>9.2</b>	<b>8.5</b>	<b>88%</b>
<b>BPC(t)(ppb)</b>	<b>11.5</b>	<b>14.1</b>	<b>20.6</b>	<b>9.1</b>	<b>83%</b>

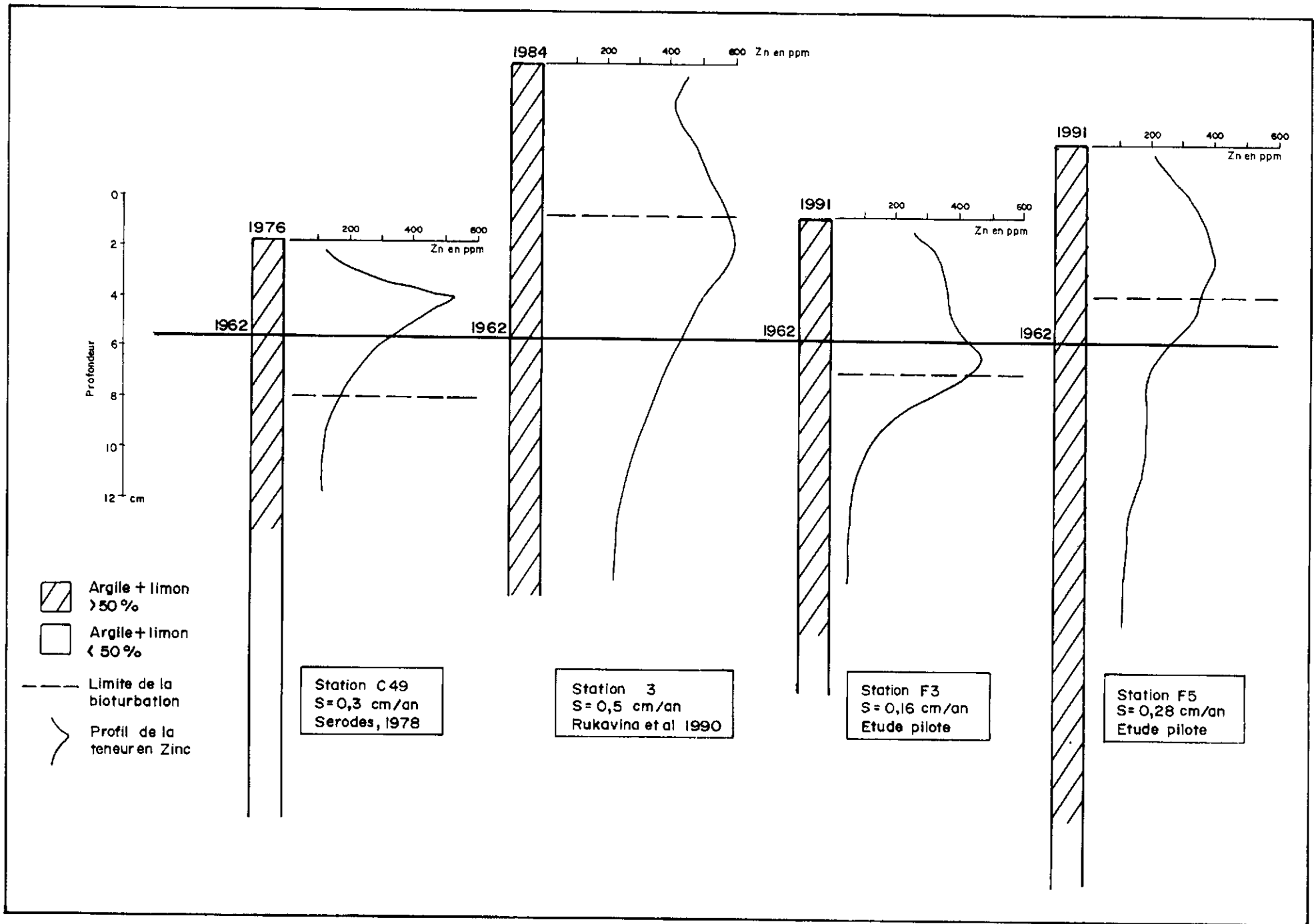


Figure 4.26 Profils de carottes de sédiment de 1976, 1984 et 1991

Pour chacune des carottes, les taux de sédimentation se situent entre 0,16 cm/an et 0,5 cm/an. La faible variation du taux de sédimentation, entre 1978 et 1984 (+0,2 cm/an) et entre 1984 et 1991 (-0,3 cm/an), ne semble pas indiquer de changement majeur dans l'apport en particules fines dans le bassin démontrant ainsi une certaine stabilité de la sédimentation dans le temps.

Les profils de zinc montrent une augmentation des teneurs jusqu'à une profondeur variant entre 5 et 7 cm, à l'exception de la carotte prélevée par Sérodes qui augmente plus rapidement jusqu'à 3 cm de profondeur. Les teneurs diminuent ensuite avec la profondeur. L'épaisseur de sédiment où il y a augmentation des teneurs de zinc (5 à 7 cm) semble correspondre avec l'épaisseur de la limite de bioturbation définie par Rukavina *et al* (1990) qui est de 5,3 à 6,2 cm. Cependant, les profils du Pb-210 semblent montrer une déformation du profil dans les premiers 3 cm. Cette déformation correspond selon Larsen et Jensen (1989) à la zone remaniée. La différence entre l'épaisseur de la zone remaniée, calculée d'après le profil du zinc et l'épaisseur de la zone remaniée calculée d'après le profil du Pb-210 peut s'expliquer par le fait que le flux de contaminant n'a pas été constant au cours des dernières années contrairement au flux de Pb-210 qui est constant dans le temps.

La forme générale des profils de zinc dans la zone de bioturbation semble en accord avec le modèle diagénétique du Mn établi pour les sédiments du golfe et de l'estuaire (Silverberg et Sundby, 1990). Ce modèle prédit une augmentation de la surface vers le bas des teneurs de Mn dans la zone oxydée et une diminution moins rapide des teneurs dans la zone réduite. Les deux zones étant sous l'influence de la biodiffusion (Berner, 1980).

Nous croyons que les teneurs élevées de zinc contenu dans le sédiment sont continuellement remobilisées par les organismes et les plantes benthiques qui entraînent par le fait même une quantité importante d'oxygène dans les 5 à 7 premiers cm de sédiments, favorisant le processus d'oxydation jusqu'à la limite physique de la bioturbation. Ceci entraîne une augmentation des teneurs en zinc disponible et possiblement de d'autres paramètres jusqu'à cette limite (figures 4.23 et 4.24).

Enfin, malgré l'accumulation annuelle de sédiments (entre 0,17 et 0,5 cm), les processus de bioturbation et d'oxydo-réduction pourraient être suffisants pour permettre au zinc de migrer vers la limite de bioturbation. Cependant, pour déterminer avec certitude l'évolution temporelle de la contamination à une station donnée, il faut connaître la sensibilité de cette station. Cette sensibilité est déterminée par les facteurs suivants (selon Larsen et Jensen, 1989) :

- taux d'accumulation moyen;
- changement du taux d'accumulation;
- épaisseur et intensité du remaniement (biologique et physique);
- épaisseur analysée;
- précision des analyses.

## 5. INTERPRÉTATION GLOBALE ET DISCUSSION

Ce chapitre présente l'interprétation globale des résultats touchant la qualité générale des sédiments, le bilan massique des différents contaminants et la dynamique sédimentaire.

### 5.1 Qualité générale des sédiments

A l'aide des critères de qualité des sédiments établis en collaboration entre Environnement Canada et le MENVIQ (Procéan 1991), nous avons calculé un indice de qualité pour les paramètres inorganiques. Nous n'avons pas calculé d'indice de qualité des paramètres organiques à cause du nombre insuffisant d'échantillons analysés pour ces paramètres. L'équation de l'indice de qualité est identique à celle utilisée par Champoux et Sloterdijk (1988):

$$I_c = \frac{\sum_{i=1}^K \frac{\text{(teneur)}_i}{\text{(critère)}_i}}{K}$$

où K est égal au nombre de paramètre. Les paramètres synthésisés dans le calcul de l'indice sont:

- Cuivre;
- Zinc;
- Plomb;
- Cadmium;
- Chrome;
- Nickel;
- Arsenic.

Comme certaines données d'arsenic sont parfois manquantes, K varie de 6 à 7 selon les stations.

Lorsque la valeur de l'indice est inférieure à 1, on doit considérer qu'en moyenne les teneurs sont inférieures aux critères. Lorsque l'indice est supérieur à 1, les sédiments doivent être considérés comme contaminés.

La figure 5.1 présente la répartition spatiale de la valeur de l'indice de qualité des paramètres inorganiques.

L'indice de qualité nous montre qu'environ le quart de la zone d'étude-pilote est recouvert de sédiments contaminés par les métaux ou l'arsenic. Quatre zones sont caractérisées par un indice de qualité supérieur à 1. La zone la plus contaminée se situe dans la partie nord-est de la zone d'étude et touche la pointe de Claire. La contamination est principalement causée par des teneurs très élevées en arsenic.

Les trois autres zones de contamination cartographiées, contrairement à la zone décrite précédemment, sont causées par des teneurs élevées de l'ensemble des paramètres inorganiques et principalement du cuivre, du zinc et du cadmium. Deux de ces zones se retrouvent dans la zone centrale d'accumulation du faciès de silt et d'argile. L'autre zone correspond à des échantillons provenant du chenal profond situé entre l'île Dowker et la rive sud de l'île de Montréal.

Il serait cependant hasardeux de comparer cette carte avec la carte d'indice de contamination présentée par Champoux et Sloterdijk (1988) à cause des restrictions suivantes:

- l'indice de Champoux et Sloterdijk a été calculé avec deux paramètres supplémentaires soit le cobalt et les BPC;
- les critères de qualité utilisés par ceux-ci sont différents;
- la méthode de digestion des métaux est différente. Ils ont utilisé une digestion totale et nous avons utilisé une digestion partielle (non résiduelle, voir section 4.2.1).



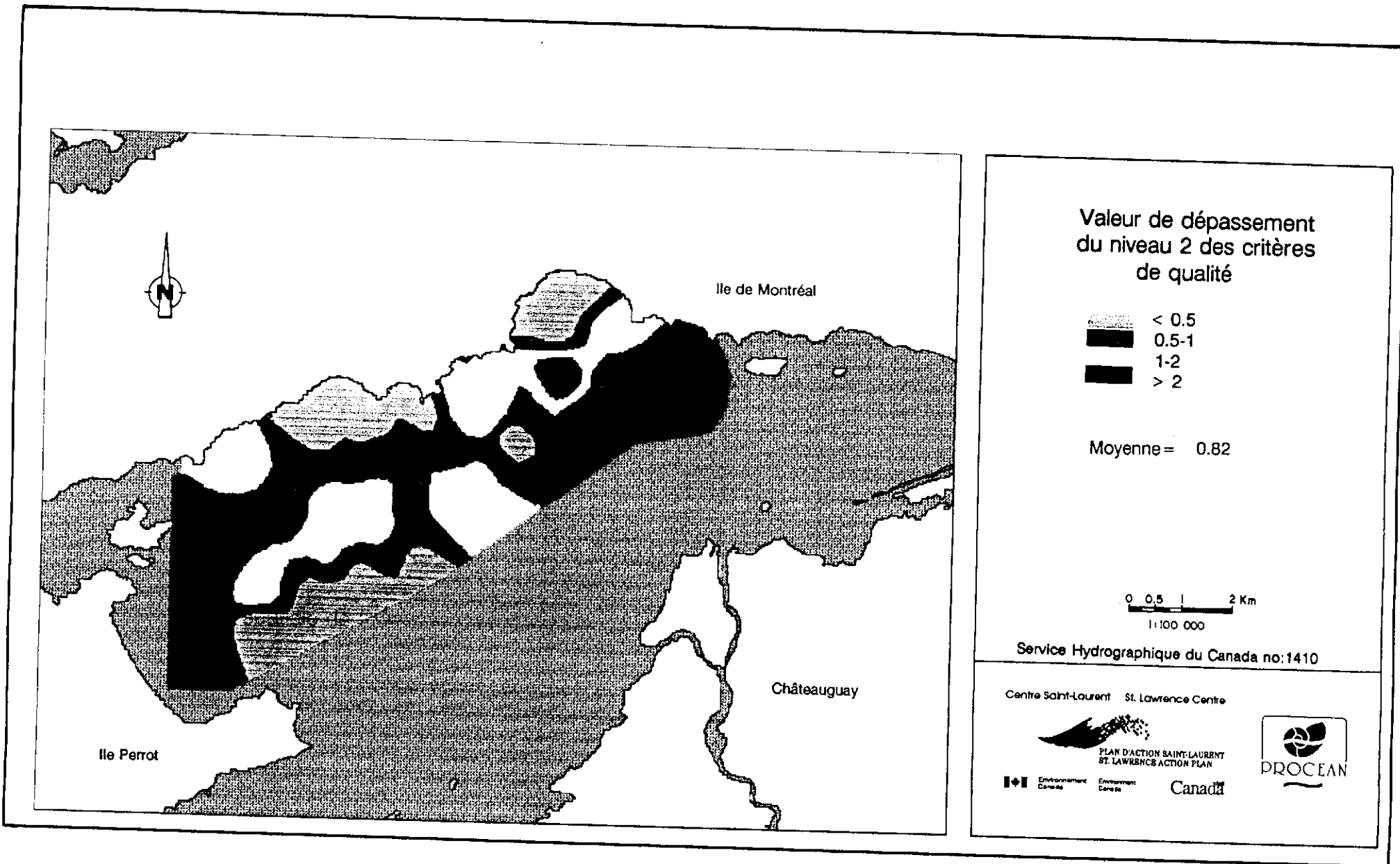


Figure 5.1 Répartition spatiale de l'indice de qualité (paramètres inorganiques)

Il existe cependant une correspondance dans la localisation de la zone centrale et de la zone située près de la Pointe Claire (arsenic). Cependant, l'indice maximal de Champoux et Sloterdijk est nettement plus au nord que les zones centrales localisées dans ce rapport. Cette différence vient du fait que les BPC font partie du calcul de l'indice et que les critères utilisés sont très bas.

La zone contaminée située à l'extrême ouest notée en 1991 n'était pas présente en 1988. La présence de cette zone en 1991 semble indiquer une certaine continuité entre l'apport de la rivière des Outaouais et la zone d'accumulation centrale.

## 5.2 Bilan massique des contaminants

Le bilan massique des différents contaminants de la zone d'étude a été réalisé en suivant la méthodologie présentée à la section 3.7.5. Le lecteur pourra se référer aux sections 4.1.6 et 4.2.3 pour vérifier le détail de l'estimation de l'épaisseur de la zone contaminée du calcul de la concentration.

Le tableau 5.1 présente le bilan de masse des contaminants associés aux sédiments récents de la zone d'étude du lac Saint-Louis. Il faut bien noter ici que la masse d'un paramètre se réfère à la quantité de métaux non-résiduels pour le Cu, Zn, Pb, Cd et Ni. La teneur moyenne des contaminants a été calculée en divisant la masse par le volume de sédiments contaminés (4 895 098 m<sup>3</sup>). Parmi les teneurs moyennes calculées, seul l'arsenic a une teneur dépassant le niveau 2 (seuil d'effet mineur) des critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (C.S.L., 1992). Soulignons toutefois que ces critères sont définis pour des teneurs de métaux totaux. Ainsi, afin de pouvoir permettre une comparaison avec les critères de qualité, nous avons estimé les teneurs moyennes totales en Cu, Zn, Pb, Cd, Ni et Cr en utilisant le % NR défini à la section 4.2.1. Les teneurs moyennes totales estimées (tableau 5.1) sont supérieures au niveau 2 des critères pour le chrome et le zinc mais ne dépassent pas le niveau 3 (seuil d'effet néfaste) des critères (C.S.L., 1992).

Tableau 5.1

Masse des contaminants associés aux sédiments récents de la zone d'étude-pilote

<u>Contaminants</u>	<u>Masse (kg)</u>	<u>Teneur moyenne fraction non-résiduelle PPM</u>	<u>Teneur moyenne calculée fraction totale PPM</u>	<u>Charge annuelle totale (dissoute et particulaire) Ste-Anne-de Bellevue (en kg/an) *</u>
Arsenic	649	8.0		
Cadmium	55	0.7	0.8	
Cuivre	1 150	14.2	26	21,170
Chrome	1 149	14.2	95	
Nickel	593	7.3	24	12,775
Plomb	1 701	21.1	31	13,140
Zinc	10 718	132	216	39,785
BPC	0.3	.004		
HAP	24	0.3		

\* selon INRS-Asseau (1992)

À titre comparatif, nous avons reporté sur le tableau 5.1 la charge annuelle de certains contaminants apportés par la rivière des Outaouais dans le bras passant au nord de l'île Perrot à Ste-Anne-de-Bellevue tel que calculé par INRS et Asseau (1992). Les charges présentées ne contiennent pas les charges municipales et la charge introduite par le fleuve Saint-Laurent. En effet, les charges municipales sont à toute fin pratique négligeable et la charge fluviale d'après les données présentées à la section 2.4 ne semble pas affecter la zone d'étude. La charge annuelle totale présentée regroupe la fraction particulaire et la fraction dissoute. On observe que la plus importante quantité de métaux transportés par la rivière est le Zn avec 39 785 kg/an. D'autre part, pour le bassin de sédimentation de la zone d'étude pilote, le zinc est également le métal ayant la plus grande masse cumulée avec 10 718 kg.

### 5.3 **Dynamique sédimentaire**

La figure 5.2 synthétise les traits majeurs de la dynamique sédimentaire de la zone d'étude-pilote. On y retrouve les axes de transport sédimentaire, les zones d'accumulation et les zones de remaniement dues aux vagues. Dans l'ensemble, le chenal de la rivière des Outaouais entre l'île Dowker et l'île de Montréal constitue la source majeure de sédiments en suspension. L'autre source importante de matériel fin est issue de l'érosion des argiles marines situées sur les rives où l'action des vagues est importante.

Les particules fines sont transportées en partie vers les bassins de sédimentation et en partie vers l'aval. Dans le bassin central de sédimentation, la sédimentation est lente et relativement peu importante avec un taux de sédimentation inférieur à 3 mm par année. Cette zone de sédimentation s'étend sur près de 28 km<sup>2</sup> et contient près de 4 000 000 de m<sup>3</sup> de sédiments. Ce volume est équivalent à 65 000 000 kg de sédiments (densité = 1,65 g/cm<sup>3</sup>). Ces sédiments ont été introduits depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle et n'inclut pas l'unité de sable très fin sous-jacent.

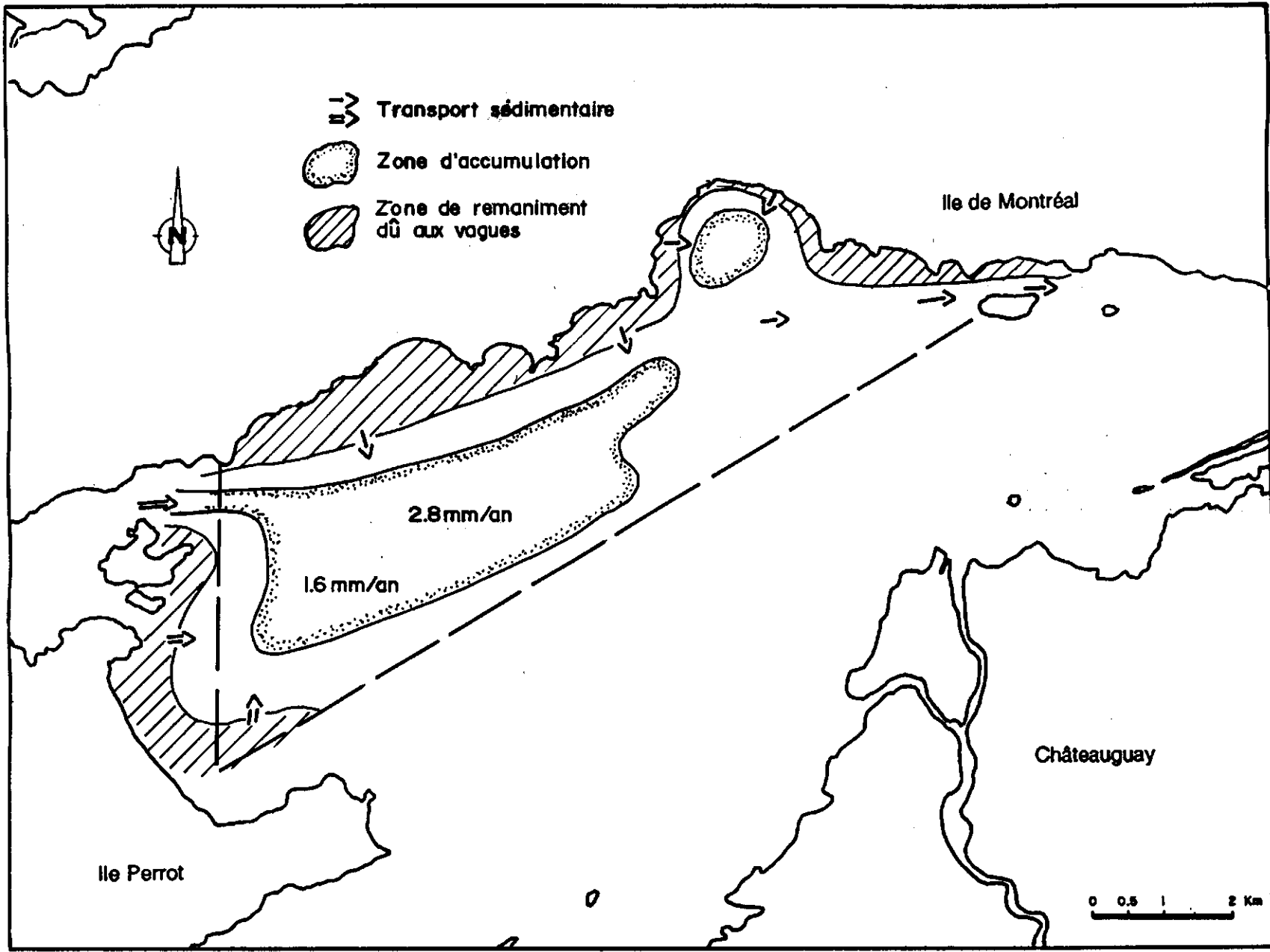


Figure 5.2 Schéma de la dynamique sédimentaire

Une autre zone de sédimentation est localisée dans la baie de Valois, là où les profondeurs sont importantes. ?! ? < aAm

Les zones riveraines sont caractérisées par une mince couche de sédiments sableux parfois graveleux laissant apparaître en certains endroits une surface d'érosion dans les argiles compactes d'origine post-glaciaire sous-jacentes. Ces sédiments grossiers sont remobilisés lors des tempêtes par les vagues générées sur le lac par le vent. Lors de ces tempêtes, les argiles peuvent être érodées et transportées vers les bassins de sédimentation ou vers l'aval.

## 6 VALIDATION DE L'APPROCHE

Ce chapitre présente l'analyse et la validation de l'approche et des différentes méthodologies utilisées lors de l'étude-pilote. La dernière section réunit les différentes modifications qui devront être envisagées dans la poursuite de l'étude.

### 6.1 Relevés acoustiques

6.1.1 **Sonar à balayage latéral** - Les relevés au sonar à balayage latéral ont fourni une information importante et complémentaire aux autres relevés et échantillonnages. Les éléments de surface suivants ont été caractérisés et localisés:

- affleurements rocheux;
- topographie (chenal, dépression, pente etc);
- changement de texture (gravier, sable, boue, argile compacte);
- couverture de macrophytes.

Bien que l'information générée demeure qualitative, l'analyse des images sonar permet de préciser les contacts (graduels ou nets) entre les différentes unités composant le fond et permet de vérifier l'interprétation des résultats de sismique réflexion.

Avec la calibration que constitue l'échantillonnage (bennes et carottes), les relevés au sonar latéral ont permis de cartographier avec une précision de l'ordre de 25 m les limites des faciès sédimentaires et des affleurements rocheux. Dans certains cas, les relevés au sonar apportent certaines indications de la présence du roc sous une faible couche de sédiments (< 10 cm).

Le sonar utilisé (Imagenex) a permis une couverture totale de 120 m (60 m de chaque côté du transducteur) et ce à des profondeurs supérieures à 2 m. Cependant, les parties les plus éloignées du transducteur ne deviennent très précises qu'à partir de 5 m de profondeur.

La présence de macrophytes dégrade beaucoup la qualité des images sonar. Ainsi lors des relevés environ 50% de la superficie couverte était affectée par la

présence de macrophytes. Lorsqu'ils sont présents en grande quantité, les macrophytes coupent complètement la réflexion sur le fond sédimentaire et les images deviennent inutilisables du moins pour la caractérisation des faciès sédimentaires.

Un des problèmes majeurs notés avec le sonar à balayage latéral est qu'il ne pouvait être utilisé simultanément avec la sismique réflexion à cause des interférences causées par la sismique réflexion (section 3.3.4). Ce problème engendre un dédoublement du kilométrage de relevés à effectuer.

**6.1.2 Réflexion sismique** - La résolution maximale obtenue avec l'instrumentation utilisée (Biosonics 102) varie de 15 à 20 cm et dépend d'une foule de facteurs reliés principalement à la nature et aux discontinuités physiques du sédiment et des conditions générales du milieu (profondeur et couverture par les macrophytes). Cette limite constitue jusqu'à maintenant la meilleure résolution obtenue avec l'appareillage de réflexion sismique conventionnelle sur le marché.

La fréquence utilisée (38 KHz) nous apparaît être le meilleur compromis entre la résolution recherchée (10 cm) et la pénétration minimale nécessaire (1 m).

Il est possible que d'autres systèmes en développement tel que le Datasonics Chirp puissent améliorer la performance obtenue avec le Biosonics 102. Cependant ces systèmes devront prouver leur fiabilité et être facilement utilisables par une équipe technique qualifiée sans être formée par la compagnie fabricant le système.

Dans les limites techniques de l'appareillage utilisé, la sismique réflexion s'est avéré être une méthode indispensable au calcul des volumes de sédiments récents et à l'évaluation du bilan de masse des contaminants. Cependant, une grande imprécision caractérise ces différents calculs dans les zones où l'épaisseur de sédiments récents est inférieure à la limite de résolution.

Comme pour les relevés au sonar latéral, la présence de macrophytes sur plus de 50% des relevés a grandement limité l'utilisation des enregistrements puisqu'à ces endroits les réflecteurs disparaissent complètement.



En l'absence de macrophytes, l'information obtenue permet de suivre les réflecteurs et de quantifier de façon continue l'épaisseur des sédiments récents lorsque celle-ci dépasse la limite de résolution et lorsque les discontinuités physiques du sédiment sont marquées. En couplant les relevés sismiques avec les relevés au sonar à balayage latéral et les sondages, on obtient ainsi une information de haute précision sur les variations texturales de surface et la stratigraphie. En plus de l'information sur la stratigraphie superficielle, les enregistrements permettent en plusieurs endroits une interprétation de la stratigraphie post-glaciaire et de la topographie du toit rocheux venant ainsi confirmer certains affleurements du roc ou la présence en surface d'argiles compactes d'origine glacio-marines ou glacio-lacustres.

Le carottage de calibration effectué lors des relevés sismiques est indispensable à la calibration des relevés sismiques. Lors de l'étude-pilote, le carottage s'est avéré insuffisant (5 stations) compte tenu du kilométrage effectué. Bien que le carottage avec le carottier à gravité puisse comprimer l'échantillon, il permet de confirmer la présence des réflecteurs identifiés par la sismique réflexion.

**6.1.3 Bathymétrie** - Bien que les relevés bathymétriques complémentaires ne soient pas indispensables à l'étude des zones d'accumulation, ils ont permis de valider l'interface eau/sédiments enregistrés par la sismique réflexion.

## **6.2 Positionnement**

Le système GPS utilisé a fourni des résultats acceptables compte tenu de la précision recherchée (< 10 m). Ce système est relativement facile d'opération et son coût d'opération est beaucoup moindre que les systèmes de positionnement par micro-ondes qui nécessitent l'installation et l'entretien de plusieurs stations terrestres (2 ou 3). Pendant la campagne de 1991, la couverture des satellites était disponible de 8:00 le matin à 20:00 le soir. En 1992, la couverture sera de 24 heures par jour.

Le système peut opérer selon trois (3) modes différents d'opération (voir section 3.2). En mode dynamique, le mode différentiel a été utilisé avec une seule station terrestre. Celle-ci permet de faire des relevés dans un rayon de 100 km et son autonomie est de 24 heures.

### **6.3 Échantillonnage de surface**

Bien que la benne utilisée (Shipek 860) s'est avérée être d'utilisation très facile, elle possède deux limitations majeures. Premièrement, cette benne ne pénètre que d'environ 10 à 15 cm dans le sédiment. Cette faible pénétration diminue de beaucoup l'information stratigraphique puisqu'elle ne permet pas de mesurer les couches de surface supérieures à 10 cm et d'identifier les sédiments sur lesquels reposent la couche superficielle.

Deuxièmement, cet échantillonneur remanie l'échantillon à cause de la forme de sa soucoupe. Il est difficile de voir l'échantillon en place et de le sous-échantillonner en fonction de la stratigraphie présente. Sur les substrats plus durs tel que le sable et les argiles compacts, cet échantillonneur pénètre difficilement ou lorsqu'il pénètre l'échantillon résultant est souvent renversé et remanié (Mudroch et MacKnight, 1991). Ce remaniement de l'échantillon rend la description sédimentologique et stratigraphique difficile.

### **6.4 Forage**

Quoique seulement trois stations aient été forées, les carottes récupérées ont fourni une foule de renseignements sur l'évolution historique du bassin sédimentaire et les apports de contaminants. La foreuse utilisée (Rossfelder) s'est avérée très performante dans les sédiments fins compacts et mous. La pénétration était aussi excellente, celle-ci variant de 65 à 133 cm dont souvent plus du tiers dans les argiles compactes glacio-marines.

La représentativité de la carotte par rapport à la stratigraphie in situ est plus difficile à évaluer. Les radiographies ont montré très peu de laminations horizontales ce qui rend l'évaluation du remaniement difficile. Toutefois les contacts entre les unités de boue et de sable étaient horizontaux. L'examen visuel lors de l'extrusion n'a pas permis de détecter un remaniement si ce n'est sur quelques millimètres au contact du tube.

Les carottes récoltées par enfoncement d'un tube par plongée ont montré des différences parfois importantes dans les premiers cm avec les carottes prélevées avec le Rossfelder. Cependant, à part les données radio-isotopiques, aucune autre donnée ne nous a été fournie par l'INRS-Eau qui nous aurait permis de faire une véritable évaluation comparative des deux techniques de forage. Cependant selon Rutledge et Fleeger (1988) cité dans Baudo *et al* (1990) le carottage par plongée n'est pas nécessairement meilleur que les autres techniques de forage pour récolter des carottes non remaniées.

Les enregistrements vidéos tournés par Environnement Canada montrent que dans tous les cas qu'il faut être très méticuleux dans la manipulation du carottier Rossfelder en début de forage.

## 6.5 Tomodensitométrie

Les radiographies des carottes par tomodensitométrie ont fourni une information très importante pour la caractérisation stratigraphique du bassin de sédimentation. Cette technique permet de voir toutes les structures souvent invisibles à l'œil nu (voir section 4.1.6) et quantifie la densité in situ du sédiment. Étant donné que les variations verticales dans les zones d'accumulation sont parfois très faibles, la tomodensitométrie s'avère être probablement le seul outil performant pour bien visualiser ces faibles différences verticales.

## 6.6 Analyses

6.6.1 **Paramètres physiques** - L'analyse granulométrique, l'analyse du carbone organique et la mesure de la densité et de la teneur en eau sont essentiels à la compréhension et à la cartographie des zones d'accumulation. L'analyse granulométrique réalisée au  $\frac{1}{2}$  phi permet l'étude modale des différentes populations granulométriques. Une analyse plus détaillée au  $\frac{1}{4}$  de phi aurait cependant permis une étude plus extensive.

Une analyse de la minéralogie aurait pu expliquer certaines différences de contamination et, dans certains cas, préciser l'origine des faciès sédimentaires.

6.6.2 **Analyses chimiques** - La sélection des échantillons et des types d'analyses à réaliser a été basée dans cette étude-pilote sur trois éléments principaux:

- l'analyse de données antérieures sur la contamination et la sédimentologie;
- la description visuelle des échantillons (forage et benne);
- le coût global.

En théorie cette sélection aurait dû être basée, en plus, sur l'analyse physique des échantillons (granulométrie, COT, densité). Cependant les délais analytiques n'ont pas permis d'en tenir compte.

Quant aux paramètres à analyser dans le cadre de l'étude-pilote, nous croyons que la démarche utilisée, à l'exception du fait que les résultats physiques n'ont pu être pris en compte, est la démarche la plus judicieuse puisqu'elle combine l'ensemble de l'information disponible et optimise les ressources financières disponibles à la réalisation du mandat.

Dans l'analyse des métaux, l'analyse de la fraction non-résiduelle a été retenue comme étant l'analyse standard de la fraction disponible des métaux. Le calcul du rapport de la fraction non-résiduelle sur la fraction totale dans le présent rapport permettra la comparaison entre les données historiques et les nouvelles données.

**6.6.3 Analyses radio-isotopiques** - Les analyses radio-isotopiques réalisées lors de cette étude-pilote (Cs 137, Pb 210 et Be 7) couvrent toute la gamme chronologique du très récent à plus de 100 ans. Comme dans cette étude, ces analyses doivent cependant être reliées aux analyses physiques et chimiques et à une bonne description stratigraphique sinon elles ne peuvent pas être interprétées correctement.

## **6.7 Traitement et cartographie**

**6.7.1 Paramètres physiques de surface** - La modélisation et la cartographie des données effectuées sur le logiciel SPANS pour les données granulométriques de surface n'a pas donné des résultats très probants. En effet, l'interprétation et la cartographie finale impliquent la synthèse de plusieurs autres paramètres importants tel que la bathymétrie, la stratigraphie locale, les particularités de l'échantillonnage, etc. En fait, il s'agit essentiellement de l'expérience et de la connaissance du milieu qui ne peuvent être rationalisées sous forme de modèle mathématique.

Lors de l'analyse des données sédimentologiques, nous avons d'abord dressé une carte préliminaire des classes de taille granulométrique de surface (% sable et gravier, % silt, % argile) et du COT. Nous avons ensuite superposé cette carte à la carte des modes granulométriques, à une carte bathymétrique, à la description de terrain des bennes de surface et à la carte des données fournies par le sonar latéral. L'interprétation globale de ces données nous a conduit à la carte des faciès sédimentaires.

**6.7.2 Paramètres chimiques de surface** - Pour ce qui est des résultats d'analyse chimique, nous avons procédé par modélisation sur SPANS pour les raisons suivantes:

1. les sources de contamination diffuses ou ponctuelles sont relativement peu connues et mal localisées, on ne peut donc se servir de cette information pour faire l'interprétation;
2. les relations entre la capacité de rétention des contaminants et le sédiment sont relativement mal connues et la correspondance avec d'autres zones d'accumulation ne peut être utilisée (réf. Rukavina *et al*, 1990).

En somme, à défaut de bien connaître les deux éléments mentionnés, il est préférable d'utiliser une modélisation homogène pour l'ensemble de la zone d'étude. En ce sens, la méthode de traitement utilisée pour les paramètres chimiques semble être l'approche introduisant le moins de biais scientifique.

**6.7.3 Évolution historique** - La représentation combinée de tous les profils disponibles (physiques, chimiques, radio-isotopiques) est probablement le meilleur outil d'interprétation et de quantification disponible. Jointe aux radiographies et photographies, cette représentation permet de synthétiser la stratigraphie, l'évolution sédimentologique et l'évolution chimique du bassin d'accumulation.

## **6.8 Modifications de l'approche**

Dans l'ensemble l'approche préconisée demeure valable pour atteindre les objectifs recherchés. La figure no 6.1 présente de façon schématique la séquence des différentes activités d'échantillonnage et d'analyse. Cependant les modifications suivantes devraient être apportées pour optimiser la qualité des données:

### Relevés acoustiques

- Les relevés devront être exécutés nécessairement peu de temps après la crue de mai de façon à éviter la croissance des macrophytes;
- Les transducteurs du sonar à balayage latéral et de la sismique réflexion devront être positionnés et synchronisés de façon à pouvoir être utilisés simultanément. En effet, il est possible d'enlever les problèmes

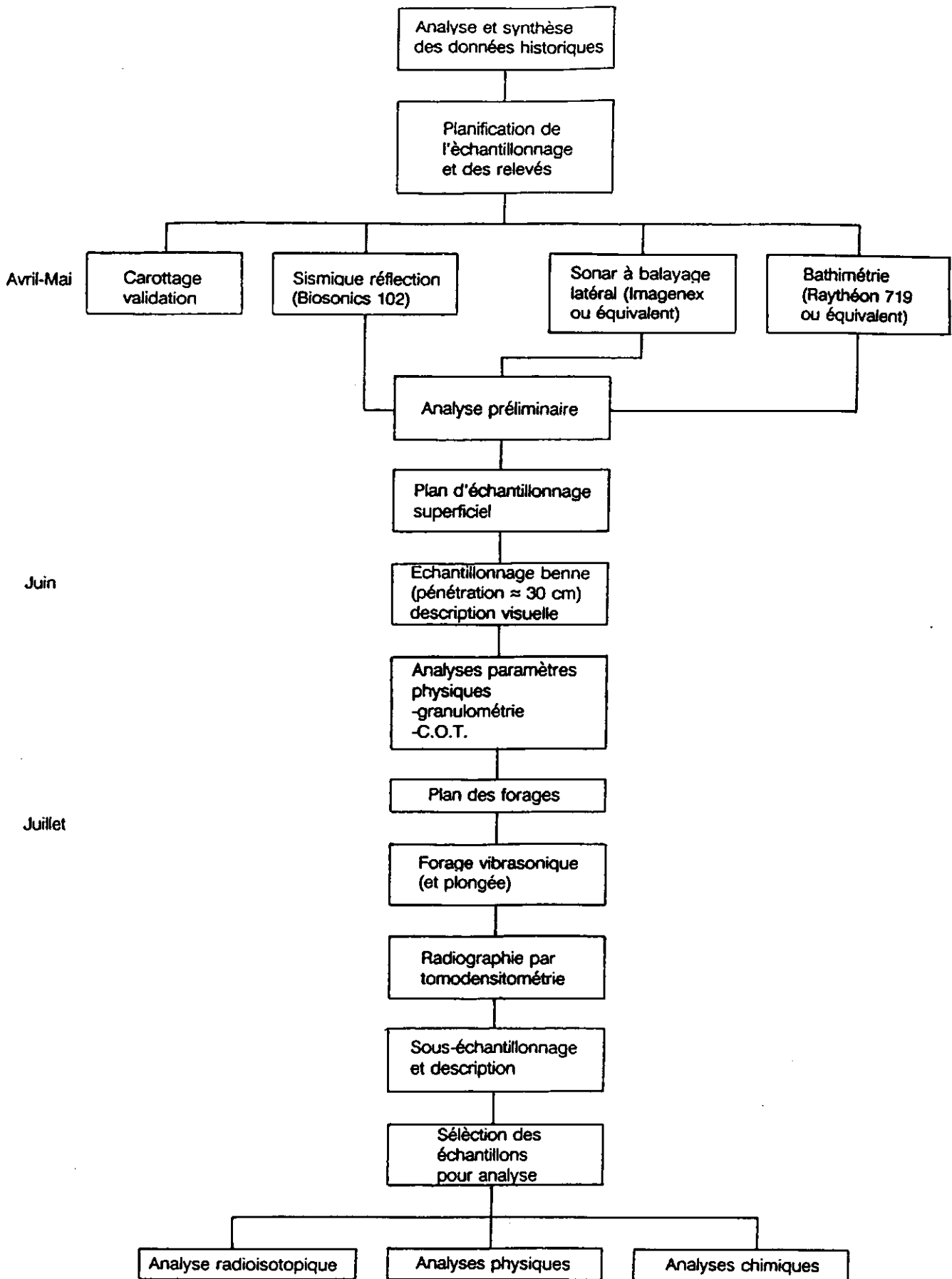


Figure 6.1 Approche méthodologique d'échantillonnage et d'analyse des zones d'accumulation potentielles du fleuve Saint-Laurent

d'interférence en éloignant les transducteurs l'un de l'autre (avant-arrière du bateau) et en décalant l'émission du signal;

- Le carottage de calibration devra être plus dense. Nous recommandons un site de carottage par lignes relevées.

#### Échantillonnage de surface

- La benne Shipek devra être changée pour une benne de plus forte pénétration ( $\pm 30$  cm) et permettant une description visuelle et un sous-échantillonnage stratigraphique. Nous recommandons à cet effet une benne lourde de type Van Veen ou Ponar.
- Dû à l'importance que revêt l'information stratigraphique lors de la campagne de relevés nous recommandons que toutes les descriptions et le sous-échantillonnage soit réalisé par un professionnel compétant (géologue, sédimentologue, géomorphologue).

#### Forage

- A cause de l'importance de l'information historique récoltée pour chaque carotte, nous recommandons d'augmenter le nombre de forages. Les plus petites zones de sédimentation devront être caractérisées par au moins trois forages au minimum. Pour des zones d'accumulation plus grandes, nous recommandons une densité de 1 forage par 5 km<sup>2</sup> (cette densité aurait représenté 6 forages pour la zone pilote);
- Nous recommandons de conserver la foreuse Rossfelder pour les forages futurs. Cependant un plongeur devra être présent dans l'eau de façon à vérifier les opérations et éliminer tout échantillon qui pourrait être mal échantillonné. De plus, ce même plongeur pourra intervenir en cas de bris sous l'eau.



### Analyses

- L'analyse des paramètres physiques devra être réalisée dans un premier temps afin de sélectionner les échantillons pour les analyses chimiques;
- L'analyse granulométrique pourra être réalisée en utilisant des classes au quart de phi de façon à pouvoir bien identifier les différents modes granulométriques;
- Nous recommandons de faire quelques analyses minéralogiques de façon à pouvoir expliquer certaines variations du contenu en contaminants;
- Pour l'analyse des métaux nous recommandons de prendre comme standard la fraction non-résiduelle. Quelques analyses parallèles de la fraction totale pourront être réalisées pour vérifier le rapport non-résiduel/total.

### Traitement et cartographie

- La modélisation sur un logiciel de type SPAN devra être utilisée surtout pour les données chimiques; les données physiques devront être interprétées mensuellement avec les autres résultats.

## 7 PLANIFICATION DES ACTIVITÉS

Dans le but de pouvoir planifier les activités de terrain pour la poursuite du projet, nous avons élaboré un plan d'échantillonnage. Il est orienté de manière à obtenir une information détaillée et de haute résolution sur les zones d'accumulation identifiées dans les études antérieures. Il est établi en fonction des paramètres affectant la répartition des contaminants comme l'hydrodynamique, la bathymétrie, la sédimentologie et la proximité des sources et tributaires. Il permet aussi d'intégrer les différentes approches définies par l'étude-pilote afin de pouvoir maximiser la cueillette d'information.

### 7.1 Description des données historiques

Les données chimiques historiques utilisées pour définir le plan d'échantillonnage comprenaient les travaux de Champoux et Sloterdijk (1988) pour le lac St-Louis, de Sérodes (1978) pour le tronçon fluvial et à l'étude de Hardy *et al* (1991) dans le secteur du delta de Sorel et du lac Saint-Pierre (figure 7.1). Les travaux de Rukavina *et al* (1990) et de Frenette *et al* (1989) ont également servi à définir l'emplacement des relevés et des échantillons.

**7.1.1 Variabilité spatiale** - L'étude de la variabilité spatiale des contaminants fut réalisée à l'aide d'une approche géostatistique (voir méthodologie section 3.7.2). De façon conventionnelle, la représentativité d'un échantillon est donnée par le rayon d'un cercle d'influence autour de cet échantillon. Le choix du rayon d'influence est souvent arbitraire et est plus souvent fonction de la distance entre les échantillons que des variations intrinsèques. Toutefois, ce rayon d'influence n'est pas le seul paramètre pouvant caractériser la représentativité d'un échantillon. Le degré de changement avec la distance est également un facteur à considérer et en particulier le niveau de bruit associé aux valeurs mesurées.

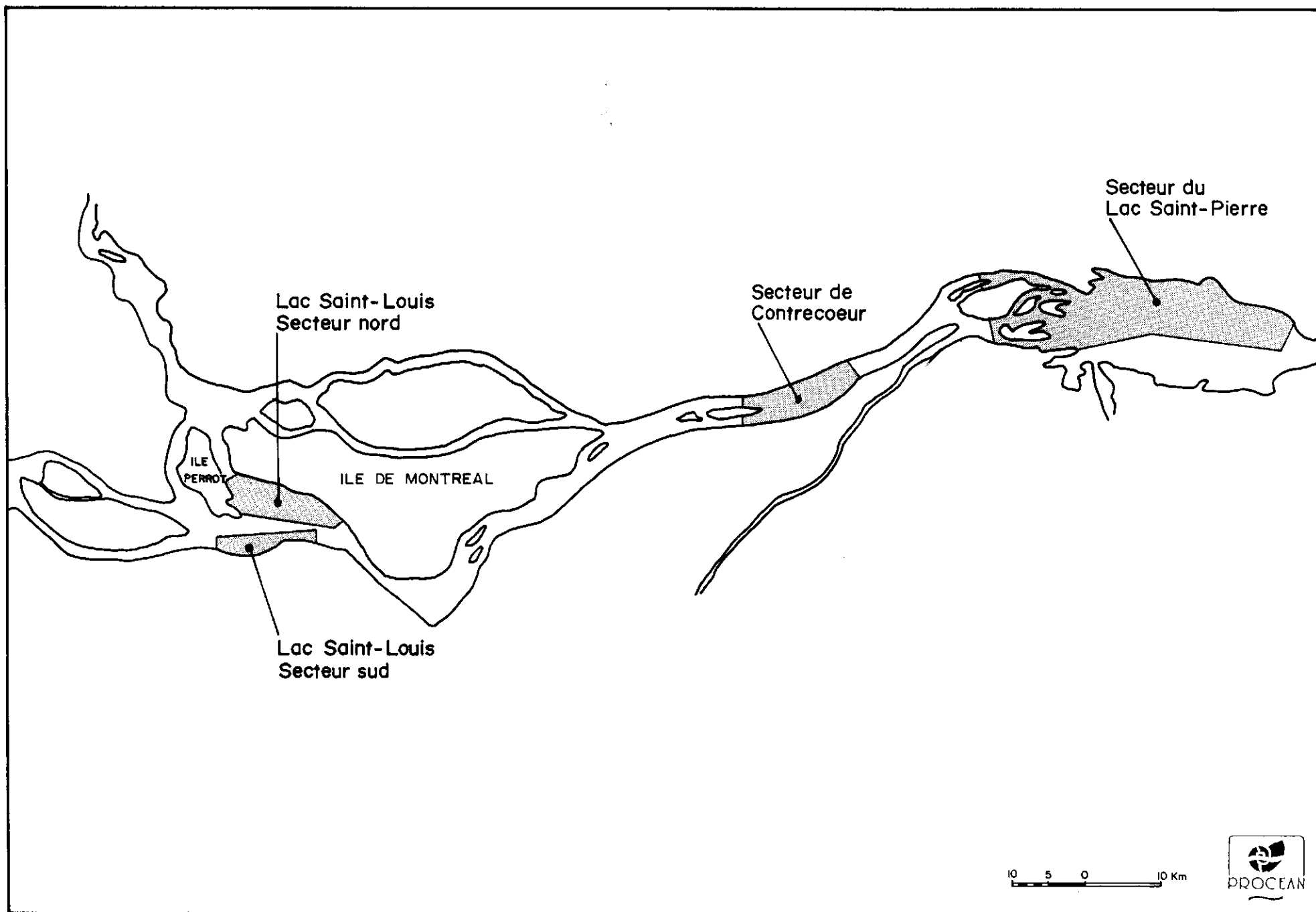


Figure 7.1 Localisation des données historiques

Le variogramme est un outil géostatistique qui permet d'analyser la représentativité d'un échantillon en montrant l'accroissement des différences entre les échantillons en fonction de la distance qui les sépare. Ainsi, le rayon d'influence sera défini par la portée du variogramme et le niveau de bruit par l'effet de pépité.

La représentativité d'un échantillon n'est pas la même pour toutes les valeurs mesurées. Autrement dit si le rayon d'influence du mercure est de 200 m celui du chrome peut être seulement de 100 m. On obtient donc un variogramme pour chaque paramètre mesuré.

Pour une mesure donnée, la représentativité d'un échantillon n'est pas la même partout dans la zone échantillonnée. Dans la zone du chenal de navigation on s'attend à une longue portée dans la direction d'écoulement. De part et d'autre du chenal, on peut s'attendre à des zones d'influence plus circulaires mais le rayon de ces cercles n'est pas nécessairement le même au nord qu'au sud du chenal. Avant de procéder au calcul des variogrammes il est donc important de séparer les échantillons en zones à-priori homogènes avec cependant suffisamment de données dans chaque zone pour déterminer le variogramme de cette zone.

Les variogrammes furent calculés pour les secteurs nord et sud du lac Saint-Louis et pour les secteurs de Contrecoeur et du lac Saint-Pierre (figure 7.1). Le tableau 7.1 présente les résultats obtenus par la modélisation de ces variogrammes ainsi que l'étendue de la distribution des teneurs (minimum, médiane, maximum) pour chacun des paramètres analysés.

Comme l'on démontré les travaux de Champoux et Sloterdijk (1988), les sédiments du secteur sud du lac Saint-Louis sont particulièrement contaminés en mercure. Cette substance provient principalement d'une usine de chlore-alcali de la région industrielle de Beauharnois. L'étude géostatistique met en relief cette source proximale de contamination en définissant des portées géochimiques relativement courtes. Tous les paramètres à l'exception du plomb (1,1 km) présentent une portée inférieure à 1 km. Le mercure et le chrome sont caractérisés par des portées plus courtes (0,5 km). La portée moyenne de tous les paramètres est de 0,7 km. Les teneurs

TABLEAU 7.1 VARIABILITÉ SPATIALE DES DONNÉES HISTORIQUES

SECTEUR NORD DU LAC SAINT-LOUIS											
	Ni	Cu	Cd	Hg	Zn	Cr	Pb	As	COT*	BPC	HAP
Nombre d'échantillon	32	27	10	29	32	22	32	32	31	20	9
Minimum (ppm)	9	7	0.01	0.01	37	54	10	0.01	0.4	0.01	0.01
Médiane (ppm)	38	32	1	0.26	200	143	40	2.6	2	0.02	0.69
Maximum (ppm)	99	131	4.6	0.53	533	179	138	32.7	6.1	0.66	3.48
Effet pépité (ppm)	---	---	na	0.05	---	na	---	0.5	---	na	na
Variance (ppm)	17	16	na	0.13	143	na	18	1.5	1.1	na	na
Portée (km)	1.1	1.2	na	1.5	1.1	na	1.2	2.5	1.2	na	na
SECTEUR SUD DU LAC SAINT-LOUIS											
	Ni	Cu	Cd	Hg	Zn	Cr	Pb	As	COT*	BPC	HAP
Nombre d'échantillon	24	21	9	24	24	23	24	24	24	14	6
Minimum (ppm)	8	9	0.6	0.05	24	44	11	0.01	0.6	0.01	0.32
Médiane (ppm)	34	35	1	1.2	150	84	33	5.3	4.7	0.02	0.87
Maximum (ppm)	77	105	14	34.9	686	150	101	23.4	8.4	0.39	3.7
Effet pépité (ppm)	---	---	na	---	---	---	---	1.4	---	na	na
Variance (ppm)	12	23	na	1.3	64	46	27	5.3	1.9	na	na
Portée (km)	0.8	0.8	na	0.5	0.7	0.5	1.1	0.7	0.9	na	na
SECTEUR NORD DU LAC SAINT-PIERRE											
	Ni	Cu	Cd	Hg	Zn	Cr	Pb	As	COT*	BPC	HAP
Nombre d'échantillon	36	36	35	36	36	36	36	36	36	35	21
Minimum (ppm)	10	3	0.01	0.01	44	33	7.6	0.3	0.07	0.01	0.01
Médiane (ppm)	30	39	0.01	0.12	138	97	27	2.4	0.94	0.07	0.2
Maximum (ppm)	103	122	1.14	0.44	304	314	125	4.2	3.81	0.31	2.7
Effet pépité (ppm)	---	---	na	---	---	---	10	0.6	0.22	---	---
Variance (ppm)	12	21	na	0.1	84	25	23	0.8	0.7	0.07	0.6
Portée (km)	3	1.6	na	2	1.3	1.5	1.5	1.4	1.3	1.8	4.5
SECTEUR DE CONTRECOEUR											
	Ni	Cu	Cd	Hg	Zn	Cr	Pb	As	COT*	BPC	HAP
Nombre d'échantillon	18	18	18	18	18	18	19		19		
Minimum (ppm)	14	10	3	0.02	57	38	5		0.19		
Médiane (ppm)	37	42	7	0.16	120	66	29		1.28		
Maximum (ppm)	65	64	10	0.69	254	139	52		2.86		
Effet pépité (ppm)	14	16	2	0.2	74	30	18		0.93		
Variance (ppm)	---	---	---	---	---	---	---		---		
Portée (km)	---	---	---	---	---	---	---		---		

\* Teneur en %

na - non applicable

médianes sont généralement égales ou supérieures au niveau 2 des critères de qualité (Procéan, 1991) indiquant que le secteur est fortement contaminé en métaux.

Dans le secteur nord du lac Saint-Louis les portées sont presque deux fois plus longues que du côté sud. Ces portées qui s'établissent entre 1,1 et 2,5 km semblent être le reflet d'une contamination plus diffuse. Les sources de contamination étant possiblement plus éloignées ou multiples. Le zinc et le nickel présentent les portées les plus courtes (1,1 km) alors que l'arsenic présente la portée la plus longue (2,5 km). La portée moyenne de l'ensemble des paramètres est de 1,4 km. Les teneurs médianes des métaux sont toutes au dessus du niveau 2 des critères de qualité à l'exception de l'arsenic.

Pour les deux secteurs du lac Saint-Louis l'effet de pépité est nul ou négligeable montrant que le niveau de bruit de fond géochimique est bien défini par l'ensemble des données utilisées.

Pour le lac Saint-Pierre, les variogrammes montrent des portées s'établissant entre 1,3 et 3 km avec une portée moyenne de 1,7 km. Les HAP font cependant exception avec une portée de 4,5 km. Cette longue portée est possiblement attribuable au faible nombre d'échantillons utilisés pour la définition du variogramme comme dans le lac Saint-Louis. L'effet de pépité est nul ou négligeable montrant que le niveau de bruit de fond géochimique est bien défini par l'ensemble des données. Les teneurs médianes en cuivre et en chrome dépassent les critères de qualité. Ce secteur est cependant moins contaminé que les secteurs nord et sud du lac Saint-Louis.

Pour le secteur de Contrecoeur, le nombre d'échantillon utilisables pour la réalisation des variogrammes était relativement faible. Il fut impossible de définir les portées géochimiques de chaque paramètre. Toutefois, on observe que les minimums, médianes et maximums sont similaires à ceux du lac Saint-Pierre à l'exception de cadmium pour lequel les techniques analytiques ont beaucoup évolué. De plus, les effets de pépité calculés nous indiquent que les teneurs de bruit de fond géochimiques se situent près des minimums mesurés.

De manière générale, on note que la portée des paramètres chimiques (principalement les métaux) varie selon l'état de la contamination présente dans les secteurs. En effet, les plus courtes portées sont observables quand les échantillons sont situés près des sources de contamination (ex: Hg dans le secteur sud du lac Saint-Louis). De plus, lorsque les teneurs médianes se situent en dessous des critères de qualité (ex. lac Saint-Pierre) la portée des différents paramètres est plus longue.

En somme, l'étude géostatistique des teneurs chimiques mesurées dans les différents secteurs du fleuve permet de conclure:

- que les structures de variabilité s'établissent entre 0,8 et 1,7 km;
- que le bruit de fond géochimique fait partie intégrante de ces structures;
- que la distance optimale entre les échantillons devrait être de 0,5 km à proximité des sources de contamination et de 1,0 à 1,5 km plus en aval de ces sources.

## 7.2 Plans d'échantillonnage

Dans le cadre de la caractérisation physico-chimique des sédiments du lac Saint-Louis au lac Saint-Pierre, le nombre d'échantillons de surface à prélever en fonction de la superficie à échantillonner doit être définie selon les objectifs du programme. Par exemple, pour des fins de restauration la densité d'échantillonnage devra être plus grande que pour une caractérisation régionale. Dans le cas présent, nous devons définir une maille d'échantillonnage qui sera utilisée afin d'obtenir des renseignements physico-chimiques d'ordre régional dans le but de dresser un bilan massique des contaminants dans les zones d'accumulation. Outre la variabilité naturelle des paramètres chimiques qui varient avec la distance comme nous l'avons présenté pour les données historiques, il ne faut pas négliger certains facteurs physiques inhérents au milieu. Ainsi, la variabilité chimique peut être influencée indirectement par les variations bathymétriques et les variations hydrodynamiques qui déterminent en grande partie la nature du sédiment.

Bien que l'on souhaite à priori établir une image parfaite de la contamination des sédiments dans un milieu, il serait utopique de vouloir étudier l'effet de tous les facteurs importants par un échantillonnage adéquat. Il faut cependant s'assurer que l'échantillonnage réalisé dans un milieu soit adapté aux variations les plus critiques des paramètres influençant les variations chimiques.

Une maille d'échantillonnage systématique permet de couvrir un territoire de manière rigoureuse. Toutefois, la densité de cette maille d'échantillonnage devra être adaptée ou ajustée en fonction des facteurs physiques importants et de la proximité des sources lorsqu'elles sont connues (échantillonnage stratifié).

Les facteurs physiques tel que la bathymétrie et l'intensité des courants pourraient être évalués quantitativement à l'aide des cartes hydrographiques des secteurs à échantillonner et des autres sources équivalentes.

Dans des conditions à faible courant, la maille d'échantillonnage devrait être reserrée de façon à bien délimiter les variations locales de la contamination. Quant à l'influence de la nature de sédiment, on peut s'appuyer sur les données obtenues par l'étude-pilote. En effet, les différentes fractions granulométriques de l'étude-pilote (tableau 4.5) montrent que leur variabilités spatiales est inversement proportionnelle à la taille des grains (portée du sable = 0,7 km; portée du silt = 1,4 km; portée de l'argile = 2,5 km). De plus les coefficients de corrélation de Kendall (tableau 4.4) indiquent que la plupart des contaminants sont associés à la fraction silteuse du sédiment.

De façon à être en accord avec ces constatations, on devra considérer que la maille d'échantillonnage sera inférieure à la variabilité spatiale dans les zones d'accumulation silteuse. En somme, nous proposons que la maille d'échantillonnage doit s'établir ainsi:

- 0,5 km x 0,5 km - zone près des sources connues (distance < 2,5 km)
- zone à faible courant de nature boueuse  
(vitesse  $\leq$  4 cm/s)



- |             |   |   |
|-------------|---|---|
| 1 km x 1 km | - | zone plus distale (distance > 2,5 km)   |
|             | - | zone à courant moyen de nature sablo-silteuse<br>(4 cm/s < vitesse ≤ 50 cm/s) |
| > 1,0 km    | - | zone à fort courant de nature sablo-graveleuse<br>(vitesse > 50 cm/s).        |

Les cartes nos 8, 9, et 10 présentent le plan d'échantillonnage conçu à partir de ces conclusions. Les relevés géophysiques couvrent les zones d'accumulation et débordent légèrement de façon à pouvoir bien localiser les limites des zones.

## 8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude pilote réalisée dans la partie nord du Lac Saint-Louis a permis d'atteindre les objectifs généraux fixés dans le cadre du projet à savoir:

- cartographie des zones contaminées;
- caractérisation physique des zones d'accumulation:
  - . nature des sédiments;
  - . épaisseur des sédiments récents;
  - . sédimentologie de la zone d'accumulation;
- caractérisation chimique des zones d'accumulation:
  - . nature de la contamination;
  - . répartition spatiale;
  - . évolution temporelle;
  - . masse de contaminants.

Par contre, les objectifs spécifiques de l'étude pilote consistait essentiellement à analyser et à évaluer les résultats d'une telle approche en terme de précision, de résolution et de degré de confiance.

A la lumière des résultats, il nous semble que l'approche utilisée pour la caractérisation physique permet d'atteindre un bon niveau de confiance et une précision de l'ordre de 50 m sur les contours et de 5 cm pour l'épaisseur des sédiments récents lorsque celle-ci dépasse 15 cm de profondeur. Cette précision peut être obtenue grâce à la combinaison des techniques utilisées pour l'approche. Les cartes de répartition spatiale des contaminants n'atteignent pas un niveau de confiance équivalent puisque la variabilité intrinsèque sur un point d'échantillonnage ( $\pm 10$  m) peut varier de 5 à 50% (Krumgaly *et al*, 1989). On estime à environ  $\pm 25\%$  la précision moyenne des résultats présentés. Les contours des différentes classes de concentration seraient précis à  $\pm 250$  m en considérant la méthode d'interpolation.

Dans le calcul du bilan de masse des contaminants, la précision est directement fonction de la plus faible précision des données de base utilisées. Dans ce

cas-ci, c'est la précision de la répartition des contaminants qui est la plus limitante. A cette imprécision et à celle reliée à l'épaisseur de sédiments récents, il faut ajouter les imprécisions liées aux estimations suivantes:

- estimation de la profondeur contaminée;
- estimation de la densité.

L'ensemble de ces imprécisions aurait pu être minimisé avec un plus grand nombre de forages. Ces imprécisions nous amènent à une erreur estimée dans le calcul de la masse de différents contaminants de l'ordre de plus ou moins 40 à 50%. Pour l'instant avec les données disponibles et la connaissance disponible dans la littérature, il nous est très difficile de ventiler davantage le calcul de cette imprécision. Toutefois dans le contexte d'un bilan massique, cette précision nous apparaît relativement bonne compte tenu de la précision obtenue par d'autres chercheurs dans leurs calculs de bilans massiques à partir des apports liquides et solides (Frenette *et al*, 1989; INRS et Asseau, 1992).

Malgré cette imprécision, il nous apparaît que l'approche mis de l'avant avec les modifications énoncées à la section 6.8 pourra permettre d'atteindre une précision supérieure qui pourrait être de l'ordre de 25%. Parmi ces modifications, l'utilisation d'une benne permettant de caractériser la stratigraphie dans les premiers 30 cm et l'augmentation du nombre de carottes permettront d'augmenter grandement la précision des résultats. De plus, la réalisation des relevés sismiques avant la croissance des macrophytes assurera la continuité de l'information stratigraphique.

L'approche préconisée semble à l'heure actuelle être la seule approche intégrée permettant de statuer sur la permanence des zones d'accumulation. En effet, l'analyse et l'interprétation des profils verticaux des carottes fournissent une image de la réalité sédimentologique du fleuve Saint-Laurent, puisque les sédiments sont le reflet fidèle de l'évolution des variations de la contamination et des processus hydrodynamiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Baudo R., J. Giesy and H. Muntau - 1990. Sediments: Chemistry and toxicity of In - Place Pollutants. Lewis Publishers, inc. Michigan. 405 pages.
- Berner, R.A., 1980. Early diagenesis : Theoretical Approach. Princetown University Press, New Jersey.
- Bradley, S.B. and J.J. Cox- 1987. Heavy metals in the Hamps and Manifold valleys, North Staffordshire, U.K. - Partitionning of metals in flood plain soils. Sci. total Environ. 65, p.135-153.
- Champoux, L. et H.H. Sloterdijk, 1988. Étude de la qualité des sédiments du lac Saint-Louis 1984-1985. Rapport technique no 1: Géochimie et contamination. Environnement Canada, 177 p.
- Comité de coordination pour la qualité des eaux de la rivière des Outaouais, 1986. La qualité de l'eau de la rivière des Outaouais, 1985. Rapport annuel du Comité de coordination pour la qualité des eaux de la rivière des Outaouais présenté aux gouvernements du Canada, du Québec et de l'Ontario, 47 p.
- Commission Géologique du Canada, 1968. Géologie et ressources minérales du Canada. Partie A. 408 pages.
- Duncan, G.A. and G.G. Lahaie, 1979. Size analysis procedure used in the sedimentology laboratory. National Water Research Institute, Hydraulics Division, Burlington, Ontario, Manual.
- Environnement Canada, MENVIQ, 1992. Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent. Rapport interne février 1992.
- Folk R.L. 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. University of Texas, Hemphill Publishing Co. Austin, Texas. 182 pp.
- Frenette, M., C. Barbeau et R. Frenette, 1990. Fleuve Saint-Laurent, priorisation et caractérisation des fonds contaminés. Hydrotech Inc. pour Environnement Canada. 46 p.
- Frenette, M., C. Barbeau et J.-Ls Verrette; 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent. Direction générale des eaux intérieures. Environnement Canada, 185p.

- Gadd, N.R., 1971. Pleistocene geology of the central St. Lawrence lowland with selected passages from an unpublished manuscript, the St. Lawrence lowland, by J.W. Goldthwait. Geol. Surv. Can., Mémoire 359, 153p.
- Germain, A. et M. Janson; 1984. Qualité des eaux du fleuve Saint-Laurent de Cornwall à Québec (1977-1981). Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, 232 p.
- Hardy, B., L. Champoux, H. Sloterdijk et J. Bureau; 1991. Caractérisation des sédiments de fond du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, 74 p.
- Hydrotech Inc. 1988. Fleuve St-Laurent. État des connaissances et perspectives sédimentologiques, synthèse et recommandations. Documents préliminaire pour Environnement Canada et le Ministère de l'Environnement du Québec, Montréal.
- INRS et Asseau, 1992. Bilan sur les apports toxiques et les usages du fleuve Saint-Laurent. Volume 2 Secteur Beauharnois-Lanoraie. Rapport d'étude (version préliminaire) soumis au Centre Saint-Laurent, 147 p.
- Jarry, V., P. Ross, L. Champoux, H. Sloterdijk, A. Murdoch, Y. Couillard et F. Lavois; 1985. Répartition spatiale des contaminants dans les sédiments du lac Saint-Louis, fleuve Saint-Laurent. Water Poll. Res. J. of Canada 20(2) pp 75-99.
- Kaiser K.L.E, B.G. Oliver, M.N. Charlton and K. Nicol; 1989. Polychlorinated biphenyls in St. Lawrence River Sediments. Water Poll. Res. J. Canada. NWRI.
- Larsen B. et A. Jensen, 1989. Evaluation of the sensitivity of sediment stations in pollution monitoring, Marine Pollution Bulletin, vol. 20, no 11, pp. 556-560.
- Lavalin, 1989. Sites aquatiques contaminés du Saint-Laurent (inventaire et priorisation). Rapport final version préliminaire pour Environnement Canada - dossier no: 56750.
- Merriman, J.C., J.L. Metcalfe. Pesticide distribution lower Ottawa River, 1986. Technical Bulletin no 160, Burlington, Ontario, 1988.
- Merriman, J.C. Bottom sediment quality of the Ottawa River. Technical Bulletin no 153. Environnement Canada. Burlington, Ontario, 1987.
- Mudie, P.J., D.J.W. Piper, K. Rideout, K.R. Robertson, C.T. Schafer, G. Vilks and I.A. Hardy. 1984. Standard methods for collecting. Describing and sampling quaternary sediments at the Atlantic Gesocience Centre. Géological Survey of Canada. Open file # 1044.

- Mudroch, A. et S.R. Joshi, 1991. Géochimie et distribution de métaux à l'intérieur de carottes de sédiments prises au lac Saint-Louis (fleuve Saint-Laurent) et datés par radioactivité. *Revue des sciences de l'eau*, 4, pp 1-17.
- Mudroch, A. et S.D. MacKnight, 1991. Handbook of techniques for aquatic sediments sampling. CRC Press, 210 p.
- Oldfield, F. and P.G. Appleky. 1984. Empirical testing of  $^{210}\text{Pb}$  - Dating models for Lake sediments. Dans Howarth E.Y. Lund J.W. Lake sediments and Environment history. University of Minnesota Press. Minneapolis p. 93-124.
- Pageau, G., Gravel et Lévesque, L. 1971. Québec Department of Tourisme, Fish and Game, Wildlife Service, Recherche Laboratory, Montréal, Québec. The Ichtyaufauna and flora of lake St-Louis on the St-Lawrence river near Montréal, Québec. General features and recent changes. Proc. 14th conf. Great Lakes Res., 1971: 79-89. Int. Assoc. Great Lakes Res.
- Parde, M. 1948. Hydrologie du fleuve Saint-Laurent et de ses affluents, *Rev. Can. Geogr.*, 2: 35-83.
- Pelletier, M et C. Bélanger, 1990. Caractérisation des sites aquatiques fédéraux contaminés. Évaluation de la qualité des sédiments des ports de Montréal, Québec et Trois-Rivières. Division des Programme Fédéraux, Plan d'action Saint-Laurent. Environnement Canada.
- Pickering, W.F. 1981. Selective chemical extraction of soil components and bound metal species. *CRC Crit. Rev. Anal. Chim. Nov.*: 233-266.
- Préfontaine G. 1942. Étude biologique des eaux de la plaine de Montréal et description générale des aux de la plaine de Montréal en Rapp. *Station Biol. Montréal Inst. Biol. Univ. Montréal*, Fascicule 1:33-67.
- Procéan; 1992. Rapport d'essais géophysiques. Caractérisation physico-chimique des sédiments du lac Saint-Louis. Pour Environnement Canada (préliminaire).
- Procéan, 1991a. Plan d'intervention des secteurs aquatiques contaminés, Port de Québec, phase II, Environnement Canada, direction des programmes fédéraux.
- Procéan, 1991b. Révision des critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada.
- Procéan, 1990. Analyse de carottes par tomodynamométrie. Environnement Canada. Centre Saint-Laurent, 10 pages.

- Rochon R. et M. Chevalier, 1987. Échantillonnage et conservation des sédiments en vue de la réalisation des projets de dragage. Environnement Canada, Conservation et Protection. 28 p.
- Rukavina, N.A., A. Mudroch and S.R. Joshi, 1990. The geochemistry and sedimentology of the surficial sediments of lac St-Louis, St.Lawrence River. The science of the total environment, 97/98, pp. 481-494.
- Sérodes, J.-B. 1978. Qualité des sédiments du fleuve Saint-Laurent entre Cornwall et Varennes. Rapport technique no 15. soumis au Comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent par la Direction générale des eaux intérieures d'Environnement Canada. 467 pp.
- Shukla, B.S. and S.R. Joshi, 1989. An Evaluation of the CIC Model of 210-Pb Dating of Sediments. Environ. Geol. Water. Sci. Vol 14. No.1, p 73-76.
- Silverberg, N., H.V. Nguyen; G. Delibrias; M. Koide; B. Sunby; Y. Yokoyama et R. Chesselet, 1986. Radionuclide profiles, sedimentation rates and bioturbation in modern sediments of the Laurentian trough, Gulf of St.Lawrence. Océanol. Acta, 9.3, p. 285-290.
- Silverberg, N. et B. Sundby, 1990. Sediment - Water interaction and Early Diagenesis in the Laurentian Trough in Coastal and Estuarine Studies, Vol. 39, Oceanography of a large-scale estuarine system. Université du Québec à Rimouski.
- Sylvestre, A. et D. Leclair; 1991. Synthèse des connaissances sur les aspects physico-chimiques de l'eau et des sédiments du lac Saint-Louis. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 97 pp (version préliminaire).
- Tanabé S., N. Kannan, M. Fukushima, T. Okamoto, T. Wakimoto et R. Tatsukama, 1989. Persistent organochlorines in Japanese Coastal Waters; An Introspective Summary from a Far East developed Nation. Marine Pollution Bulletin vol. 20 p. 344-352.
- Wenworth, C.K., 1992. A scale of grade and class terms for clastic sediments: Jour. Geology, V. 30, p. 377-392.

