

Analyse des données de qualité concernant
les rives et les bilans de substances
nutritives dans le fleuve Saint-Laurent

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

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 19
1976

Rapport rédigé pour
Les Services de protection de l'environnement du Québec

par

A. Tessier, B. Bobée, P.G. Campbell, J.P. Villeneuve,
M. Lachance, R. Robitaille

Analyse des données de qualité concernant
les rives et les bilans de substances
nutritives dans le fleuve Saint-Laurent

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

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 19
1976

Rapport rédigé pour
les Services de protection de l'environnement du Québec

par

A. Tessier, B. Bobée, P.G. Campbell, J.P. Villeneuve,
M. Lachance, R. Robitaille

ISBN 2-89146-030-8

DEPOT LEGAL 1976

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés

© 1976 - Institut national de la recherche scientifique

PARTICIPANTS A L'ETUDE

Bobée, B.	professeur	INRS-Eau
Campbell, P.G.	professeur	INRS-Eau
Tessier, A.	professeur	INRS-Eau
Villeneuve, J.P.	professeur	INRS-Eau
Béland, J.	professionnel	SPEQ
Gouin, D.	professionnel	SPEQ
Lachance, M.	agent de recherche	INRS-Eau
Lacroix, J.	professionnel	INRS-Eau
Malo-Lalande, D.	professionnel	SPEQ
Robitaille, R.	assistant de recherche	INRS-Eau

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes suivantes qui ont bien voulu collaborer à la réalisation de ce rapport:

- Magella Cantin, informatiste, du Service de documentation de l'INRS-Eau, pour le support apporté à la réalisation finale de ce rapport;
- André Parent, dessinateur à l'INRS-Eau, pour la production des figures et graphiques;
- Lise Raymond, secrétaire à l'INRS-Eau, pour sa participation intéressée à la dactylographie du texte.

RESUME

Ce rapport rend compte de travaux effectués pour les Services de Protection de l'Environnement du Québec (SPEQ) dans le cadre de l'étude du fleuve Saint-Laurent. Au cours de ce travail, réalisé en étroite collaboration avec des professionnels du SPEQ, l'accent a été mis sur, d'une part, le développement d'une méthode d'acquisition rationnelle des données permettant d'atteindre les objectifs des projets et sur, d'autre part, l'analyse et l'interprétation des données acquises dans deux projets. Ces projets concernent, l'un, l'étude des bilans de substances nutritives et, l'autre, l'étude de la qualité de l'eau des rives du fleuve Saint-Laurent.

Pour le premier projet, les différentes équations générales de calcul du débit massique à travers une section transversale et du bilan entre deux sections ont été établies et les types d'erreurs associées à ces grandeurs ont été identifiées. L'application de méthodes statistiques a en outre permis de mettre en évidence une homogénéité verticale des concentrations et, dans certains cas, une stratification horizontale des concentrations dans les sections transversales. Ces conclusions ont permis de choisir les formules appropriées pour le calcul des débits massiques, des bilans et des erreurs associées. Les résultats obtenus montrent que les erreurs associées au calcul du bilan sont très élevées et peuvent être réduites en accroissant la fréquence de mesure.

Dans le deuxième projet, on a identifié les paramètres importants pour chaque utilisation de l'eau des rives. L'analyse des données acquises à l'aide d'une méthode multivariée (analyse factorielle des correspondances) a permis de mettre en évidence des zones où les concentrations de substances nutritives sont homogènes. Cette zonation permet de recommander la réduction de manière significative du nombre de points de prélèvement et l'augmentation plutôt de la fréquence de mesure pour permettre une meilleure connaissance de la variabilité temporelle des paramètres pertinents aux différentes utilisations.

Mots-clé: méthodes statistiques / méthodes multivariées / plage / rive / bilan / analyse statistique / fleuve Saint-Laurent.

Référence: Tessier, A. et al. (1976). *Analyse des données de qualité concernant les plages et les bilans de substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent*. INRS-Eau, rapport scientifique no 19, 117 p., 7 annexes. (Rapport soumis aux Services de Protection de l'Environnement du Québec).

PARTICIPANTS A L'ETUDE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	ix
1. Introduction	1
2. Elaboration d'un programme d'acquisition des données: considérations générales	4
2.1 Identification des objectifs du programme	5
2.2 Elaboration du plan d'échantillonnage	5
2.3 Acquisition des données de qualité de l'eau	7
2.4 Analyse et interprétation des données	8
2.5 Réalisation des objectifs du programme	8
3. Application du programme d'acquisition de données au projet: "Bilans de substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent"	10
3.1 Equation du bilan et du débit massique	13
3.1.1 Equations générales du bilan et du débit massique	13
3.1.2 Equations simplifiées du débit massique "instantané"	16
3.2 Erreurs associées au calcul du débit massique et des bilans	19
3.2.1 Erreurs inhérentes à un échantillonnage du phénomène	19
3.2.2 Erreurs inhérentes aux techniques de mesure sur le terrain	28
3.2.3 Erreurs inhérentes aux techniques d'analyse physico-chimique	29
3.3 Traitement des données	31
3.3.1 Vérification des hypothèses	31
3.3.2 Calcul des bilans	49
3.3.3 Explication de la variance des bilans	54
3.4 Recommandations concernant le plan d'échantillonnage	63
4. Application du programme d'acquisition de données au projet: "Etude de la qualité de l'eau des rives"	64

4.1	Approche utilisée	66
4.2	Alimentation en eau	68
4.2.1	Qualité de l'eau exigée pour les sources d'alimentation	68
4.2.2	Paramètres mesurés	68
4.2.3	Analyse des données	72
4.2.4	Recommandations concernant le plan d'échantillonnage	74
4.3	Récréation (sports de contact)	79
4.3.1	Qualité de l'eau exigée pour la récréation	79
4.3.2	Paramètres mesurés	79
4.3.3	Analyse des données	79
4.3.4	Recommandations concernant le plan d'échantillonnage	81
4.4	Qualité de la vie	88
4.4.1	Qualité de l'eau exigée	88
4.4.2	Paramètres mesurés	91
4.4.4	Recommandations concernant le plan d'échantillonnage	108
4.5	Analyse spéciale de la Baie de Valois	111
	BIBLIOGRAPHIE	116
	ANNEXE 1. Description des opérations effectuées sur les banques de données et des problèmes rencontrés	
	ANNEXE 2. Exemples de simplification de l'équation générale du débit massique	
	ANNEXE 3. Calcul détaillé de la variance du débit massique instantané	
	ANNEXE 4. Cycles des transformations de l'azote, du phosphore et du carbone	
	ANNEXE 5. Calcul de la variance du débit massique pour la section du lac Saint-Louis	
	ANNEXE 6. Description de la méthode d'analyse factorielle des correspondances	
	ANNEXE 7. Représentation sur les axes factoriels des régions homogènes	

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>	
3.1a	Numéros des formules de calcul du débit massique découlant des hypothèses posées concernant les variations spatiales de la vitesse et de la concentration. On suppose que les variations temporelles sont nulles pendant la durée de la mesure	17
3.1b	Formules du débit massique. Les nombres entre parenthèses correspondent aux numéros indiqués dans le Tableau 3.1a	18
3.2	Variance du débit massique dans une section ou une sous-section en considérant que Q et c peuvent varier en fonction de x, y et t	22
3.3	Variabilité temporelle, pendant l'échantillonnage de la section située au lac Saint-Louis (millage 143.5), mesurée à deux stations localisées dans cette section - Echantillonnage réalisé en novembre 1975; prélèvements effectués à toutes les quinze minutes, pendant deux heures et demie	33
3.4	Variabilité temporelle, pendant l'échantillonnage des sections situées à Varennes, mesurée à trois stations localisées dans ces sections. Echantillonnage réalisé en novembre 1975; prélèvements effectués à toutes les quinze minutes.	34
3.5	Estimation de la variabilité pendant le temps d'échantillonnage d'une section	36
3.6	Variabilité temporelle des concentrations sur une base mensuelle à trois sections transversales du Saint-Laurent - Données de 1975	38
3.7	Variabilité temporelle des concentrations sur une courte période de temps pour une section du lac Saint-Louis (millage 131.8) - Données de 1974	40

3.8	Variabilité temporelle sur une courte période de temps (sept échantillonnages en 4 jours successifs), en juin 1974, pour des sections situées à Varennes	41
3.9	Variabilité temporelle des concentrations sur une courte période de temps (5 échantillonnages en 4 jours successifs), en juillet 1974, pour des sections situées à Varennes	42
3.10	Variabilité temporelle des concentrations sur une courte période de temps (dix échantillonnage en deux jours successifs), en août 1973, pour une section située à Repentigny (millage 174.0)	43
3.11	Variabilité spatiale (horizontale et verticale) à trois sections transversales du Saint-Laurent	45
3.12	Variabilité horizontale des concentrations, en juin 1974, pour des sections situées à Varennes	46
3.13	Variabilité horizontale des concentrations, en juillet, dans les sections situées à Varennes	47
3.14	Variabilité horizontale des concentrations, en juillet, dans les sections situées au lac Saint-Louis (millage 131.8)	48
3.15	Variabilité horizontale des concentrations, en juillet, à la section située à Repentigny (millage 174.0), au mois d'août 1973	50
3.16	Etude de la stratification verticale P_T (F) au moyen du "test de Student" sur les observations pairées. Echantillonnage de juin, juillet, août, septembre et novembre 1975	51
3.17	Etude de la stratification verticale de P_T (F) au moyen du "test de Student" sur les observations pairées. Echantillonnage de novembre 1975 à la section située au lac Saint-Louis (millage 143.5)	52

3.18	Etude de la stratification verticale de P_T (F) au moyen du "test de Student" sur les observations pairées. Echantillonnage de novembre 1975 à la section de Varennes (millage 173.8)	53
3.19	Valeurs de débit massiques aux sections situées au lac Saint-Louis et à Varennes	55
3.20	Bilans journaliers de phosphore total (F), d'azote total (F) et de solides en suspension entre la section située au lac Saint-Louis (millage 143.5) et celles situées à Varennes (millage 173.8 et 174.2)	56
3.21	Moyenne, écart-type, variance et coefficient de variation de débits massiques pour des sections du lac Saint-Louis et de Varennes	57
3.22	Moyenne, écart-type, variance et coefficient de variation de bilans entre, d'une part, une section du lac Saint-Louis (millage 143.5) et, d'autre part, les sections de Varennes (millages 173.8 et 174.2)	58
3.23	Variabilité des paramètres due aux opérations de terrain et de laboratoire - Echantillonnage de novembre 1975 à deux stations (02 et 07) de la section du lac Saint-Louis (millage 143.5)	59
4.1	Qualité exigée pour les sources d'alimentation en eau potable	69
4.2	Utilisation du Saint-Laurent comme source d'alimentation en eau	76
4.3	Qualité exigée pour l'eau servant à la récréation	80
4.4	Caractéristiques des plages localisées le long du Saint-Laurent	84
4.5	Qualité de l'eau exigée pour le maintien d'une vie aquatique équilibrée - Substances nutritives	89
4.6	Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent-découpages en zones où les stations ont un comportement semblable	94

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>	
2.1	Programme rationnel d'acquisition de données	6
3.1	Elaboration du programme d'acquisition des données: projet "Bilans de substances nutritives"	12
4.1	Distribution des coliformes fécaux dans la Baie de Valois	82
4.2	Localisation, pour les différents mois, des points représentatifs des paramètres physico-chimiques dans le plan des deux premiers axes principaux	101
4.3	Evolution des zones géographiques délimitées pour les rives du Saint-Laurent en fonction des paramètres qui les caractérisent	102
4.4	Représentation des paramètres et des zones dans le plan factoriel (1;2)	112
4.5	Zonation à partir de la valeur du 1 ^{er} facteur	114

1. INTRODUCTION

En raison de l'acuité et de la complexité des problèmes de qualité de l'eau, les programmes d'acquisition de données se sont multipliés et des montants importants y ont été consacrés. Il ne semble pas cependant que ces investissements aient donné les résultats escomptés. En effet, on se retrouve actuellement devant une masse considérable de données qui, dans le meilleur des cas, sont rassemblées dans des annuaires où l'on présente certaines caractéristiques statistiques de base (moyenne, écart-type, percentiles, etc.). Ces données, par ailleurs, ne sont en général soumises qu'à des analyses descriptives où la subjectivité et l'intuition jouent un rôle prépondérant. Cet état de fait n'est pas particulier au Québec et les mêmes tendances se rencontrent un peu partout dans les pays développés. Cette phase de tâtonnement et de croissance parfois anarchique était cependant un mal nécessaire puisque l'on se trouvait face à des problèmes complexes nécessitant souvent des réponses urgentes et pour lesquels on ne disposait pas d'information.

Actuellement, on assiste, dans plusieurs pays, à une remise en question des programmes d'acquisition, ce qui se traduit par un plus grand souci de planification et une volonté nette d'exploiter de la meilleure manière possible les données recueillies. Un indicateur visible de cette tendance au Québec est le rôle important que joue le Comité d'étude Canada-Québec sur le fleuve Saint-Laurent. Cette salutaire remise en question nécessite la collaboration de spécialistes de différentes disciplines dans les étapes de la planification des programmes d'acquisition et dans l'analyse et l'interprétation des données recueillies.

Depuis la formation du Comité, on constate une intensification des campagnes de mesure et une volonté d'acquisition rationnelle des données. La nécessité d'une rationalisation effective a d'ailleurs été soulevée par plusieurs participants au Colloque sur le Saint-Laurent, en novembre 1974.

Le processus de rationalisation a pour but de définir le nombre minimal de points de mesure qui permet d'atteindre les objectifs fixés avec un niveau de précision donné. Les méthodes statistiques peuvent intervenir à différents niveaux dans ce processus:

- définition de plans d'échantillonnage adéquats;
- analyse et traitement des données;
- identification de la variabilité spatiale et temporelle;
- étude des relations entre les paramètres.

De plus, il ne saurait être question de rationalisation d'un réseau d'acquisition de données de qualité sans une étude des paramètres du point de vue physico-chimique (choix des paramètres pour répondre aux objectifs, signification des liens interparamètres).

Dans l'état actuel, en ce qui concerne le Saint-Laurent, il semble que l'on en soit au stade préliminaire de la rationalisation et que l'on a peu ou pas appliqué les méthodes statistiques. L'analyse des résultats s'effectue encore en s'appuyant sur les méthodes classiques de la biologie ou de la chimie; ces méthodes sont mal adaptées aux quantités importantes de données, de telle sorte que l'interprétation reste forcément au stade descriptif.

Conscient de ces lacunes et considérant l'aide que l'INRS-Eau peut apporter dans ce domaine (expérience de plusieurs membres dans l'application des méthodes statistiques en hydrologie, nombreux programmes de calculs développés ou acquis à l'INRS-Eau), les Services de Protection de l'Environnement du Québec (SPEQ) ont fait appel à nos services pour les conseiller dans l'application de méthodes statistiques à la solution de problèmes rencontrés dans deux projets:

- Bilans de substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent (PC-4);
- Etudes de la qualité de l'eau des rives (PC-10).

Le présent rapport rend compte des travaux effectués, dans le cadre de ces deux projets, du 24 juillet 1975 au 31 mars 1976; ces travaux ont été menés conjointement avec des professionnels du SPEQ.

2. ELABORATION D'UN PROGRAMME D'ACQUISITION DES DONNEES:
CONSIDERATIONS GENERALES

Les paramètres de qualité de l'eau sont variables dans le temps et l'espace et, pour avoir une connaissance parfaite de cette variabilité, il faudrait effectuer des enregistrements en continu en un très grand nombre de points. Ceci est cependant impossible en raison des coûts impliqués et aussi parce que seulement un nombre réduit de paramètres se prête à des mesures en continu. C'est pourquoi, en pratique, on est conduit à effectuer des mesures en un certain nombre de stations et avec une certaine fréquence. On commet ainsi des erreurs d'échantillonnage dues à la variabilité spatiale et temporelle puisque l'on ne dispose que d'un échantillon (au sens statistique) au lieu de l'ensemble des mesures possibles (population). Il importe donc, lors de l'établissement du plan d'échantillonnage, de tenir compte de la variabilité du phénomène étudié. Le plan d'échantillonnage établi, l'obtention des données nécessite plusieurs opérations (manipulations sur le terrain, entreposage, analyse en laboratoire, etc.) qui sont autant de sources d'erreur.

Bien qu'il soit difficile de définir précisément une démarche systématique valable dans tous les cas, on peut, de manière générale, considérer le schéma de la Figure 2.1 qui décrit les étapes à envisager lors de l'élaboration d'un programme d'acquisition des données.

2.1 Identification des objectifs du programme

Cette étape, qui a pour but de répondre aux problèmes posés par l'utilisation de l'eau, vise à définir les questions auxquelles le programme doit répondre, ce que l'on veut mesurer et la précision requise. On est en général conduit, dans cette étape, à préciser les paramètres pertinents à mesurer. Un objectif peut être, par exemple d'évaluer, avec une erreur totale d'estimation inférieure à 50%, le bilan, entre 2 sections du Saint-Laurent, de certaines substances nutritives.

2.2 Elaboration du plan d'échantillonnage

Dans le plan d'échantillonnage, on doit déterminer, pour un certain nombre de paramètres pertinents à l'étude, les points où les mesures devront s'effectuer et la fréquence d'échantillonnage. Le nombre des mesures est fonction de:

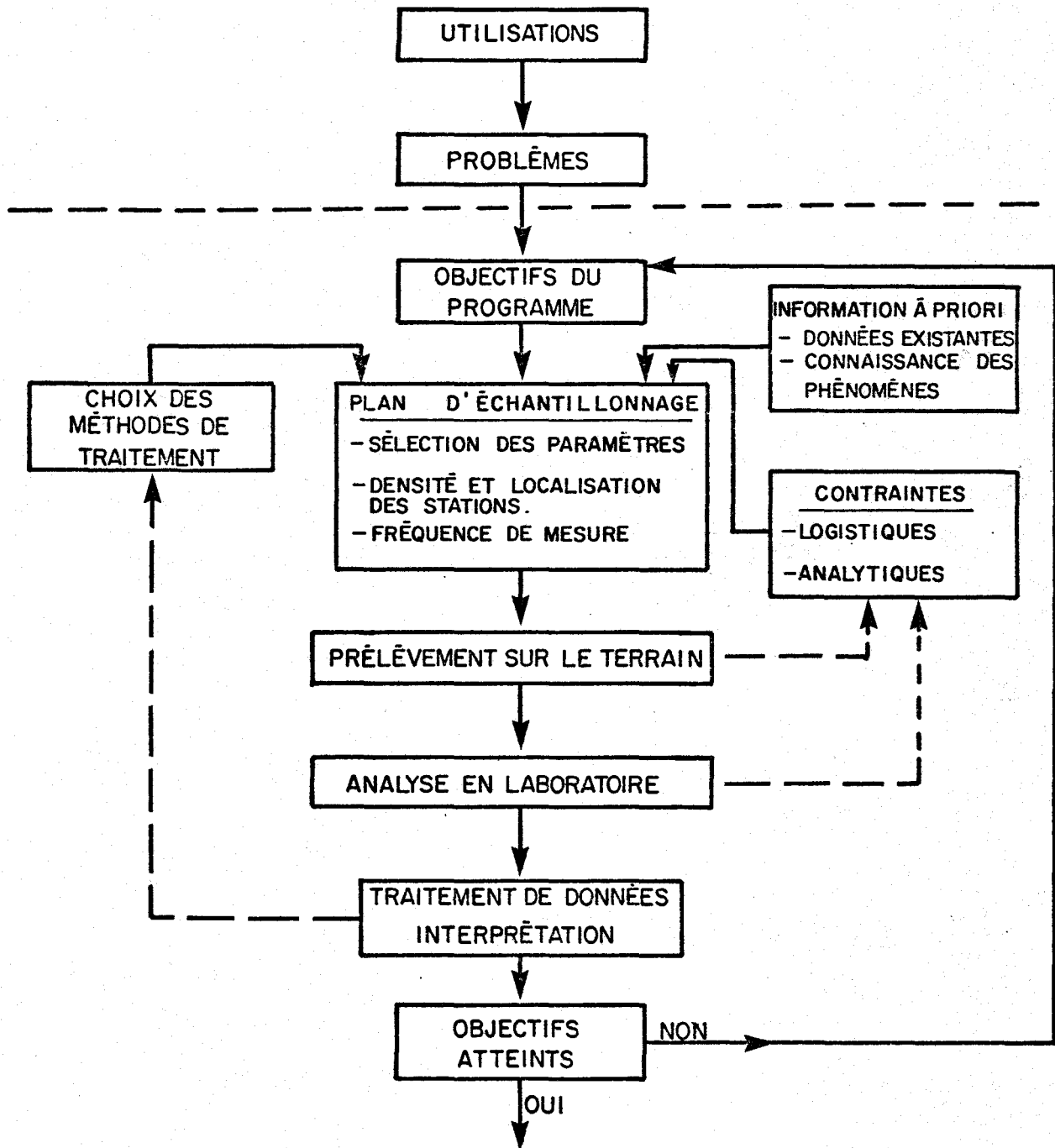


Fig. 2.1. Programme rationnel d'acquisition de données.

- la précision requise pour chaque paramètre;
- la variabilité spatiale et temporelle des paramètres.

Le choix des paramètres ainsi que la précision que l'on souhaite obtenir dans leur mesure sont liés aux objectifs de l'étude. Cependant, pour une précision fixée, il est clair que le nombre de points de mesure et la fréquence d'échantillonnage doivent dépendre de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène étudié.

Il importe donc, pour établir le plan d'échantillonnage, d'utiliser l'information disponible pour évaluer la variabilité spatiale et temporelle. On peut, dans ce but, effectuer des analyses statistiques sur les données existantes et utiliser, lorsque les données le permettent, certaines méthodes conduisant au choix de la densité des stations et de la fréquence d'échantillonnage.

Pour établir un plan d'échantillonnage adéquat, il importe également de prendre en compte d'autres éléments, tels que:

- les contraintes logistiques;
- les contraintes analytiques;
- les contraintes dues aux méthodes de traitement qui seront utilisées pour les données issues du plan.

Théoriquement, un bon plan d'échantillonnage doit permettre, selon les points de vue, d'obtenir l'information au niveau de précision désiré à un coût minimum ou encore d'obtenir la meilleure information possible pour un coût fixé. Il s'agit en fait d'établir un compromis acceptable entre la précision requise pour répondre aux objectifs et les coûts impliqués pour atteindre cette précision. En pratique, il est irréaliste de vouloir établir un plan d'échantillonnage qui soit optimum pour un groupe important de paramètres ayant des structures de variabilité différentes. Ceci montre la nécessité, lors de l'élaboration des objectifs de l'étude, de définir les paramètres dont la connaissance est prioritaire.

2.3 Acquisition des données de qualité de l'eau

Cette phase, importante en pratique et généralement coûteuse en temps et en personnel, résulte de l'application du plan d'échantillonnage sur lequel elle im-

pose souvent certaines contraintes. Les opérations sur le terrain et en laboratoire sont des sources d'erreur dont la taille dépend des techniques utilisées et du soin apporté aux différentes manipulations. Il est important de planifier, dans l'élaboration du plan d'échantillonnage, certaines études spéciales ayant pour but d'évaluer l'ordre de grandeur de ces erreurs.

2.4 Analyse et interprétation des données

C'est dans cette étape que tous les efforts et les montants investis dans l'acquisition de données doivent être valorisés. Trop souvent pourtant, une fois les données obtenues, on se contente d'analyses descriptives et d'une interprétation superficielle alors que l'on devrait apporter les réponses adéquates aux problèmes qui ont suscité l'établissement du programme d'étude.

L'utilisation appropriée de méthodes statistiques classiques ou plus récentes, ayant l'avantage de l'objectivité, fournit un support précieux à l'interprétation. L'emploi de ces méthodes doit cependant être planifié car, d'une part, elles impliquent certaines contraintes qui doivent être prises en compte lors de l'établissement du plan d'échantillonnage et, d'autre part, le choix des méthodes est lié aux objectifs de l'étude et aux questions auxquelles on veut apporter une réponse.

2.5 Réalisation des objectifs du programme

Si la poursuite du programme est envisagée, ce qui peut être nécessaire pour plusieurs raisons:

- objectifs non atteints;
- réévaluation ou raffinement des objectifs;
- poursuite normale et prévue dans le cas d'un programme de plusieurs années,

il est alors important de réévaluer le plan d'échantillonnage en tenant compte de l'analyse et de l'interprétation des données acquises qui deviennent de "l'information à priori". Ce processus dynamique exploite au maximum les résultats

d'une étape avant d'engager la suivante, évite la duplication de l'information ou la répétition de mêmes erreurs et permet donc une meilleure utilisation des montants investis.

Pour les deux projets qui font l'objet de la consultation, nous avons considéré chacune des étapes décrites précédemment et avons tenté de suivre le schéma général de la figure 2.1.

3. APPLICATION DU PROGRAMME D'ACQUISITION DE DONNEES AU PROJET:
"BILANS DE SUBSTANCES NUTRITIVES DANS LE FLEUVE SAINT-LAURENT"

Les premières études concernant les substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent, ont conduit à se demander:

- quels sont les apports en substances nutritives de grandes villes comme Montréal?
- quelle est l'importance de phénomènes impliquant les substances nutritives dans différents tronçons du fleuve (transformation d'une forme à l'autre; déposition avec les sédiments dans certaines zones propices)?

Ces différentes questions ont suscité l'élaboration d'un programme dont l'objectif est d'évaluer, avec une précision suffisante pour y répondre, les bilans de certaines substances nutritives pour plusieurs sections transversales du fleuve.

Suite à l'entente entre le SPEQ et l'INRS, la présente consultation a pour but, dans l'évaluation de bilans de substances nutritives:

- a) d'identifier les sources d'erreur;
- b) d'évaluer, par des méthodes statistiques, les erreurs, si les données disponibles s'y prêtent;
- c) consécutivement à b), de proposer différents plans d'échantillonnage en fonction de niveaux de précision sur les bilans;
- d) d'évaluer l'application de méthodes statistiques sur les données de qualité concernant les substances nutritives et de choisir les méthodes à utiliser pour traiter ces données;
- e) d'appliquer, si les données disponibles s'y prêtent, des méthodes statistiques pour compléter les données manquantes;
- f) d'aviser le SPEQ sur les éléments pertinents à la rationalisation de son réseau de mesure concernant les bilans de substances nutritives.

La Figure 3.1 indique les différentes étapes envisagées en vue de rationaliser l'acquisition des données pour le projet "Bilans de substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent".

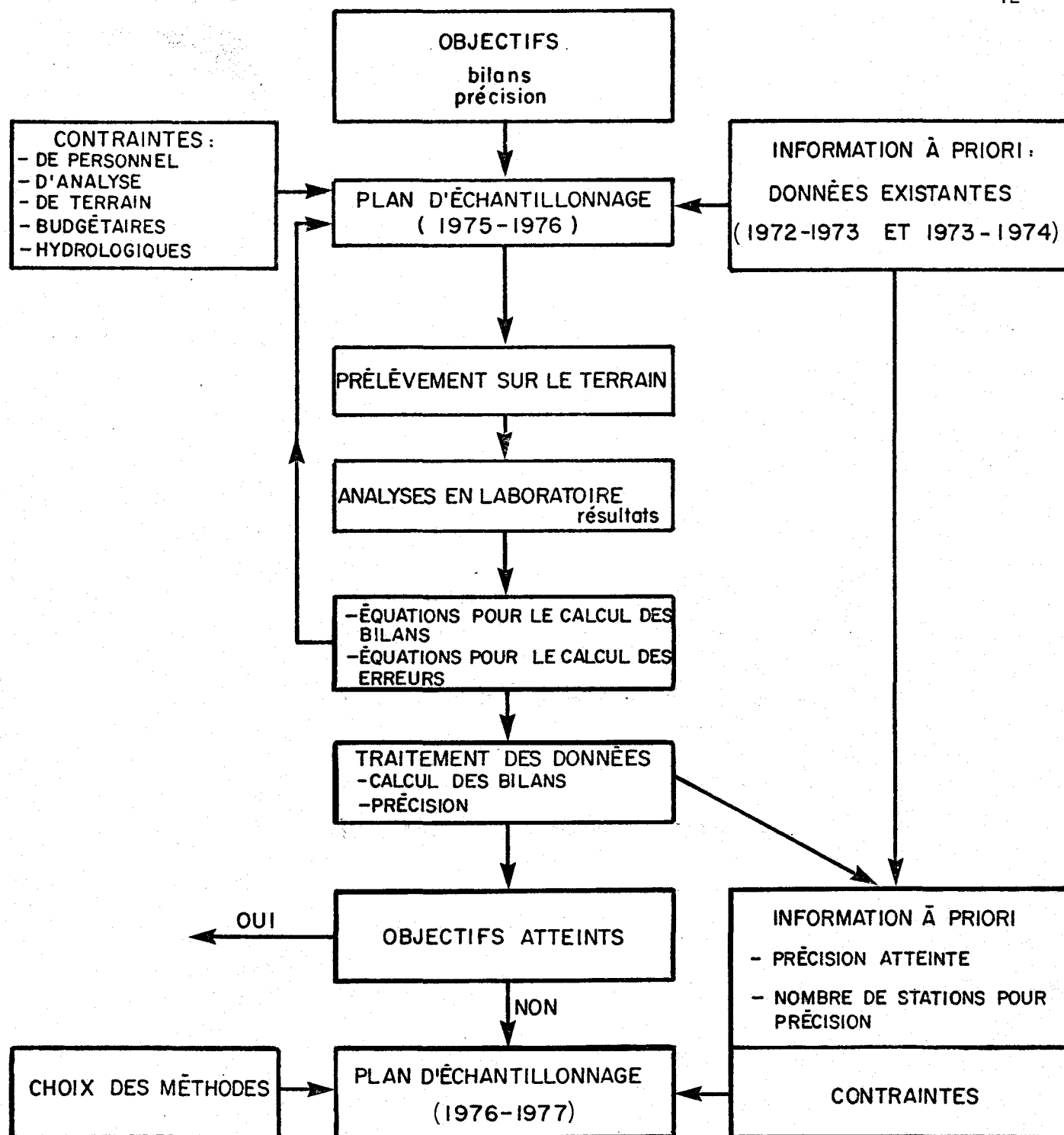


Fig. 3.1. Elaboration du programme d'acquisition des données: projet "Bilans de substances nutritives".

Le plan d'échantillonnage initial pour 1975-76 a été établi par le SPEQ en tenant compte des contraintes (de budget, de laboratoire, de terrain, d'hydrologie, etc.) ainsi que, sommairement, des données existantes (données de 1972-73 et 1973-74). Ainsi, le premier travail a consisté à identifier les différentes sources d'erreur inhérentes au calcul d'un bilan et à suggérer au SPEQ certaines modifications au plan d'échantillonnage (incluses dans la dernière campagne de mesure effectuée en novembre 1975) pour estimer l'ordre de grandeur de ces erreurs. Dans le même temps, on s'est attaché à homogénéiser les banques de données et à les rendre compatibles pour traitement sur notre ordinateur ainsi qu'à se familiariser avec les données. On trouvera, à l'Annexe 1, une description des opérations effectuées sur les banques (validation des données, restructuration, uniformisation d'une année à l'autre).

Dans ce qui suit, on établit tout d'abord les équations de calcul des bilans et de calcul des erreurs associées; il est en effet capital d'estimer, non seulement le bilan, mais également l'erreur associée à ce calcul afin de s'assurer que le bilan a un sens physique. Il est à noter que cette étape aurait normalement dû être réalisée avant la définition du plan d'échantillonnage. On discute ensuite du traitement des données pour évaluer si les objectifs du programme sont atteints et on fait certaines suggestions concernant le futur plan d'échantillonnage. Il faut souligner que le développement des formules du calcul des bilans et du calcul d'erreur a été effectué de manière complète, en raison de l'utilité que ces équations peuvent avoir pour divers autres projets.

3.1 Equations du bilan et du débit massique

3.1.1 Equations générales du bilan et du débit massique

Le bilan entre deux sections est défini comme la différence, pour une période considérée, entre la masse d'une substance entrant dans une section et celle sortant dans l'autre section; le bilan est donc égal aux apports auxquels on ajoute les transformations qui se sont produites entre les deux sections. L'équation suivante représente le bilan entre les deux sections:

$$B = A + R = (Q_{mT_1, t + \tau} - Q_{mT_2, t}) \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

- Le terme $Q_{mT_1, t + \tau}$ représente le débit massique sortant de la section 1;
- $Q_{mT_2, t}$ représente le débit massique entrant dans la section 2;
- A représente les apports provenant de rivières, d'émissaires d'égouts, etc.;
- R représente les pertes ou gains causés par les transformations que subissent, entre les deux sections, les substances étudiées;
- τ représente le temps de parcours entre la section 2 et la section 1;
- Δt représente la période considérée pour le calcul du bilan.

L'équation générale pour le débit massique dans une section d'une rivière s'écrit:

$$Q_m = \frac{1}{TE} \int_0^t \int_0^x \int_0^y c(x,y,t) \cdot v(x,y,t) dy dx dt \quad (3.2)$$

où:

$c(x,y,t)$: est la concentration en un point x, y de la section au temps t ;

$v(x,y,t)$: est la vitesse en un point x, y de la section au temps t ;

TE : le temps pendant lequel on évalue le débit massique.

L'équation du bilan sous sa forme la plus générale s'écrit donc de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 B = & \int_{\tau}^{t+\tau} \int_0^{x_1} \int_0^{y_1} c_1(x,y,t+\tau) \cdot v_1(x,y,t+\tau) dy dx dt \\
 - & \int_0^t \int_0^{x_2} \int_0^{y_2} c_2(x,y,t) \cdot v_2(x,y,t) dy dx dt \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

A toute fin pratique, l'équation sous forme intégrale est inutilisable parce que les mesures de vitesse et de concentration effectuées en rivières sont ponctuelles et que l'on ne connaît pas les fonctions continues décrivant les variations de concentration et de vitesse dans l'espace et dans le temps.

Etant donné que l'on mesure la concentration et la vitesse en différents points et en différents temps, on peut écrire l'équation du bilan sous forme de sommation de valeurs ponctuelles:

$$\begin{aligned}
 B = & \sum_{\ell=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J c(x_j, y_k, \tau + t_\ell) \cdot v(x_j, y_k, \tau + t_\ell) \Delta x_j \Delta y_k \Delta t_\ell \\
 - & \sum_{\ell=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c(x_n, y_m, t_\ell) \cdot v(x_n, y_m, t_\ell) \Delta x_n \Delta y_m \Delta t_\ell \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

Lorsque le nombre de points de mesure devient infini, l'équation (3.4) devient équivalente à l'équation (3.3). Cette équation (3.4) définit donc la sommation des masses élémentaires ayant franchi la section 1 pendant un certain temps moins la sommation des masses élémentaires ayant franchi la section 2 pendant le même temps, mais décalées du temps (τ) nécessaire pour parcourir la distance entre les deux sections.

Pour que l'équation intégrale soit évaluée d'une manière exacte, il faudrait que la sommation soit effectuée pour une infinité de points mesurés dans la section, ce qui n'est pas réalisable. On suppose donc que l'ensemble des

mesures effectuées en différents points de la section est suffisant pour que la sommation sur ces quelques points soit une approximation satisfaisante de la solution intégrale.

On note aussi, pour que cette équation soit vraie, qu'il faut que les mesures soient faites simultanément à tous les points d'une même section, à chaque temps, et pendant la même durée Δt pour les deux sections (on notera, dans l'équation (3.4) précédente, que le terme Δt est identique pour les deux sections).

On peut, à titre d'information, définir le temps de parcours τ entre les deux sections par l'équation suivante:

$$\tau = \frac{1}{A} \int_0^y \int_0^x \int_{Z_2}^{Z_1} \frac{dZ}{v(x, y, Z, t)} dx dy \quad (3.5)$$

où A, la section moyenne entre la section 1 et la section 2 est obtenue par l'équation suivante:

$$A = \frac{1}{L} \int_0^y \int_0^x \int_{Z_2}^{Z_1} dx dy dZ \quad (3.6)$$

Dans cette dernière équation, L est la longueur mesurée entre la section 1 et la section 2.

3.1.2 Equations simplifiées du débit massique "instantané"

L'équation générale (3.4) du débit massique est difficile d'utilisation parce qu'elle implique une grande quantité de mesures. Moyennant certaines hypothèses, cette équation peut être réduite à des expressions plus simples et impliquant moins de mesures. Quelques exemples détaillés de simplification de l'équation générale sont donnés dans l'Annexe 2. Le Tableau 3.1 regroupe l'ensemble des combinaisons d'hypothèses que l'on peut faire (Tableau 3.1a) sur la vitesse et la concentration, ainsi que les formules simplifiées du débit massique qui en découlent (Tableau 3.1b).

TABEAU 3.1a: Numéros des formules de calcul du débit massique découlant des hypothèses posées concernant les variations spatiales de la vitesse et de la concentration. On suppose que les variations temporelles sont nulles pendant la durée de la mesure.

v \ c	$\frac{dc}{dx} = \frac{dc}{dy} = 0$	$\frac{dc}{dx} \neq 0 \quad \frac{dc}{dy} = 0$	$\frac{dc}{dx} = 0 \quad \frac{dc}{dy} \neq 0$	$\frac{dc}{dx} \neq 0 \quad \frac{dc}{dy} \neq 0$
	Constante	varie selon x →	varie selon y ↑	varie selon x et y ↘
$\frac{dv}{dx} = \frac{dv}{dy} = 0$ ----- constante	11	12	13	14
$\frac{dv}{dx} \neq 0 \quad \frac{dv}{dy} = 0$ ----- varie selon x →	21	22	23	24
$\frac{dv}{dx} = 0 \quad \frac{dv}{dy} \neq 0$ ----- varie selon y ↑	31	32	33	34
$\frac{dv}{dx} \neq 0 \quad \frac{dv}{dy} \neq 0$ ----- varie selon x et y ↘	41	42	43	44

TABEAU 3.1.b: Formules du débit massique. Les nombres entre parenthèses correspondent aux numéros indiqués dans le Tableau 3.1a.

$$Q_{mT} = \bar{Q} \cdot c \quad \text{s'applique pour [1], [2], [3], [4]}$$

$$Q_{mT} = \bar{Q} \cdot \bar{c} \quad \text{s'applique pour [12], [13], [14]}$$

$$Q_{mT} = \sum_j \underbrace{\bar{Q}_{x_j, x_{j+1}} \cdot \bar{c}_{x_j, x_{j+1}}}_{(Q_m)_j} \quad \text{s'applique pour [22], [32], [42]}$$

$$Q_{mT} = \sum_k \underbrace{\bar{Q}_{y_k, y_{k+1}} \cdot \bar{c}_{y_k, y_{k+1}}}_{(Q_m)_k} \quad \text{s'applique pour [23], [33], [43]}$$

$$Q_{mT} = \sum_j \sum_k \underbrace{\bar{Q}_{x_j, x_{j+1}, y_k, y_{k+1}} \cdot \bar{c}_{x_j, x_{j+1}, y_k, y_{k+1}}}_{(Q_m)_{jk}} \quad \text{s'applique pour [24], [34], [44]}$$

N.B. La concentration moyenne \bar{c} se définit:

$$\bar{c} = \frac{\sum_j \sum_k c_{jk} \Delta x_j \Delta y_k}{\sum_j \sum_k \Delta x_j \Delta y_k}$$

et $(Q_m)_{jk}$ est le débit massique dans une sous-section de coordonnées j,k.

3.2 Erreurs associées au calcul du débit massique et des bilans

Le calcul des débits massiques dans une section donnée nécessite la connaissance des vitesses et des concentrations. Ces caractéristiques sont soumises à des variations spatiales et temporelles et, puisqu'il est impossible de les mesurer en tout point et à tout instant, on est amené à établir un plan d'échantillonnage indiquant la position des points de mesure et la fréquence de mesure. On commet donc une erreur d'échantillonnage dont la taille est liée à la densité des points et à la fréquence des mesures choisies pour échantillonner la variabilité spatio-temporelle. Le plan d'échantillonnage établi, l'obtention des données nécessite plusieurs opérations (manipulations sur le terrain, entreposage, analyse en laboratoire, etc.) qui sont chacune source d'erreur.

L'estimation de l'erreur sur le débit massique nécessite une identification de chacune des sources d'erreur et une évaluation de leur taille. Dans ce chapitre, nous nous attachons à identifier les sources d'erreur; l'évaluation de la taille sera faite ultérieurement, à partir des données et du protocole suivi pour les obtenir.

3.2.1 Erreurs inhérentes à un échantillonnage du phénomène

Le calcul du débit massique d'une substance, quelle que soit la formule utilisée, nécessite la connaissance de la vitesse du courant et de la valeur du paramètre en plusieurs points. Le nombre de points de mesure dépend, pour une précision fixée, de la variabilité spatiale; à la limite, pour des concentrations identiques dans toute la section, une seule mesure serait nécessaire. D'autre part, on fait en pratique l'hypothèse que toutes les valeurs mesurées dans une section le sont à un même temps alors qu'en réalité, durant le temps d'échantillonnage, la vitesse, aussi bien que les concentrations, sont généralement soumises à des fluctuations temporelles. Il importe donc d'évaluer la variabilité spatio-temporelle des paramètres et d'examiner son influence sur le calcul des débits massiques.

Variabilité spatiale

Puisqu'en pratique il est impossible de connaître la concentration en tout point et parce qu'on ne possède pas de modèles de prédiction permettant de le faire, on effectue les mesures en un certain nombre de points qui constituent un échantillon statistique tiré de la population de l'ensemble des points qui constituent la surface. Il est à noter que, pour une variabilité spatiale donnée, plus le nombre de points échantillonnés est élevé, plus la précision atteinte dans le calcul de la valeur moyenne doit être bonne. Ceci est cependant conditionné par le choix des points d'échantillonnage qui doivent être représentatifs de la variabilité du phénomène. Il est également clair que plus le nombre de points échantillonnés est élevé, plus le coût d'échantillonnage est grand. Il importe donc de trouver un compromis permettant d'atteindre la précision désirée à un coût acceptable.

D'autre part, il est important de noter que l'échantillonnage de la variabilité spatiale ne permet pas d'identifier et d'éliminer les biais: si, par exemple, la méthode d'analyse en laboratoire conduit à des sous-estimations systématiques, il en résultera un biais sur le calcul de la valeur moyenne de la concentration.

Variabilité temporelle

La connaissance de la variabilité temporelle de la concentration d'un paramètre en tout point est également importante dans le calcul du débit massique de ce paramètre. En effet, les mesures à travers une section nécessitent un certain temps d'échantillonnage; les valeurs de concentration mesurées pendant ce temps ne donnent donc pas une image instantanée de ce qui se passe dans la section. Si le paramètre étudié est soumis à des fluctuations temporelles durant le temps d'échantillonnage, tous les points mesurés ne sont pas représentatifs du même phénomène. En pratique, il est impossible par les méthodes de mesure usuelles d'obtenir une image instantanée; c'est pourquoi il est capital d'évaluer la variabilité temporelle du paramètre étudié. Si cette variabilité est négligeable durant le temps d'échantillonnage, son influence sur le calcul du débit massique l'est égale-

ment. Si, par contre, pour l'ensemble des points ou pour certains points de la section, la variabilité temporelle est importante, elle doit être prise en compte dans le calcul du débit massique.

La connaissance de la variabilité temporelle peut également avoir une incidence sur le calcul:

- des débits massiques moyens;
- des bilans (obtenus par différence des débits massiques entre deux sections).

Dans le calcul des débits massiques moyens pour une période de temps donnée, on utilise des valeurs de débits massiques instantanés obtenus à différents temps. Puisqu'il s'agit alors d'un échantillon statistique tiré de la population des débits massiques instantanés, on commet donc une erreur d'échantillonnage dû à la variabilité temporelle du débit massique instantané.

Dans le calcul du bilan entre deux sections, on effectue la différence des débits massiques entre ces deux stations. S'il existe une variabilité temporelle importante, les deux débits massiques considérés pourront ne pas être représentatifs du même phénomène et le bilan calculé n'aura aucune signification physique. La connaissance de la variabilité du paramètre étudié peut alors permettre d'en déduire la variabilité temporelle du débit massique et d'effectuer un calcul adéquat du bilan par l'emploi de techniques appropriées (interpolation, etc.).

Pour le débit massique, l'erreur inhérente à l'échantillonnage est donnée par le calcul de la variance de cette variable. Le développement du calcul de la variance de Q_m est donné dans l'Annexe 3; le Tableau 3.2 donne, pour chacune des formules du débit massique, le calcul de la variance associée.

Pour une section divisée en sous-sections de débit massique $(Q_m)_{jk}$, le débit massique total Q_{mT} s'écrit:

TABLEAU 3.2: Variance du débit massique dans une section ou une sous-section en considérant que Q et c peuvent varier en fonction de x, y et t.

équation ¹	variance
[11]	$\text{var } Q_{mT} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$
[12]	$\text{var } Q_{mT} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$
[13]	$\text{var } Q_{mT} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$
[14]	$\text{var } Q_{mT} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t$ $+ 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$
[21]	$\text{var } Q_{mT} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$

Equation¹

variance

$$[22] \quad \text{var } (Q_m)_j = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t \\ + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{var } x + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \text{var } (Q_m)_j$$

$$[23] \quad \text{var } (Q_m)_k = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t \\ + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_k \text{var } (Q_m)_k$$

$$[24] \quad \text{var } (Q_m)_{jk} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x \\ + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{var } x + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \sum_k \text{var } (Q_m)_{jk}$$

$$[31] \quad \text{var } Q_{mT} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t$$

équation¹

variance

$$[32] \quad \text{var } (Q_m)_j = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{ var } y + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t \\ + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{ var } t$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \text{var } (Q_m)_j$$

$$[33] \quad \text{var } (Q_m)_k = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{ var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{ var } y + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t \\ + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right) \text{ var } y + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{ var } t$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_k \text{var } (Q_m)_k$$

$$[34] \quad \text{var } (Q_m)_{jk} = Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{ var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{ var } y \\ + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right) \text{ var } y + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{ var } t$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \sum_k \text{var } (Q_m)_{jk}$$

équation ¹	variance
[41]	$\begin{aligned} \text{var } Q_{mT} &= Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t \\ &+ 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t \end{aligned}$
[42]	$\begin{aligned} \text{var } (Q_m)_j &= Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{var } y \\ &+ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{var } x \end{aligned}$
	$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \text{var } (Q_m)_j$
[43]	$\begin{aligned} \text{var } (Q_m)_k &= Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{var } y \\ &+ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right) \text{var } y + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t \end{aligned}$
	$\text{var } Q_{mT} = \sum_k \text{var } (Q_m)_k$
[44]	$\begin{aligned} \text{var } (Q_m)_{jk} &= Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 \text{var } y + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{var } y \\ &+ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{var } t + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{var } x + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right) \text{var } y + 2cQ \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \text{var } t \end{aligned}$
	$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \sum_k \text{var } (Q_m)_{jk}$

¹ Les équations du débit massique sont celles qui apparaissent au tableau 3.1.

$$Q_{mT} = \sum_j \sum_k (Q_m)_{jk} \quad (3.7)$$

et la variance de Q_{mT} est donnée par:

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \sum_k \text{var } (Q_m)_{jk} \quad (3.8)$$

En effet, si on admet l'indépendance des variations de débits massiques d'une sous-section à l'autre, les termes de covariance n'apparaissent pas dans l'équation (3.8). Ceci est justifié par le fait que la décision du nombre de sous-sections est liée à la variabilité aléatoire des paramètres d'une sous-section à l'autre; une section ne serait pas subdivisée en sous-sections s'il existait une corrélation étroite entre les variables d'une sous-section à l'autre. La subdivision se fait parce que les variations des paramètres d'une sous-section à l'autre se font d'une manière indépendante.

Pour évaluer la masse M de substance ayant franchi une section pendant un temps $T = \sum_i \Delta t_i$, on effectue la sommation des produits du débit massique par l'intervalle de temps Δt entre chaque mesure de cette grandeur:

$$M = Q_{mT_1} \Delta t_1 + Q_{mT_2} \Delta t_2 + \dots + Q_{mT_n} \Delta t_n \quad (3.9)$$

$$M = \sum_{i=1}^n Q_{mT_i} \Delta t_i \quad (3.10)$$

La variance de M sera donnée par l'équation suivante, étant donné que les Δt sont considérés mesurés sans erreur, donc comme des constantes:

$$\text{var } M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \Delta t_i \Delta t_j \text{cov}(Q_{mT_i}, Q_{mT_j}) \quad (3.11)$$

Supposons, par exemple, une valeur de n égale à 3. Sachant que:

$$\text{cov} (Q_{mT_i}, Q_{mT_j}) = \text{var } Q_{mT_i} \text{ lorsque } i = j,$$

la variance de M devient:

$$\begin{aligned} \text{var } M &= \Delta t_1^2 \text{ var } Q_{mT_1} + \Delta t_2^2 \text{ var } Q_{mT_2} + \Delta t_3^2 \text{ var } Q_{mT_3} \\ &+ 2 \Delta t_1 \Delta t_2 \text{ cov} (Q_{mT_1}, Q_{mT_2}) + 2 \Delta t_1 \Delta t_3 \text{ cov} (Q_{mT_1}, Q_{mT_3}) \\ &+ 2 \Delta t_2 \Delta t_3 \text{ cov} (Q_{mT_2}, Q_{mT_3}) \end{aligned}$$

Pour l'évaluation de la variance de Q_{mT} , on utilisera les formules du Tableau 3.2. La formule pour évaluer les termes de covariance de l'équation 3.11 est la suivante:

$$\text{cov}(Q_{mT_i}, Q_{mT_j}) = c_i c_j \text{ cov}(Q_i, Q_j) + Q_i Q_j \text{ cov}(c_i, c_j) \quad (3.12)$$

A priori, on ne peut éliminer le terme $\text{cov} (Q_i, Q_j)$ en raison de la corrélation qui peut exister entre les débits observés, à moins que le temps entre les deux mesures ne devienne important. Quant au terme $\text{cov} (c_i, c_j)$, il est logique de penser qu'il se comporte comme le terme de covariance des débits et qu'il devient également négligeable lorsque l'intervalle de temps entre les mesures devient grand.

Le bilan entre deux sections peut s'écrire:

$$B = M_1 - M_2 \quad (3.13)$$

où M_1 et M_2 sont les masses d'une substance ayant franchi respectivement les sections 1 et 2 pendant la période de temps considérée pour le calcul du bilan.

La variance de B sera donnée par:

$$\text{var } B = \text{var } M_1 + \text{var } M_2 - 2 \text{ cov} (M_1, M_2) \quad (3.14)$$

Etant donné que les calculs du débit massique dans chaque section s'effectuent d'une façon indépendante, et que les erreurs inhérentes aux mesures effectuées dans chaque section sont indépendantes d'une section à l'autre, le terme $\text{cov}(M_1, M_2)$ sera nul lorsque la distance entre les deux stations devient assez importante pour considérer M_1 et M_2 comme des variables indépendantes. Dans ces conditions, la variance du bilan est évaluée en effectuant la somme des variances des masses de substance franchissant chacune des sections.

Si l'on définit l'erreur d'échantillonnage comme étant égale à la racine carrée de la variance, il est intéressant de regarder, dans le cas des formules que nous avons établies dans le Tableau 3.2, quelles sont les différentes sources d'erreur et comment elles se propagent. Dans ces formules, on peut identifier trois sources d'erreur: la variabilité par rapport à x (c'est-à-dire dans le sens de la largeur de la section), la variabilité par rapport à y (c'est-à-dire dans le sens de la profondeur de la section) et la variabilité par rapport au temps. Ces trois sources d'erreurs dans ces formules sont exprimées respectivement par $\text{var } x$, $\text{var } y$ et $\text{var } t$. La variance de x et la variance de y traduisent les erreurs que l'on commet lorsque l'on positionne les points de mesure et la variance de t traduit l'erreur que l'on commet lorsque l'on situe la mesure par rapport au temps. Ces sources d'erreurs se propagent, à l'intérieur des équations du Tableau 3.2, par l'intermédiaire de la variation moyenne de la variable mesurée par rapport à x , par rapport à y , par rapport à t . Si l'on se réfère, par exemple, à l'équation (44) du Tableau 3.2 qui est celle qui exprime la variance de Q_m en tenant compte de toutes les sources de variation, on peut voir de quelle façon les sources d'erreurs sont multipliées et additionnées entre elles. Si les taux de variation par rapport à x et par rapport à y sont très faibles, voire négligeables, on voit donc que la variance de x , multipliée par un taux de variation pratiquement nul, n'introduit pas d'erreurs importantes sur la mesure de Q_m . Il en est de même pour les autres sources d'erreurs et/ou pour les autres types de variation.

3.2.2 Erreurs inhérentes aux techniques de mesure sur le terrain

Les mesures sur le terrain ne sont jamais obtenues de façon parfaite. Dans le cas du Saint-Laurent, les opérations de terrain sont plus compliquées

que pour la majorité des cours d'eau, étant donné les caractéristiques du cours d'eau (vitesses de courant élevées, grandes dimensions, présence de glaces flottantes, etc.), ce qui amène des difficultés au niveau de l'utilisation des techniques. Ainsi, dans le cadre des études du Saint-Laurent concernant les bilans de substances nutritives, diverses techniques ont été utilisées pour localiser les stations d'échantillonnage dans une section:

- utilisation d'un bateau traversant le fleuve à vitesse constante et prélèvement des échantillons à des intervalles de temps connus;
- prélèvement du haut d'un pont et mesure de la distance par rapport aux rives;
- utilisation d'un telluromètre.

L'utilisation de ces différentes techniques implique des erreurs plus ou moins importantes selon les appareils et les méthodes utilisés.

Les échantillonneurs utilisés peuvent également introduire des erreurs. Par exemple, si on utilise un échantillonneur inadéquat pour prélever des échantillons de sédiments en suspension ou pour prélever des échantillons pour y analyser des substances liées aux sédiments en suspension, on recueille alors des échantillons qui ne sont pas représentatifs.

3.2.3 Erreurs inhérentes aux techniques d'analyse physico-chimique

Plusieurs paramètres mesurés représentent des formes spécifiques de substances nutritives: NH_3 , NO_3 , o-PO_4 , P-inorganique, etc. Etant donné les nombreuses transformations de ces éléments, d'une forme à l'autre (voir Annexe 4 pour une description des cycles de transformations), il est nécessaire de préserver adéquatement les échantillons si on veut mesurer ces formes spécifiques et empêcher des transformations durant la période d'entreposage avant analyse. Des erreurs importantes peuvent provenir de temps d'attente trop longs avant l'analyse ou d'une mauvaise préservation des échantillons.

Le sous-échantillonnage de la bouteille d'eau, avant d'y effectuer les différentes analyses, peut également être source d'erreur. Le problème de

représentativité se pose surtout lorsqu'il y a des sédiments en suspension.

Au niveau des pré-traitements (hydrolyse, digestion), on fait face à un problème de justesse des méthodes de pré-traitement. Le problème se pose surtout pour les déterminations de l'azote organique et du phosphore organique. Il existe, en effet, dans le milieu aquatique, des centaines de composés organiques renfermant de l'azote et du phosphore, alors que le rendement des méthodes de digestion n'est ordinairement mesuré que pour un nombre très restreint de ces composés. Il est également possible que des effets de matrice (nature et concentrations des composés organiques et inorganiques présents dans l'échantillon) influencent ces rendements.

Pour quelques paramètres, les valeurs mesurées se situent souvent près de la limite de détection des méthodes utilisées, ce qui correspond à des fidélités de mesure plutôt faibles. La fidélité des méthodes, la plupart du temps, n'est pas mesurée dans les mêmes conditions que les mesures sur les échantillons réels (période d'entreposage étalée sur plusieurs jours, en présence de matrices variées, etc.).

Finalement, pour les étapes de pré-traitement et d'analyse, il faut tenir compte des dangers de perte ou de contamination (ex.: contamination par des détergents à base de polyphosphates dans les déterminations des différentes formes de phosphore; contamination par des membranes filtrantes, entre autre pour NH_4 et N-organique).

Suite à ce que nous venons de voir, l'erreur totale S_{Q_m} commise sur l'évaluation du débit massique peut être estimée par:

$$S_{Q_m} = \sqrt{S_E^2 + S_M^2 + S_A^2} \quad (3.15)$$

où S_E représente l'erreur inhérente à l'échantillonnage du phénomène;

S_M représente l'erreur inhérente aux techniques de mesure sur le terrain;

S_A représente l'erreur inhérente aux techniques d'analyse physico-chimique.

3.3 Traitement des données¹

Après examen des données et en concertation avec le SPEQ, trois sections transversales ont été choisies comme exemples pour y appliquer les différents traitements de données. Le choix de ces sections a été motivé par l'intérêt pratique qu'elles présentent et parce qu'elles ont été étudiées de façon plus intensive que les autres par le SPEQ. Ce sont les sections dans le lac Saint-Louis (millage 143.5), à Varennes ou Repentigny (millages 173.8, 174.0, 174.2, 174.7 et 175.1) et dans le lac Saint-Pierre (millage 216.0).

3.3.1 Vérification des hypothèses

Avant d'adopter une équation simplifiée pour le calcul du débit massique, il faut évidemment évaluer la validité des hypothèses qui la sous-tendent, étant donné que ces hypothèses, si elles s'avéraient inexactes, introduiraient des erreurs, comme on l'a vu dans la section 3.2.

En ce qui a trait aux vitesses, elles varient généralement, pour la majorité des cours d'eau transversalement et verticalement; c'est sûrement le cas dans le Saint-Laurent et il est facile de le vérifier. Pour un écoulement en bloc, dans un canal rectangulaire, ce qui est un cas peu commun, en pratique on pourrait cependant faire des hypothèses d'uniformité des vitesses dans l'espace. De plus, si l'on considère une échelle de temps suffisamment petite, on peut généralement supposer l'uniformité temporelle des vitesses en un point donné.

En ce qui a trait aux concentrations, on dispose actuellement de données sur lesquelles on peut faire des analyses statistiques pour examiner s'il y a uniformité spatiale et temporelle.

¹ Pour les fins de ce rapport, les symboles (NF) et (F) signifient que les échantillons étaient respectivement non filtrés et filtrés.

Variabilité temporelle pendant le temps d'échantillonnage

Afin de vérifier l'hypothèse d'une très faible variation temporelle pendant le temps requis pour l'échantillonnage d'une section, des échantillons ont été prélevés à cinq stations, à des intervalles de temps de quinze minutes, pendant la durée l'échantillonnage d'une section transversale. Deux de ces stations étaient localisées dans la section située dans le lac Saint-Louis et les trois autres, dans les sections situées à Varennes. Cet échantillonnage a eu lieu en novembre 1975. Pour chacun des paramètres pertinents au projet "Bilans de substances nutritives dans le fleuve Saint-Laurent", l'écart type et le coefficient de variation, C_v , ont été calculés et sont donnés dans les Tableaux 3.3 et 3.4.

En consultant ces tableaux, on observe une variabilité élevée ($C_v > 0.25$) pour les paramètres suivants:

phosphore total (F)
 phosphore total (NF)
 phosphore inorganique (F)
 ortho-phosphates (F)
 azote ammoniacal (F)
 azote organique (F)

On ne peut cependant pas imputer à la variabilité temporelle du phénomène (pendant le temps d'échantillonnage) toute la variabilité exprimée dans les coefficients de variation apparaissant dans les Tableaux 3.3 et 3.4. En effet, si on se réfère à l'équation 3.15 portant sur le calcul de l'erreur totale sur le débit massique, on peut déduire, avec le même raisonnement, l'équation suivante:

$$(\text{var } C)_T = (\text{var } C)_E + (\text{var } C)_M + (\text{var } C)_A \quad (3.16)$$

où:

$(\text{var } C)_T$ est la variance totale des concentrations;

$(\text{var } C)_E$ est la variance des concentrations attribuable aux erreurs d'échantillonnage du phénomène (pendant le temps d'échantillonnage d'une section);

TABEAU 3.3: Variabilité temporelle, pendant l'échantillonnage de la section située au lac Saint-Louis (millage 143.5), mesurée à deux stations localisées dans cette section - Echantillonnage réalisé en novembre 1975; prélèvements effectués à toutes les quinze minutes, pendant deux heures et demie.

Paramètres	Station: bouée 22S ¹		Station: bouée 34S ¹	
	Ecart-type ²	Coefficient de variation	Ecart-type ²	Coefficient de variation
P _T (F) ³	0.009 (.04)	0.23	0.008 (.03)	0.26
P _T (NF) ⁴	0.010 (.06)	0.17	0.020 (.05)	0.44
P-in. (F)	0.006 (.02)	0.32	0.004 (.02)	0.21
P-in. (NF)	0.007 (.06)	0.12	0.011 (.07)	0.16
o-PO ₄ (F)	0.005 (.02)	0.23	0.005 (.02)	0.26
N-Kjeldahl (NF)	0.059 (.27)	0.22	0.044 (.24)	0.18
N-NH ₄ (F)	0.004 (.01)	0.41	0.005 (.02)	0.25
N-org. (F)	0.027 (.26)	0.11	0.108 (.24)	0.45
N-NO ₃ (F)	0.003 (.19)	0.02	0.005 (.18)	0.03
DCO	0.82 (9.0)	0.09	0.70 (8.4)	0.08
Conductivité	4.2 (305)	0.014	2.6 (317)	0.008
Solides en suspension	2.1 (13)	0.16	1.7 (16)	0.11

¹ : 10 échantillons ont été prélevés.

² : Les chiffres entre parenthèses sont les valeurs moyennes; elles sont exprimées en mg/l (de O₂, N ou PO₄ dans le cas des formes de carbone, d'azote ou de phosphore) sauf pour la conductivité qui est exprimée en µmhos/cm.

³F : Echantillon filtré.

⁴NF: Echantillon non filtré.

TABLEAU 3.4: Variabilité temporelle, pendant l'échantillonnage des sections situées à Varennes, mesurée à trois stations localisées dans ces sections. - Echantillonnage réalisé en novembre 1975; prélèvements effectués à toutes les quinze minutes.

Paramètres	Station: point A ¹		Station: point B ²		Station: bouée 132M ³	
	Ecart-type ⁴	Coefficient de variation	Ecart-type ⁴	Coefficient de variation	Ecart-type ⁴	Coefficient de variation
P _T (F) ⁵	0.013 (.06)	0.20	0.026 (.08)	0.32	0.013 (.05)	0.25
P _T (NF) ⁶	0.009 (.11)	0.08	0.069 (.19)	0.37	0.013 (.10)	0.13
P-in. (F)	0.007 (.01)	0.47	0.008 (.03)	0.27	0.007 (.01)	0.68
P-in. (NF)	0.009 (.10)	0.09	0.017 (.13)	0.13	0.008 (.09)	0.09
o-PO ₄ (F)	0.003 (.01)	0.39	0.008 (.02)	0.41	0.003 (.01)	0.39
N-Kjeldahl (NF)	0.013 (.26)	0.05	0.042 (.52)	0.08	0.031 (.28)	0.11
N-NH ₄ (F)	0.011 (.06)	0.18	0.034 (.31)	0.11	0.016 (.06)	0.29
N-org. (F)	0.011 (.18)	0.06	0.021 (.21)	0.10	0.034 (.20)	0.17
N-NO ₃ (F)	0.013 (.22)	0.06	0.008 (.27)	0.03	0.004 (.20)	0.02
DCO	0.50 (8.3)	0.06	0.50 (10)	0.05	1.94 (9.2)	0.21
Conductivité	3.2 (320)	0.01	9.8 (327)	0.03	3.3 (330)	0.01
Solides en suspension	1.8 (18)	0.10	0.50 (17)	0.03	1.5 (19)	0.08

¹ : 5 échantillons ont été prélevés.

² : 4 échantillons ont été prélevés.

³ : 6 échantillons ont été prélevés.

⁴ : Les chiffres entre parenthèses sont les valeurs moyennes; elles sont exprimées en mg/l. (de O₂, N ou PO₄ dans le cas des formes de carbone, d'azote et de phosphore) sauf pour la conductivité qui est exprimée en μ mhos/cm.

⁵ F : Echantillon filtré.

⁶ NF : Echantillon non filtré.

$(\text{var } C)_M$ est la variance des concentrations attribuable aux opérations sur le terrain;

$(\text{var } C)_A$ est la variance des concentrations attribuable aux opérations lors des analyses en laboratoire.

Dans le cas présent, on peut supposer sans trop de risques que les erreurs dues aux opérations sur le terrain sont négligeables en raison de la procédure utilisée (échantillonnage en un point fixe). Les erreurs dues aux opérations de laboratoire ont été évaluées à partir d'un autre échantillonnage effectué en novembre 1975 (voir la section 3.3.3); elles ont également été traduites en terme de coefficients de variation (voir le Tableau 3.23).

L'équation 3.16 peut être traduite en terme de coefficients de variation:

$$C_{V_E} = \sqrt{C_{V_T}^2 - C_{V_M}^2 - C_{V_A}^2} \quad (3.17)$$

En posant $C_{V_M} = 0$ et en utilisant les coefficients de variation¹ C_{V_A} présentés dans le Tableau 3.23, on peut estimer l'erreur relative attribuable à la variabilité temporelle pendant la période d'échantillonnage; ces résultats sont présentés dans le Tableau 3.5. L'examen des résultats présentés dans ce tableau montre que la variabilité due aux opérations de laboratoire est, la plupart du temps, plus importante que la variabilité temporelle du phénomène sur une courte période de temps (maximum de deux heures et demie). Il est cependant possible que la variabilité temporelle des concentrations, surtout pour le phosphore total (F ou NF) soit importante dans certains cas. On doit donc conclure qu'en général, le temps utilisé normalement pour échantillonner une section du Saint-Laurent introduit une erreur négligeable dans l'estimation du débit massique. Cette conclusion serait évidemment plus rigoureuse si les données utilisées pour calculer la variabilité due aux opérations de laboratoire étaient issues de l'échantillonnage où on effectuait des prélèvements à toutes les quinze minutes. L'utilisation du coefficient de variation a cependant permis de contourner cette difficulté.

¹ Evidemment, on suppose que les coefficients de variation utilisés sont égaux aux coefficients de variation que l'on aurait dû calculer pour un même échantillonnage (les valeurs moyennes seraient alors égales).

TABEAU 3.5: Estimation de la variabilité pendant le temps d'échantillonnage d'une section

Paramètres	C_{V_T}		$C_{V_A}^3$	C_{V_E}	
	Section au lac Saint-Louis millage 143.5 ¹	Sections de Varennes ²		Section au lac Saint-Louis millage 143.5	Sections de Varennes
P_T (F) ⁴	.24	.29	.14	.19	.25
P_T (NF) ⁵	.29	.31	.19	.22	.24
P-in. (F)	.25	.38	.32	* ⁶	.20
P-in. (NF)	.14	.11	.19	*	*
o-PO ₄ (F)	.25	.39	.35	*	.17
N-Kjeldahl (NF)	.20	.09	.15	.13	*
N-NH ₄ (F)	.30	.16	.39	*	*
N-org. (F)	.31	.12	.16	.28	*
N-NO ₃ (F)	.02	.04	.016	.01	.04
DCO	.09	.13	.14	*	*
Conductivité	.011	.02	.009	<.01	.017
Solides en suspension	.13	.08	.27	*	*

- ¹ : Le coefficient de variation est calculé pour l'ensemble des échantillons prélevés aux deux stations (voir Tableau 3.3).
- ² : Le coefficient de variation est calculé pour l'ensemble des échantillons prélevés aux trois stations (voir Tableau 3.4).
- ³ : Le coefficient de variation est calculé pour l'ensemble des échantillons prélevés aux deux stations (voir le Tableau 3.23).
- ⁴ F : Echantillon filtré.
- ⁵ NF: Echantillon non filtré.
- ⁶ * : Signifie que C_{V_A} est plus grand que C_{V_T} moyen.

Variabilité temporelle d'un échantillonnage à l'autre

Après consultation avec le SPEQ, quatre paramètres, mesurés (SPEQ, 1976) mensuellement à cinq reprises en 1975 (juin, juillet, août, septembre et novembre) aux trois sections sélectionnées, ont été choisis afin de vérifier la variabilité temporelle sur une base mensuelle; ce sont les suivants:

- P_T (F);
- N_T (F);
- solides en suspension;
- DCO

Une comparaison des valeurs moyennes des concentrations calculées sur l'ensemble des stations de ces sections a été effectuée par l'analyse de variance; les résultats apparaissent dans le Tableau 3.6.

Les résultats démontrent clairement que dans une même section, il y a des variations significatives des concentrations d'un mois à l'autre. Cette observation est très importante car elle met en relief la nécessité d'un échantillonnage plus fréquent qui permette de mieux suivre cette variabilité.

La méthode de l'analyse de variance a également été utilisée pour traiter des données obtenues à plus grande fréquence en 1974 (SPEQ, 1975) et en 1973 (SPEQ, 1974).

Les données obtenues en 1974 résultaient de sept traversées effectuées sur une période de 4 jours au mois de juin et de cinq traversées effectuées sur une période de 4 jours au mois de juillet. Les sections (millages 131.8, 173.8, 174.2, 174.7 et 175.1) comprenaient plusieurs stations échantillonnées en surface seulement et qui pouvaient être localisées d'après le mode d'échantillonnage: un bateau traversait le fleuve à vitesse constante et les échantillons étaient prélevés à des temps connus. Les paramètres suivants ont été traités:

- P_T (F);
- N-org (F);

TABLEAU 3.6: Variabilité temporelle des concentrations sur une base mensuelle à trois sections transversales du Saint-Laurent - Données de 1975 (analyse de variance).

Section et millage	Paramètre	Degrés de liberté		Valeur calculée de F^1	Valeur théorique de F (5%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries		
Lac Saint-Louis (143.5)	P_T (F)	4	63	1.02	3.65
	N_T (F)	4	62	13.23*	3.65
	S.S. ²	4	55	50.8 *	3.68
	DCO	4	63	13.8 *	3.65
Varenes (173.8 et 174.2)	P_T (F)	4	98	3.13	3.52
	N_T (F)	4	102	10.08*	3.51
	S.S.	4	94	24.63*	3.52
	DCO	4	102	84.9 *	3.51
Lac Saint-Pierre (216.0)	P_T (F)	4	130	11.63*	3.47
	N_T (F)	4	130	11.43*	3.47
	S.S.	4	100	2.51	3.51
	DCO	-	-	-	-

¹*: L'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 5%.

² : S.S.: solides en suspension.

- N-NH₄ (F);
- N-NO₃ (F);
- DCO.

Le choix des paramètres, parmi ceux qui sont liés aux substances nutritives, était essentiellement basé sur la fréquence de mesure et sur les données disponibles.

L'application de la méthode de l'analyse de variance a encore permis de mettre en évidence des différences significatives, (voir les Tableaux 3.7, 3.8 et 3.9) dans certains cas, entre les moyennes calculées sur l'ensemble des stations pour chacun des temps, ce qui traduit une certaine variabilité temporelle dans la section considérée.

Pour les données obtenues en 1973, on disposait de valeurs pour 10 traversées effectuées sur une période de deux jours, au mois d'août. La section (millage 174.0), située à Repentigny, comprenait 27 stations échantillonnées en surface. Les stations pouvaient être localisées d'après le mode de prélèvement: un bateau traversait le fleuve à vitesse constante et les échantillons étaient prélevés à des temps connus. Les paramètres suivants ont été traités:

- N-NH₄ (NF);
- P-inorg. (NF).

Le choix des paramètres, parmi ceux qui sont liés aux substances nutritives, était basé sur la fréquence de mesure et sur les données disponibles.

L'application de la méthode de l'analyse de variance a permis de mettre en évidence (voir le Tableau 3.10), pour le phosphore inorganique (F), des différences significatives entre les moyennes calculées sur l'ensemble des stations de la section pour chacun des temps, ce qui traduit une certaine variabilité temporelle. Ce n'est cependant pas aussi évident pour l'azote ammoniacal (F).

TABLEAU 3.7: Variabilité temporelle des concentrations sur une courte période de temps pour une section du lac Saint-Louis (millage 131.8) - Données de 1974 (analyse de variance).

Date	Paramètre	Degrés de liberté		Valeur calculée de F ¹	Valeur théorique de F (5%)	Valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
Juin 1974 ²	P _T (F) ⁴	1	10	0.63	4.96	10.00
	N-NO ₃ (F)	6	34	16.44 **	2.38	3.39
	N-NH ₄ (F)	6	35	3.40 **	2.37	3.37
	N-org. (F)	4	21	38.32 **	2.57	4.37
	DCO	4	25	16.09 **	2.49	4.18
Juillet 1974 ³	P _T (F)	1	10	26.42 **	4.96	10.00
	N-NO ₃ (F)	3	20	3.50 *	3.10	4.94
	N-NH ₄ (F)	4	25	40.72 **	2.49	4.18
	N-org. (F)	4	25	7.13 **	2.49	4.18
	DCO	4	25	11.53 **	2.49	4.18

¹ : l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1% (**) ou de 5% (*).

² : 7 échantillonnages en 4 jours successifs.

³ : 5 échantillonnages en 4 jours successifs.

⁴F: échantillon filtré.

Tableau 3,8: Variabilité temporelle sur une courte période de temps (sept échantillonnages en 4 jours successifs), en juin 1974, pour des sections situées à Varennes (analyse de variance).

Millage des sections	Paramètre	Degrés de liberté		Valeur calculée de F ¹	Valeur théorique de F (5%)	Valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
173.8	P _T (F) ²	2	28	2.16	3.34	5.45
	N-NO ₃ (F)	6	60	10.98 **	2.25	3.12
	N-NH ₄ (F)	6	60	7.92 **	2.25	3.12
	N-org. (F)	2	25	8.97 **	3.38	5.58
	DCO	4	44	40.98 **	2.59	3.79
174.2	P _T (F)	2	8	21.34 **	4.46	8.65
	N-NO ₃ (F)	6	24	15.35 **	2.51	3.67
	N-NH ₄ (F)	6	25	1.80	2.49	3.63
	N-org. (F)	2	10	6.45 *	4.10	7.56
	DCO	4	15	6.10 **	3.06	4.89
174.7	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	6	42	44.85 **	2.33	3.27
	N-NH ₄ (F)	6	42	15.87 **	2.33	3.27
	N-org. (F)	3	15	7.81 **	3.29	5.42
	DCO	4	24	5.34 **	2.78	4.22
175.1	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	6	21	2.68 *	2.57	3.81
	N-NH ₄ (F)	6	21	5.03 **	2.57	3.81
	N-org. (F)	2	9	5.54 *	4.26	8.02
	DCO	2	9	41.86 **	4.26	8.02

¹ : l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1% (**) ou de 5% (*).

² F: échantillon filtré.

Tableau 3.9: Variabilité temporelle des concentrations sur une courte période de temps (5 échantillonnages en 4 jours successifs), en juillet 1974, pour des sections situées à Varennes (analyse de variance).

Millage des sections	Paramètre	Degrés de liberté		Valeur calculée de F ¹	Valeur théorique de F (5%)	Valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
173.8	P _T (F) ²	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	4	32	6.09 **	2.67	3.97
	N-NH ₄ (F)	4	32	0,30	2.67	3.97
	N-org. (F)	3	23	13,31 **	3.03	4.77
	DCO	3	22	3,09 *	3,05	4,82
174,2	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	4	13	2,11	3,18	5,21
	N-NH ₄ (F)	4	18	1,78	2,93	4,58
	N-org. (F)	3	10	0,64	3,71	6,55
	DCO	3	11	2,59	3,59	6,22
174,7	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	4	29	0,88	2,70	4,05
	N-NH ₄ (F)	4	29	1,29	2,70	4,05
	N-org. (F)	3	23	1,43	3,03	4,77
	DCO	3	23	13,13 **	3,03	4,77
175,1	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	2	9	0,30	4,26	8,02
	N-NH ₄ (F)	3	12	2,50	3,49	5,95
	N-org. (F)	2	9	2,54	4,26	8,02
	DCO	2	9	2,59	4,26	8,02

¹ : l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1% (**)
ou de 5% (*).

² F: échantillon filtré.

Tableau 3.10: Variabilité temporelle des concentrations sur une courte période de temps (dix échantillonnages en deux jours successifs), en août 1973, pour une section située à Repentigny (millage 174.0) (analyse de variance).

Paramètre	Degrés de liberté		Valeur calculée de F'	Valeur théorique de F (5%)	Valeur théorique de F (1%)
	entre les séries	à l'intérieur des séries			
N-NH ₄ (NF) ²	9	250	1,99*	1,92	2,48
P-inorg. (NF)	9	250	5,48 **	1,92	2,48

¹ : l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1% (***) ou de 5% (*).

²NF: échantillon non filtré.

Variabilité spatiale

Pour évaluer la variabilité horizontale ou verticale dans les sections transversales, deux méthodes ont été utilisées; ce sont l'analyse de variance et le "test de Student" sur les observations pairées.

L'analyse de variance a d'abord été appliquée sur les données disponibles de phosphore total (F), azote total (F), sédiments en suspension et DCO aux trois sections sélectionnées. Rappelons que ces sections ont été échantillonnées à cinq reprises en 1975. D'après les résultats présentés dans le Tableau 3.11, l'analyse de variance ne fait pas ressortir de stratification horizontale ou verticale importante dans ces sections, sauf pour la section située dans le lac Saint-Pierre.

Cette méthode a également été appliquée par le SPEQ sur des données recueillies à plusieurs autres sections qui ne sont pas considérées dans cette étude. Les résultats ont également démontré que, sauf pour quelques points particuliers d'échantillonnage et pour certains paramètres, il n'y a pas de stratification importante des concentrations dans une section transversale.

De plus, l'analyse de variance a été utilisée pour traiter des données de 1974 (SPEQ 1975) obtenues aux mois de juin et juillet (millages 131.8, 173.8, 174.2, 174.7 et 175.1) et de 1973 (SPEQ 1974) obtenues au mois d'août (millage 174.0). Ces données sont décrites en plus de détail dans cette section du rapport, sous le titre: "*variabilité temporelle d'un échantillonnage à l'autre*".

L'application de la méthode de l'analyse de variance a alors permis de mettre en évidence:

- qu'en ce qui concerne les données de 1974, il n'y a pas, pour chaque section considérée individuellement, de différences significatives entre chacune des moyennes temporelles calculées pour les stations, ce qui traduit une certaine homogénéité transversale (voir les Tableaux 3.12 à 3.14);
- qu'en ce qui concerne les données de 1973, il y a des différences significatives entre chacune des moyennes temporelles calculées pour les stations, ce qui traduit une certaine variabilité transversale (voir le

TABLEAU 3.11: Variabilité spatiale (horizontale et verticale) à trois sections transversales du Saint-Laurent (analyse de variance).

Section et millage	Paramètre	Degrés de liberté		Valeur calculée de F ¹	Valeur théorique de F (5%)	Valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
Lac Saint-Louis (143.5)	P _T (F)	16	49	.67	1.87	2.42
	N _T (F)	16	48	.52	1.87	2.42
	Solides en suspension	16	41	.34	1.92	2.52
	DCO	16	48	2.54 **	1.87	2.42
Varenes (173.8 et 174.2)	P _T (F)	23	77	.74	1.70	2.09
	N _T (F)	23	80	1.81 *	1.68	2.08
	Solides en suspension	23	72	.32	1.70	2.10
	DCO	23	80	.56	1.68	2.08
Lac Saint-Pierre (216.0)	P _T (F)	33	100	1.95 **	1.55	1.86
	N _T (F)	34	100	1.79 *	1.55	1.86
	Solides en suspension	30	65	3.14 **	1.63	2.00
	DCO	-	-	-	-	-

¹*: L'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1% (***) ou de 5% (*).

TABLEAU 3.12: Variabilité horizontale des concentrations, en juin 1974, pour des sections situées à Varennes (analyse de variance).

millage de la section	paramètre	degrés de liberté		valeur calculée de F ¹	valeur théorique de F (5%)	valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
173.8	P _T (F) ²	10	20	1.52	2.35	3.37
	N-NO ₃ (F)	10	56	0.60	2.02	2.66
	N-NH ₄ (F)	10	56	0.58	2.02	2.66
	N-org (F)	8	21	0.50	2.42	3.50
	DCO	10	38	0.43	2.09	2.83
174.2	P _T (F)	4	6	0.32	4.53	9.15
	N-NO ₃ (F)	4	26	1.31	2.74	4.14
	N-NH ₄ (F)	4	27	3.08*	2.71	4.10
	N-org (F)	3	8	0.48	4.07	7.59
	DCO	4	15	0.44	3.06	4.89
174.7	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	6	42	0.17	2.33	3.82
	N-NH ₄ (F)	6	42	0.62	2.33	3.82
	N-org (F)	-	-	-	-	-
	DCO	6	22	1.71	2.55	4.31
175.1	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	3	24	3.34*	3.01	4.72
	N-NH ₄ (F)	3	24	0.65	3.01	4.72
	N-org (F)	3	8	0.21	4.07	7.59
	DCO	3	8	0.10	4.07	7.59

¹*: l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 5%.

²F: échantillon filtré.

TABLEAU 3.13: Variabilité horizontale des concentrations, en juillet, dans les sections situées à Varennes (analyse de variance).

millage de la section	paramètre	degrés de liberté		valeur calculée de F ¹	valeur théorique de F (5%)	valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
173.8	P _T (F) ²	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	6	27	1.42	2.46	3.56
	N-NH ₄ (F)	6	27	0.96	2.46	3.56
	N-org (F)	6	20	0.18	2.60	3.87
	DCO	6	19	1.66	2.63	3.94
174.2	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	3	14	4.04*	3.34	5.56
	N-NH ₄ (F)	3	13	12.08**	3.41	5.74
	N-org (F)	3	10	2.16	3.71	6.55
	DCO	3	11	1.36	3.59	6.22
174.7	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	6	27	0.91	2.46	3.56
	N-NH ₄ (F)	5	23	1.26	2.64	3.95
	N-org (F)	6	20	1.38	2.60	3.87
	DCO	6	20	0.22	2.60	3.87
175.1	P _T (F)	-	-	-	-	-
	N-NO ₃ (F)	3	12	1.32	3.49	5.95
	N-NH ₄ (F)	3	12	0.63	3.49	5.95
	N-org (F)	3	8	0.99	4.07	7.59
	DCO	3	8	0.80	4.07	7.59

¹: l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1% (**)
ou de 5% (*).

²F: échantillon filtré.

TABLEAU 3.14: Variabilité horizontale des concentrations à la section située au lac Saint-Louis (millage 131.8) (analyse de variance).

période	paramètre	degrés de liberté		valeur calculée de F	valeur théorique de F (%)	valeur théorique de F (1%)
		entre les séries	à l'intérieur des séries			
Juin 1974	P _T (F) ¹	-	-			
	N-NO ₃ (F)	5	35	0.40	2.49	3.59
	N-NH ₄ (F)	5	36	0.67	2.48	3.57
	N-org (F)	5	20	0.14	2.71	4.10
	DCO	5	25	0.14	2.60	3.82
Juillet 1974	P _T (F)	-	-			
	N-NO ₃ (F)	3	20	0.39	3.10	4.94
	N-NH ₄ (F)	5	24	0.40	2.62	3.90
	N-org (F)	5	24	0.68	2.62	3.90
	DCO	5	24	0.63	2.62	3.90

¹F: échantillon filtré.

Tableau 3.15).

Plusieurs raisons peuvent expliquer les résultats différents obtenus pour les données de 1974 et celles de 1973:

- les paramètres considérés ne sont pas les mêmes;
- les sections ne sont pas localisées rigoureusement au même endroit;
- les données ne sont prises ni la même année, ni durant la même période de temps.

Dans une deuxième étape, le "test de Student" sur les observations paires a été utilisé pour les données de 1975 afin de mieux vérifier l'absence de stratification verticale dans les trois sections sélectionnées. Ce test qui porte sur les différences observées entre deux variables s'applique bien à des stations échantillonnées à différentes profondeurs et possède l'avantage d'être très sélectif pour faire ressortir de faibles différences. Il a été utilisé pour traiter les données de phosphore total (F); les résultats sont présentés dans les Tableaux 3.16 à 3.18. D'après les résultats, il n'y a pas de stratification verticale pour le phosphore total, sauf pour quelques cas. Cette méthode devrait être appliquée pour les autres paramètres relatifs aux substances nutritives afin de vérifier l'homogénéité verticale pour chacun.

3.3.2 Calcul des bilans

A la lumière des résultats présentés à la section 3.3.1, il a été décidé d'utiliser l'équation:

$$Q_{mT} = \sum_j \bar{Q}_{x_j, x_{j+1}} \cdot \bar{c}_{x_j, x_{j+1}} \quad (3.18)$$

pour calculer les débits massiques. Cette équation tient compte de la variation horizontale des concentrations qui a été mise en lumière dans quelques cas (voir la section 3.3.1). Les sections pour lesquelles les calculs ont été faits sont:

- section du lac Saint-Louis (millage 143.5);
- sections de Varennes (millages 173.8 et 174.2), situées dans le fleuve Saint-Laurent.

TABEAU 3.15: Variabilité horizontale des concentrations, à la section située à Repentigny (millage 174.0), au mois d'août 1973 (analyse de variance).

paramètre	degrés de liberté		valeur calculée de F ¹	valeur théorique de F (5%)	valeur théorique de F (1%)
	entre les séries	à l'intérieur des séries			
N-NH ₄ (NF) ²	26	233	29.00**	1.57	1.85
P-inorg (NF)	26	233	10.48**	1.57	1.85

^{1**}: l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau de signification de 1%.

²NF: échantillon non filtré.

TABLEAU 3.16: Etude de la stratification verticale de P_T (F) au moyen du "test de Student" sur les observations pairées. - Echantillonnages de juin, juillet, août, septembre et novembre 1975.

Section et millage	Profondeurs considérées	Degrés de liberté	Valeur calculée de T^1	Valeur théorique de T (5%)
Lac Saint-Louis (143.5)	1 pi vs 15 pi	20	0.16	± 2.09
Varenes (174.2)	1 pi vs 15 pi	11	1.54	± 2.20
	1 pi vs 30 pi	10	0.00	± 2.23
	15 pi vs 30 pi	9	0.26	± 2.26
Varenes (173.8)	1 pi vs 15 pi	17	3.56**	± 2.11
	1 pi vs 30 pi	10	0.00	± 2.23
	15 pi vs 30 pi	10	-3.18*	± 2.23
Amont du lac Saint-Pierre (216.0)	1 pi vs 15 pi	25	1.05	± 2.06
	1 pi vs 30 pi	8	0.21	± 2.31
	1 pi vs 45 pi	4	0.23	± 2.78
	15 pi vs 30 pi	8	-2.53*	± 2.31
	15 pi vs 45 pi	4	-2.45	± 2.78
	30 pi vs 45 pi	4	0.53	± 2.78

¹* : significativement différent de zéro au niveau de signification de 5%.

** : significativement différent de zéro au niveau de signification de 1%.

TABLEAU 3.17: Etude de la stratification verticale de P_T (F) au moyen du "test de Student" sur les observations pairées. Echantillonnage de novembre 1975 à la section située au lac Saint-Louis (millage 143.5)

Profondeurs considérés	degrés de liberté	valeur calculée de T	valeur théorique de T(5%)
1 pi vs 5 pi	9	0.69	±2.23
1 pi vs 10 pi	8	-0.55	±2.31
1 pi vs 15 pi	5	0.54	±2.57
5 pi vs 10 pi	7	-1.26	±2.36
5 pi vs 15 pi	5	0.98	±2.57
10 pi vs 15 pi	5	1.35	±2.57

TABLEAU 3.18: Etude de la stratification verticale de $P_T(F)$ au moyen du "test de Student" sur les observations T pairées - Echantillonnage de novembre 1975 à la section de Varennes (millage 173.8)

Profondeurs considérés	degrés de liberté	valeur calculée de T	Valeur théorique de T (5%)
1 pi vs 5 pi	9	0.00	2.26
1 pi vs 10 pi	8	-0.52	2.31
1 pi vs 15 pi	7	0.64	2.36
1 pi vs 20 pi	6	-0.86	2.45
1 pi vs 25 pi	6	-0.35	2.45
1 pi vs 30 pi	2	2.00	4.30
5 pi vs 10 pi	8	-2.29	2.31
5 pi vs 15 pi	7	1.53	2.36
5 pi vs 20 pi	6	-0.60	2.45
5 pi vs 25 pi	6	0.31	2.45
5 pi vs 30 pi	2	1.00	4.30
10 pi vs 15 pi	6	1.44	2.45
10 pi vs 20 pi	6	-0.60	2.45
10 pi vs 25 pi	6	1.70	2.45
10 pi vs 30 pi	2	2.00	4.30
15 pi vs 20 pi	6	-0.71	2.45
15 pi vs 25 pi	6	0.00	2.45
15 pi vs 30 pi	2	0.00	4.30
20 pi vs 25 pi	6	0.98	2.45
20 pi vs 30 pi	2	0.00	4.30
25 pi vs 30 pi	2	0.00	4.30

Les débits massiques pour la section en amont du lac Saint-Pierre n'ont pu être calculés, étant donné que les données de vitesse n'étaient pas disponibles pour cette section. Les valeurs de débit massique de $P_T(F)$, $N_T(F)$ et de sédiments en suspension sont présentés dans le Tableau 3.19 pour les cinq mois.

Les bilans journaliers ont également été calculés entre d'une part la section située dans le lac Saint-Louis (millage 143.5) et d'autre part la somme de deux sections de Varennes (millages respectifs de 173.8 et 174.2). Les résultats de ces calculs, effectués pour les mois de juin, juillet, août, septembre et novembre, apparaissent dans le Tableau 3.20.

3.3.3 Explication de la variance des bilans

Avant d'effectuer le calcul de la variance des bilans, il est important d'examiner la variance des débits massiques pour les sections du lac Saint-Louis (millage 143.5) et de Varennes (millages 173.8 et 174.2); les résultats de ce calcul sont présentés dans le Tableau 3.21. On constate que la variabilité du débit massique exprimée par le coefficient de variation est importante; elle se situe entre 21 et 85%. Il est cependant bon de noter que le calcul a été effectué avec un nombre réduit de valeurs.

Les résultats du calcul de la variance des bilans, que l'on retrouve dans le Tableau 3.22, démontrent sans ambiguïté la grande variabilité obtenue pour les bilans entre deux sections. Par exemple, dans le cas où le coefficient de variation est de 20.9 (voir le Tableau 3.22), on ne peut attribuer ces variations uniquement aux erreurs de mesure sur le terrain ou d'analyses en laboratoire, ou encore, à la variabilité temporelle des débits massiques. En effet, pour les solides en suspension, les erreurs dues aux opérations en laboratoire sont de l'ordre de 30% (voir le Tableau 3.23) alors que la variabilité temporelle des débits massiques est de l'ordre de 70%; (voir le Tableau 3.21); ces pourcentages sont négligeables devant les 2000% de variation du bilan des solides en suspension.

Pour le phosphore total (F) et l'azote total (F), on observe des variabilités du débit massique respectives de 209 et 167% (voir le Tableau 3.22).

TABLEAU 3.19: Valeurs de débits massiques aux sections situées au lac Saint-Louis et à Varennes.

Section et millage	Paramètre	Débit massique (10^{-3} kg/j)				
		juin	juillet	août	septembre	novembre
Lac Saint-Louis (143.5)	P _T (F)	26.0	63.7	34.0	34.4	49.5
	N _T (F)	554.3	330.4	258.6	255.5	337.5
	Solides en suspension	11,588.0	4,556.0	3,593.0	1,483.5	17,176.0
Varennes (174.2)	P _T (F)	13.4	7.8	6.8	5.7	6.6
	N _T (F)	57.5	56.5	46.0	39.9	70.0
	Solides en suspension	1,934.0	549.3	738.5	1,031.5	2,294.0
Varennes (173.8)	P _T (F)	18.7	32.6	29.1	25.9	33.4
	N _T (F)	226.7	170.0	176.5	176.6	340.3
	Solides en suspension	9,196.0	2,675.0	3,828.0	2,465.0	13,319.0

TABLEAU 3.20: Bilans journaliers de phosphore total (F), d'azote total (F) et de solides en suspension entre la section située au lac Saint-Louis (millage 143.5) et celles situées à Varennes (millages 173.8 et 174.2).

MOIS	Bilans journaliers (10^{-3} kg/j)		
	P_T (F)	N_T (F)	Sédiments en suspension
JUIN	6.14	-270	- 458
JUILLET	-23.26	-104	-1,332
AOUT	1.91	- 36.1	973
SEPTEMBRE	- 2.85	- 39.0	2,013
NOVEMBRE	- 9.48	72.8	-1,563

Tableau 3.21: Moyenne, écart-type, variance et coefficient de variation de débits massiques pour des sections du lac Saint-Louis et de Varennes.

Section et millage	Paramètre ¹	Moyenne (kg j ⁻¹)	Ecart-type (kg j ⁻¹)	Variance	Coefficient de variation
Lac Saint-Louis (143.5)	P _T (F)	41,510	15,029	2.259 x 10 ⁸	0.36
	N _T (F)	347,300	122,000	1.488 x 10 ¹⁰	0.35
	Solides en suspension	767,900	6,525,000	4.258 x 10 ¹³	0.85
Varennes (174.2)	P _T (F)	8,065	3,102	9.621 x 10 ⁶	0.38
	N _T (F)	53,978	11,570	1.338 x 10 ⁸	0.21
	Solides en suspension	1,309,000	764,900	5.851 x 10 ¹¹	0.58
Varennes (173.8)	P _T (F)	27,930	5,980	3.576 x 10 ⁷	0.21
	N _T (F)	218,000	72,060	5.193 x 10 ⁹	0.33
	Solides en suspension	6,297,000	4,786,000	2.290 x 10 ¹³	0.76

¹ F: échantillon filtré.

TABLEAU 3.22: Moyenne, écart-type, variance et coefficient de variation de bilans entre, d'une part, une section du lac Saint-Louis (millage 143.5) et, d'autre part, les sections de Varennes (millages 173.8 et 174.2).

Caractéristique	paramètres		
	$P_T (F)$	$N_T (F)$	solides en suspension
Moyenne ¹	-5.51	-75.3	-73.4
Ecart-type ¹	11.5	126.0	1533
Variance ²	132.2	15,880	2.35×10^6
Coefficient de variation	2.09	1.67	20.9

¹ : les valeurs sont exprimées en $\text{kg j}^{-1} \times 1000$.

² : les valeurs sont exprimées en $\text{kg}^2 \text{j}^{-2} \times 10^6$.

TABLEAU 3.23: Variabilité des paramètres due aux opérations de terrain et de laboratoire - Echantillonnage de novembre 1975 à deux stations (02 et 07) de la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

Paramètres	station 02 ¹		station 07 ²	
	écart-type ^{3,6}	coef. de variation	écart-type ^{3,6}	coef. de variation
P _T (F) ⁴	.009 (.08)	.12	.010 (.06)	.17
P _T (NF) ⁵	.015 (.08)	.18	.015 (.08)	.18
P-in. (F)	.008 (.02)	.36	.004 (.02)	.25
P-in. (NF)	.010 (.08)	.12	.021 (.09)	.23
o-PO ₄ (F)	.007 (.02)	.33	.005 (.01)	.37
N-Kjeldahl (NF)	.062 (.35)	.18	.017 (.24)	.07
N-NH ₄ (F)	.008 (.02)	.41	.004 (.01)	.36
N-org. (F)	.059 (.33)	.18	.027 (.22)	.12
N-NO ₃ (F)	.003 (.23)	.014	.003 (.15)	.02
DCO	1.54 (11.9)	.13	1.33 (8.3)	.16
Conductivité	1.7 (222)	.008	2.9 (318)	.009
Solides en suspension	2.3 (16)	.14	7.9 (26)	.30

¹ : 10 échantillons

² : 9 échantillons

³ : les valeurs entre parenthèses sont les moyennes

⁴F : échantillon filtré

⁵N.F.: échantillon non filtré

⁶ : les valeurs sont exprimées en mg/l (de O₂, N ou PO₄ dans le cas des formes de carbone, d'azote ou de phosphore) sauf pour la conductivité qui est exprimée en µmhos/cm.

Pour ces substances nutritives, les erreurs dues aux opérations de laboratoire sont de l'ordre de 15% (voir le Tableau 3.23) et la variation temporelle des débits massiques n'est que de l'ordre de 35% (voir le Tableau 3.21).

La variation élevée des bilans ne peut donc être expliquée par les erreurs dues aux opérations de laboratoire ni par la variabilité temporelle des débits massiques; elle serait plutôt due en grande partie à la variabilité du bilan lui-même. Etant donné le peu de mesures du bilan et sa très grande variabilité, on ne peut dire qu'il est significativement différent de zéro.

Erreurs liées aux opérations de laboratoire et de terrain

Afin d'évaluer l'erreur liée aux opérations de terrain et de laboratoire, des séries de dix prélèvements successifs ont été effectués à des stations choisies dans chacune des sections transversales du Saint-Laurent échantillonnées par le SPEQ. Cet échantillonnage spécial a eu lieu en novembre 1975. Les échantillons ont ensuite été acheminés et traités aux laboratoires du SPEQ comme des échantillons provenant de sources différentes.

Les résultats concernant la variabilité due aux opérations de laboratoire et de terrain sont présentés dans le Tableau 3.23 pour deux stations de la section du lac Saint-Louis (millage 143.5). Comme on le constate à l'examen de ce tableau, les erreurs peuvent être de l'ordre de 30%. Comme on l'a vu précédemment, c'est cette erreur qui explique, la plupart du temps, la variabilité totale observée sur une courte période de temps (ex.: durant le temps nécessaire pour échantillonner une section transversale).

Calcul des taux moyens de variation et de la variance des paramètres

Lorsqu'on a établi les équations théoriques du calcul de la variance (voir la section 3.2.1), il est apparu des termes aux dérivées partielles que l'on a appelé taux de variation du paramètre par rapport à x , y ou t . Afin de faire l'évaluation théorique de la variance du débit massique il est nécessaire d'évaluer ces taux moyens de variation.

A titre d'exemple d'évaluation du taux moyen, on a effectué, pour l'échan-

tillonnage du mois de novembre 1975, mois où l'on a observé dans les données disponibles à la section du lac Saint-Louis (millage 143.5) une grande variation de la concentration en fonction de la distance de la rive, le calcul du taux moyen de variation de $\frac{\partial c}{\partial x}$. Ce calcul a été effectué parce que l'on a observé à cette section une grande valeur de la variance de x; cette variance mesure la précision sur le positionnement transversal. La procédure suivie pour évaluer la variance de x ainsi que son calcul sont donnés dans l'Annexe 5.

On utilise alors l'équation 42 du Tableau 3.2 pour le calcul de la variance du débit massique

$$\begin{aligned} \text{var } (Q_m)_j &= Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x + Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t \\ &+ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x + c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \right)^2 \text{ var } y \\ &+ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 \text{ var } t + 2 c Q \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{ var } x \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\text{var } Q_{mT} = \sum_j \text{var } (Q_m)_j \quad (3.20)$$

Si on pose comme hypothèse que la variance sur la mesure de t est nulle, on peut ainsi éliminer le deuxième et le cinquième terme de l'équation. On peut aussi éliminer le quatrième terme en supposant que la variance sur la mesure de la profondeur d'échantillonnage est négligeable. On obtient donc:

$$\begin{aligned} \text{var } Q_{mT} &= \sum_j \left\{ Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x \right\}_j + \sum_j \left\{ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x \right\}_j \\ &+ \sum_j \left\{ 2 c Q \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{ var } x \right\}_k \end{aligned} \quad (3.21)$$

Les différentes variables de l'équation (3.21) sont évaluées dans l'Annexe 5. Pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5), en ce qui concerne le phosphore total, les termes de l'équation deviennent:

$$Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x = 1.9 \times 10^7 \text{ kg}^2/j^2$$

$$c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x = 1.6 \times 10^4 \text{ kg}^2/\text{j}^2$$

$$2 c Q \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{ var } x = 1.1 \times 10^6 \text{ kg}^2/\text{j}^2$$

et la variance du débit massique:

$$\text{var } Q_{mT} = 2.0 \times 10^7 \text{ kg}^2/\text{j}^2$$

A partir de la valeur calculée pour le débit massique en phosphore total filtré en novembre 1975 (49500 kg/jour), on peut calculer le coefficient de variation:

$$C_v (Q_{mT}) = 0.09$$

Le coefficient de variation, $C_v (Q_{mT})$ a également été calculé, pour la même section transversale et la même date, en utilisant les données d'azote total et de sédiments en suspension; les valeurs trouvées sont respectivement 0.03 et 0.05.

Les coefficients de variation calculés ainsi démontrent que la variabilité des débits massiques ne peut être expliquée uniquement par la variation transversale des paramètres. Le reste de la variabilité mesurée ne peut donc être expliqué que par la variabilité temporelle du phénomène et par les erreurs de mesure dues aux opérations de terrain et de laboratoire.

3.4 Recommandations concernant le plan d'échantillonnage

Suite aux calculs des débits massiques et des bilans ainsi qu'à l'estimation des erreurs associées, on peut dire que les bilans calculés ne sont pas significativement différents de zéro et qu'il est probablement inutile de les mesurer étant donné les efforts qui devraient y être consentis pour atteindre une précision suffisante. Cependant, dans l'éventualité où on voudrait poursuivre le projet, certaines recommandations générales peuvent être faites.

Etant donné la grande variabilité observée pour les bilans et le peu de données chronologiques, il faudrait augmenter la fréquence de mesure, c'est-à-dire diminuer les intervalles de temps entre les mesures dans les sections afin de mieux connaître le phénomène.

D'après les résultats présentés dans la section 3.3.3, il semble que l'erreur dans le positionnement (var x) peut engendrer une erreur importante sur le débit massique. Il est donc redemandé de diminuer le nombre de points de prélèvements (ex.: en éliminant les prélèvements à différentes profondeurs) dans une section et d'augmenter plutôt la qualité du positionnement.

D'après les résultats présentés dans le Tableau 3.5, il y a possibilité que les concentrations de phosphore total varient durant le temps nécessaire pour effectuer l'échantillonnage d'une section. Il est donc proposé, pour mieux évaluer cette variabilité temporelle, de prélever des échantillons, à des intervalles de temps égaux et pendant une période égale à celle de l'échantillonnage d'une section. Ces prélèvements devraient être effectués à une station pilote choisie pour chaque section. Il serait bon, également, à ces mêmes stations et au même moment, de prélever des séries d'échantillons successifs afin d'évaluer la variabilité due aux opérations de terrain et de laboratoire.

Lorsqu'on fait des analyses comparatives, l'absence d'un trop grand nombre de données dans un tableau compromet la validité des tests statistiques utilisés dans l'analyse. Il faudrait éviter dans la mesure du possible d'avoir trop de données manquantes.

4. APPLICATION DU PROGRAMME D'ACQUISITION DE DONNEES AU PROJET:
"ETUDE DE LA QUALITE DE L'EAU DES RIVES".

Entre Cornwall et Gaspé, le fleuve Saint-Laurent reçoit les eaux de plus de 40 tributaires et de 320 émissaires d'égouts sanitaires ou combinés. Le Saint-Laurent sert ainsi à la disposition des eaux usées de tous les villages et villes situées près de ses rives, ce qui correspond à une population de plus de 3,000,000 de personnes. De ces effluents, très peu sont traités.

Les tributaires et les émissaires ne se mélangent à l'eau du fleuve que bien en aval des points de confluence. Cet écoulement presque latéral des eaux amène inévitablement des problèmes ripariens attribuables aux tributaires de mauvaise qualité ainsi qu'aux effluents urbains. En effet, les zones influencées sont souvent celles qui sont ou pourraient être utilisées pour l'alimentation en eau et la récréation. Leur utilisation pour la disposition des eaux usées risque également d'entrer en conflit avec le potentiel de ces zones à soutenir une qualité de vie aquatique acceptable.

La connaissance de la qualité de l'eau des rives du Saint-Laurent est primordiale pour plusieurs raisons:

- les zones près des rives sont celles qui sont accessibles à la plupart des citoyens pour la récréation (baignade, pêche sportive, etc.);
- certaines de ces zones supportent la vie aquatique (frayères, etc.);
- ces zones servent souvent pour les prises d'eau, de même que pour le rejet des eaux usées;
- il y a lieu, à cause de l'utilisation conflictuelle de ces eaux, de prendre certaines décisions (interdiction de la baignade; choix de sites pour les prises d'eau; niveau de traitement à exiger avant déversement d'eaux usées; localisation des rejets d'eaux usées, etc.).

A cause de l'utilisation intense de ces zones, notamment pour le rejet d'eaux usées, on risque d'y observer d'importantes variations spatiales (ex.: zones de mélange des eaux usées) et temporelles (ex.: inconstance des rejets d'eaux usées; variations saisonnières dues aux changements de température de l'eau qui

influencent les vitesses de transformation de certains paramètres; variations diurnes, notamment pour les substances nutritives).

L'objectif du SPEQ, dans le projet PC-10, "Etude de la qualité de l'eau des rives", est d'obtenir une connaissance suffisamment précise de la qualité de ces eaux en vue de fixer les limites des différentes utilisations et d'éviter des usages conflictuels. Les trois utilisations considérées sont l'alimentation en eau, la récréation et le maintien de la vie aquatique.

Suite à l'entente entre le SPEQ et l'INRS, la présente consultation a pour but:

- a) en fonction des utilisations de l'eau, de regrouper, lorsque cela est possible, les stations correspondant à des comportements semblables de paramètres pertinents à ces utilisations et de délimiter certaines zones homogènes;
- b) d'évaluer l'application de méthodes statistiques aux données de qualité concernant les rives et de choisir les méthodes à utiliser pour traiter ces données;
- c) d'appliquer, si les données disponibles s'y prêtent, des méthodes statistiques pour compléter les données manquantes;
- d) d'aviser le SPEQ sur les éléments pertinents à la rationalisation de son réseau de mesures concernant les rives.

4.1 Approche utilisée

Notre but est d'établir, pour chacune des utilisations, un plan d'échantillonnage des paramètres pertinents avant d'en arriver finalement au plan d'échantillonnage le mieux adapté à l'étude de la qualité des rives pour satisfaire simultanément aux trois utilisations majeures: alimentation en eau, récréation et maintien de la vie aquatique. Pour chacune des utilisations, on utilise l'ensemble de l'information disponible, ce qui permet d'établir les grandes lignes du plan d'échantillonnage.

Pour en arriver à la sélection des paramètres pertinents, on se base, d'une part, sur les paramètres définissant la qualité de l'eau exigée pour l'utilisation et, d'autre part, sur les données existantes. En effet, dans le cas d'un paramètre déjà étudié, il y a lieu de se demander s'il est nécessaire de l'échantillonner à nouveau, compte tenu des données déjà disponibles et de son importance pour l'utilisation considérée.

La densité des stations doit, pour une zone donnée, être fonction de la variabilité spatiale du groupe de paramètres prioritaires, de la précision requise sur ces paramètres et de l'intensité de l'utilisation. Si la connaissance de la variabilité spatiale est insuffisante, on doit dans un premier temps utiliser comme critère l'intensité de l'utilisation; en effet, si une utilisation est intense, il est nécessaire de bien connaître les paramètres qui la caractérisent. Dans la localisation des stations, on cherche à s'assurer, compte tenu des contraintes de terrain, qu'elles permettent un bon échantillonnage de la variabilité spatiale.

Pour déterminer la fréquence d'échantillonnage, il faut connaître la variabilité temporelle des paramètres considérés ainsi que la précision requise. En l'absence d'une bonne connaissance de cette variabilité, on doit viser une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée pour permettre son évaluation.

En pratique, il est souvent difficile, sans une très bonne connaissance des liens qui existent entre l'utilisation et les paramètres reliés à cette utilisation, de fixer le niveau de précision requis sur ces paramètres. C'est pourquoi, dans un tel cas, on se contente en premier lieu de déterminer, pour un coût global fixé *à priori* et compte tenu des contraintes logistiques et analytiques, la densité des stations et la fréquence d'échantillonnage en fonction essentiellement de l'intensité de l'utilisation et du type de variabilité spatio-temporelle des paramètres liés à cette utilisation. On doit également examiner l'incidence du choix des méthodes de traitement des données sur le plan d'échantillonnage; l'utilisation de méthodes multivariées, permettant d'analyser de grands tableaux de données, incite à recommander l'obtention de tableaux complets ou tout au moins comportant peu de données manquantes.

Si on veut obtenir le plan d'échantillonnage global, une fois les grandes li-

gnes du plan d'échantillonnage établies pour chaque utilisation, il est alors nécessaire d'effectuer une synthèse. Le plan d'échantillonnage global ne sera probablement pas optimal pour chacun des paramètres donc pour chacune des utilisations, et sera le résultat de compromis.

4.2 Alimentation en eau

4.2.1 Qualité de l'eau exigée pour les sources d'alimentation

Il devient de plus en plus difficile, surtout dans les régions urbanisées, de trouver de l'eau potable acceptable, sans traitement. C'est pourquoi, dans la définition de la qualité exigée pour les sources d'eau potable, on tient compte des procédés de traitement de l'eau. Dans le Tableau 4.1 sont regroupées les différentes caractéristiques à considérer pour les sources d'approvisionnement en eau potable; on y distingue, pour plusieurs caractéristiques, la concentration visée (objectif), la concentration acceptable et la concentration limite. Cette dernière indique généralement la concentration maximale qu'on peut accepter dans une eau brute pour obtenir, après un traitement de coût non prohibitif, une eau propre à la consommation. Par traitement non prohibitif, on entend généralement les unités de coagulation-floculation-sédimentation, filtration et désinfection. Les valeurs limites indiquées dans le Tableau 4.1 ne sont pas immuables; au contraire, elles dépendent des développements technologiques des processus de traitement.

4.2.2 Paramètres mesurés

Parmi les paramètres regroupés dans le Tableau 4.1, seuls les suivants¹:

pH, couleur, turbidité, azote ammoniacal (F),
nitrites + nitrates (F), phosphore total (F),
bactéries coliformes et coliformes fécaux

¹

F: échantillon filtré

TABLEAU 4.1: Qualité exigée pour les sources d'alimentation en eau potable.

CARACTERISTIQUES		CONCENTRATION ¹						
		OBJECTIF		ACCEPTABLE		LIMITE		
		(CAN) ²	(OMS) ³	(CAN) ²	(OMS) ³	(CAN) ²	(OMS) ³	
1. physiques	couleur vraie ⁴	--	--	--	5	15	50	
	turbidité ⁵	--	--	5	5	--	25	
	pH (unités)	--	--	6.5-8.3	7.0-8.5	6.9	6.5-9.2	
2. toxiques	arsenic (As)	nd ⁶	--	0.01	--	0.05	0.05	
	cadmium (Cd)	nd	--	<0.01	--	0.01	0.01	
	mercure (Hg)	nd	--	--	--	0.005	0.001	
	plomb (Pb)	nd	--	<0.05	--	0.05	0.1	
	sélénium (Se)	nd	--	<0.01	--	0.01	0.01	
	cyanure (CN)	nd	--	0.01	--	0.2	0.05	
	baryum (Ba)	nd	--	<1.0	--	1.0	--	
	chrome (Cr ⁺⁵)	nd	--	0.05	--	0.05	--	
	argent (Ag)	nd	--	--	--	0.05	--	
	bore (B)	nd	--	<5.0	--	5.0	--	
	fluor (F)	1.2	--	1.2-0.1	0.8-1.5	1.5	--	
nitrate + nitrite (N)	<10.0	--	<10.0	--	10.0	--		
3. pesticides	aldrin	--	--	nd	--	0.017	--	
	chlordane	--	--	nd	--	0.003	--	
	DDT	--	--	nd	--	0.042	--	
	dieldrin	--	--	nd	--	0.017	--	
	endrin	--	--	nd	--	0.001	--	
	heptachlor	--	--	nd	--	0.018	--	
	époxyde d'heptachlor	--	--	nd	--	0.018	--	
	lindane	--	--	nd	--	0.056	--	
	méthoxychlor	--	--	nd	--	0.035	--	
	phosphates organiques ⁷ et carbonates	--	--	nd	--	0.10	--	
	toxaphène	--	--	nd	--	0.005	--	
	herbicides	--	--	nd	--	0.10	--	
	4. chimiques	ammoniaque (N)	0.01	--	0.5	--	--	--
		phosphates (PO ₄)	<0.2	--	0.2	--	--	--
sulfates (SO ₄)		<250	200	500	400	--	--	
sulfures ⁸ (H ₂ S)		nd	--	0.3	--	--	--	
chlorures (Cl)		<250	200	200	600	--	--	
ion uranyl (UO ₂)		<1.0	--	5.0	--	--	--	
calcium (Ca)		<75	75	200	200	--	--	
magnésium (Mg)		<50	30	150	150	--	--	
fer (total) (Fe)		<0.05	0.1	0.3	1.0	--	--	
cuivre (Cu)		<0.01	.05	1.0	1.5	--	--	
manganèse (Mn)		<0.01	.05	0.05	0.5	--	--	
zinc (Zn)		<1.0	5	5.0	15	--	--	
détergents (MBAS) ⁹ anioniques		<0.2	0.2	0.5	1.0	--	--	
matière organique (CCE + CAE) ¹⁰		<0.05	--	0.2	--	--	--	
phénols		nd	0.001	0.002	0.002	--	--	
solides dissous		<500	500	1,000	1,500	--	--	
dureté totale (CaCO ₃)		<120	100	--	500	--	--	
5. microbiologiques		coliformes totaux (MPN ou MFC) ¹¹	<100/100ml ¹²	--	<1000/100ml ¹³	--	<5000/100 ml ¹³	--
		fécaux	10/100 ml ¹²	--	10/100 ml ¹³	--	1000/100 ml ¹³	--
6. radioactivité	alpha (pCi/l)	14	--	15	3	16	--	
	beta (pCi/l)	14	--	15	30	16	--	

Notes explicatives pour le tableau 4.1

- ¹ : Les concentrations sont exprimées en mg/l à moins d'indication contraire.
- ² : Référence: Inland Water Branch, Department of the Environment (Canada). "Guidelines for water quality objectives and standards" - a preliminary report (1972).
- ³ : Référence: Organisation mondiale de la santé (OMS) "Normes internationales pour l'eau de boisson". - (1972).
- ⁴ : Echelle colorimétrique au platino-cobalt.
- ⁵ : Unités "Jackson" de turbidité.
- ⁶ : nd = non détectable
- ⁷ : Concentrations exprimées en termes d'équivalents de parathion (inhibition de la cholinestérase).
- ⁸ : Basé sur des considérations de goût et d'odeur.
- ⁹ : Substances dosées par la méthode du bleu de méthylène.
- ¹⁰ : Total de la matière organique extraite du charbon activé en utilisant du chloroforme et de l'éthanol.
- ¹¹ : Nombre le plus probable ou recherche des coliformes fécaux par la technique des membranes filtrantes.
- ¹² : Pour > 95% des échantillons prélevés pendant une période de 30 jours consécutifs.
- ¹³ : Pour > 90% des échantillons prélevés pendant une période de 30 jours consécutifs.

- ¹⁴ : 1/10 de la valeur maximum permissible dans l'eau d'après la Commission internationale de protection radiologique, pour 168 heures par semaines. On peut considérer que l'objectif est rencontré si l'analyse donne une radioactivité de moins de 10 picocuries par litre.
- ¹⁵ : 1/3 de la valeur maximum permissible dans l'eau d'après la Commission internationale de protection radiologique, pour 168 heures par semaine.
- ¹⁶ : La valeur maximum permissible d'après la Commission internationale de protection radiologique, pour 168 heures par semaine.

ont été déterminés par le SPEQ dans l'étude de la qualité de l'eau des rives (SPEQ, 1976). De plus, la conductivité a été mesurée, ce qui peut rendre compte, grossièrement des solides dissous.

4.2.3 Analyse des données

Turbidité

Les données disponibles proviennent des 300 stations échantillonnées entre Cornwall et Montmagny (SPEQ, 1976) en 1975-76. De ce nombre, seulement 125 l'ont été à cinq reprises (juin, juillet, août, septembre et octobre). La méthode d'analyse factorielle des correspondances décrite dans l'Annexe 6 a été utilisée pour traiter ces données. Afin de faire ressortir, par l'analyse multivariée, des similitudes de comportement de stations en fonction d'un paramètre, il est nécessaire de disposer d'un tableau complet de données. C'est pourquoi, on a utilisé, pour former le tableau de départ, les cinq valeurs de concentration provenant des 125 stations échantillonnées.

La représentation des stations dans le plan des axes principaux donne une image du comportement global des stations pour les mois considérés en fonction de la turbidité, alors que la proximité des stations indique des similitudes de comportement. En regroupant des points voisins dans la représentation, on peut délimiter des régions où les stations ont des comportements semblables. En ce qui a trait à la turbidité, en considérant le plan des deux premiers axes principaux, il a été possible de délimiter des régions homogènes pour lesquelles les stations de mesure ont des comportements semblables (voir Figures A.7.1 et A.7.2, annexe 7). Ces régions sont les suivantes:

- lac Saint-François, rive nord;
- lac Saint-Louis, rive nord;
- lac Saint-Louis, île Perrot;
- baie de Valleyfield;
- port de Montréal;
- de Repentigny à la partie amont du lac Saint-Pierre;
- de la partie aval du lac Saint-Pierre à Gentilly, rive sud;
- de Portneuf à Québec, rive nord et rive sud.

Toutes les régions délimitées sur les graphiques comportent plus de trois stations voisines entre elles; les nuages de points se recoupent parfois indiquant des similitudes de comportement d'une région à une autre. Signalons que dans la délimitation des zones, on n'a pas tenu compte des stations situées en aval de Québec.

Il est difficile, en raison de la faible densité de stations, de pousser plus loin l'interprétation. Notons cependant que la méthode permet d'identifier des stations dont le comportement est complètement différent des stations appartenant à la même région géographique. Ceci indique que la station n'est pas représentative de la région où elle se trouve.

Coliformes totaux et coliformes fécaux

Les données disponibles pour l'étude proviennent également des 300 stations échantillonnées entre Cornwall et Montmagny (SPEQ, 1976). Toutes ces stations ont été échantillonnées au cours des mois d'août, septembre et octobre. Par contre, en juin et en juillet le nombre a été de beaucoup inférieur (respectivement 185 et 215). Finalement, le nombre de stations visitées à cinq reprises n'est que d'environ 125 puisque beaucoup de stations échantillonnées en juin ne l'ont pas été en juillet.

De plus, les mesures de coliformes fécaux et coliformes totaux n'étaient effectuées que sur environ 40% des échantillons arrivant au laboratoire, ces 40% étant choisis de manière aléatoire. Il en résulte que pratiquement toutes les stations (sauf 25 des 300) ont au moins 1 donnée manquante. Cette sélection, ne favorise pas une analyse des données en raison des nombreuses données manquantes. Il nous apparaît préférable d'effectuer des prélèvements à moins de stations mais d'une manière systématique dans le temps.

La méthode employée pour analyser les résultats de turbidité n'a donc pu être utilisée pour traiter les données de coliformes totaux et fécaux à cause du trop grand nombre de données manquantes. On ne pouvait en effet considérer l'échantillonnage comme représentatif.

4.2.4 Recommandations concernant le plan d'échantillonnage

Même si, comme on l'a vu dans la section précédente, on ne peut actuellement tirer que peu de renseignements sur les paramètres pertinents à l'alimentation en eau, il est quand même possible de faire certaines recommandations d'ordre général quant au plan d'échantillonnage.

Choix de paramètres

Les paramètres qu'il importe de mesurer pour l'alimentation en eau à partir du Saint-Laurent sont énumérés ci-dessous par ordre décroissant d'importance et une justification de leur mesure est également apportée.

Les *coliformes* et *coliformes fécaux* sont un indice de contamination avec de la matière fécale et leur présence signale un danger de présence d'organismes pathogènes (bactéries ou virus). En concentration excessive, ces bactéries ne sont pas enlevées complètement par un traitement conventionnel. Etant donné les valeurs parfois élevées de coliformes et de coliformes fécaux dans le Saint-Laurent, il est sûrement important de les mesurer régulièrement.

La *turbidité* est reliée à la quantité de matériel mis en suspension naturellement ou suite à des activités humaines. Etant donné que, d'une part, on retrouve parfois des concentrations de sédiments en suspension moyennement élevées dans le Saint-Laurent et que, d'autre part, des concentrations trop élevées peuvent surcharger une usine de traitement et même nuire à la désinfection, il serait également important de mesurer la turbidité régulièrement.

Les *phénols*, à cause des problèmes de goût et d'odeur qu'ils peuvent apporter à l'eau, après traitement au chlore, devraient être mesurés régulièrement.

La *couleur* devrait également être mesurée de façon régulière. Elle peut provenir de tannins, de matériel ferro-humique ou, encore, de déchets organiques. L'efficacité des usines de traitement, pour les enlever, est souvent très variable.

Parmi les cations et anions énumérés dans le Tableau 4.1, le *phosphore total* pourrait être mesuré afin de fournir un "indice" de la fertilité de l'eau; dans le cas d'une fertilité excessive, il peut y avoir formation d'algues qui peuvent causer certains désagréments (bloquage des filtres à l'usine, mauvais goût à l'eau, etc.). Le *fer* et le *manganèse* pourraient également être mesurés, si cela est justifié après consultation auprès d'opérateurs d'usine de traitement de l'eau.

Les *toxiques* et les *pesticides* n'ayant jamais été mesurés dans l'étude des rives, il serait sûrement bon de le faire, ou moins occasionnellement. Ces mesures pourraient, par exemple, être effectuées sur des échantillons hebdomadaires ou mensuels, composés à partir d'échantillons prélevés à tous les jours aux usines de traitement d'eau et préservés adéquatement. La *radioactivité* pourrait également être mesurée, s'il y a lieu dans la région de Gentilly.

Localisation des stations

Les informations concernant l'utilisation actuelle de l'eau du fleuve pour l'alimentation sont regroupées dans le Tableau 4.2. Les données concernant les prises d'eau dans le lac des Deux-Montagnes et dans les rivières des Prairies et des Mille-Iles sont également incluses dans le tableau. Les informations, notamment en ce qui a trait aux systèmes de traitement dans les usines, sont souvent contradictoires dans les deux sources consultées (Lalonde *et al.*, 1974; Anonyme, 1973) et parfois incomplètes. L'information sur le niveau de traitement est pourtant primordiale pour une prévision des effets de changements de qualité de l'eau brute sur la qualité de l'eau de consommation.

Les données présentées dans le Tableau 4.2 montrent néanmoins l'importance actuelle de l'utilisation de l'eau du fleuve pour la consommation. On compte, en effet, entre Cornwall et Montmagny, 39 prises d'eau qui alimentent une centaine de municipalités, ce qui correspond à plus de 2,600,000 usagers. On ne possède pas actuellement de données concernant l'installation de nouvelles prises d'eau; ces renseignements pourraient cependant être obtenus des municipalités.

TABLEAU 4.2: Utilisation du Saint-Laurent comme source d'alimentation en eau.

Localisation de la prise d'eau	Autres municipalités desservies	Population totale desservie	Consommation journalière moyenne (MGIJ)	Usine de traitement		Capacité (MGIJ)
				Type		
				Référence 1	Référence 2	
Coteau du lac	St-Ignace	1,924		--	chloration	
Coteau Landing	La Station du Coteau	1,731		--	"	
Les Cèdres		436		--	"	
St-Zotique		1,243		--	"	
Valleyfield	Grande-Ile (74%)	31,500	9.1			
Beauharnois (90%)	Maple Grove (82%)	8,708	1.3		Fi. Conv.	2.5
Laprairie (95%)	Candiac (temporairement)	7,500	1.8		Fi. Conv.	2.0
Candiac (100%)	Delson, St-Constant, Ste-Catherine	5,185	2.4	C, Fi, Fc	Fi. Conv.	1.25
Saint-Lambert (100%)	Brossard Greenfield-Park Lemoine	50,000	4.7	Fi	FTA	12.5
Longueuil	Boucherville Brossard Greenfield-Park Lemoine St-Bruno St-Hubert Laflèche Notre-Dame	190,000	25.0	C, Fi, Fc	FTA 2 usines	34.0
Varennnes (80%)	Ste-Julie	4,547	1.2		Fi. Conv. 2 usines	2.0
Pointe-Claire	Beaconsfield Baie d'Urfe Kirkland Dollard des Ormeaux (35%) Ste-Anne de Bellevue (17%)	63,162	8.7	C, Fi, Fc F1	Fi. Conv.	14.0
Dorval (100%)	-	20,476	4.9	C, Fi, A Fc, F1	Fi. Conv.	8.75
Lachine	Ville Lasalle (43%)	75,775	15.8		Fi. Conv. 2 usines	13.4 13.7
Montréal	Anjou Côte St-Luc Hampstead Montréal est Montréal nord Montréal ouest Mont-Royal Outremont Pointe aux Trembles St-Léonard St-Pierre Verdun Westmount	1,678,954	284.5	C, Fi	Fi. Conv.	322.0
Lavaltrie		1,261	0.1			
Verchères		2,600	0.3	C, Fi		
Contrecoeur		850	0.4	C, Fi, Fe F1		
Berthierville		4,300	2.3		Fi. Conv.	
Becancour		5,000	0.3		Fi. Conv.	
Cap-Rouge	Ste-foy et une partie de Québec et Ancienne-Lorette	80,000	6.5		Fi. Conv.	
Sillery		14,068	3.0		Fi. Conv.	
Saint-Romuald	St-Jean Chrysostome et une partie de Lévis	8,910	0.6		Fi. Conv.	
Lévis		20,350	2.9	Fi		
Lauzon		12,500	2.4		Fi. Conv.	

TABLEAU 4.2: Utilisation du Saint-Laurent comme source d'alimentation en eau (suite).

Localisation de la prise d'eau	Autres municipalités desservies	Population totale desservie	Consommation journalière moyenne (MGJ)	Usine de traitement		
				Type		Capacité (MGJ)
				Référence 1	Référence 2	
Lac des Deux-Montagnes						
Oka		1,424	0.5		Fi. Conv.	
Deux-Montagnes	Ste-Marthe-sur-le-lac	11,800	1.5	C, Fi		
Laval-sur-le-lac		683			Fi. Conv.	
Chenaux Ste-Anne et Vaudreuil						
Vaudreuil		3,843	0.2		Fi. Conv.	
Ile Perrot	N.D. de l'île Perrot	5,573	0.5	Fi. Conv.	Fi. Conv. Ozone	
Senneville (76%)		1,073	0.7		Chlore	
Ste-Anne-de-Bellevue (83%)		4,130	0.7	Fi. Conv.	Fluor, Chlore et Ozone	
Rivière des Mille-Iles						
Laval	Laval-ouest, Ste-Rose, St-François	57,000		Fi. Conv.	Fi. Conv.	
Ste-Thérèse	Ste-Thérèse-ouest	22,500	3.9	Fi. Conv.	Fi. Conv.	
Rosemère	Lorraine	8,800	0.8	C, Fi, Fc F1		
Terrebonne	St-Louis-de-Terrebonne St-Charles-de-la-Chenaie	11,300	1.7	C, Fi, A Fc, F1	Fi. Conv.	
St-Eustache		7,925		Fi. Conv.	FTA	
Rivière des Prairies						
Pierrefonds	Ste-Geneviève, Roxboro Ile Bizard, Dollard-des-Ormeaux (65%)	62,831	5.9	Fi. Conv.		9
Laval	Chomedey, Pont-Viau Pénitencier St-Vincent-de-Paul	169,169	26.0	Fi. Conv. Fc, F1		
TOTAL		2,659,033	>420.6			

Notes explicatives pour le Tableau 4.2

- Référence 1: Anonyme. (1973). "Municipal statistics". Water and Pollution Control, Directory 1972-73, p. 36-46.
- Référence 2: LaLonde, Valois, Lamarre, Valois et Associés. (1974). "Etude du fleuve Saint-Laurent. Inventaire des équipements en eau et relevés industriels". 4 volumes.
- Signification des symboles utilisés:

A: aération
C: chloration
Fi. Conv.: filtration conventionnelle
Fi: filtration
Fc: floculation
F1: fluoration
FTA: filtration à taux accéléré.

Il est relativement facile de fixer la localisation des stations d'échantillonnage pour vérifier si la qualité de l'eau du fleuve est convenable pour l'alimentation en eau. Dans le cas des utilisations actuelles, il suffit de placer une station à chacune des prises d'eau actuelles (voir le Tableau 4.2). A moins qu'on n'ait l'intention de changer la localisation des prises d'eau, il n'est alors pas nécessaire de vérifier la variabilité spatiale. Des stations supplémentaires devraient également être prévues là où on prévoit utiliser, à court terme, l'eau du fleuve pour l'alimentation. Dans ces régions, les stations devraient être placées de façon à permettre d'identifier le meilleur emplacement pour la future prise d'eau.

Fréquence

La fréquence de mesure devrait être la plus élevée possible de façon à mettre en évidence la variabilité temporelle des paramètres pertinents à l'alimentation en eau. Pour les paramètres tels que les coliformes totaux, les coliformes fécaux, la turbidité, les phénols, la couleur, il est recommandé d'accroître la fréquence de mesure (ex.: prélèvements hebdomadaires). Pour les paramètres comme les toxiques le prélèvement devrait être journalier et des échantillons composés hebdomadaires ou au moins mensuels pourraient ensuite être préparés à partir de ces prélèvements journaliers pourvu qu'on se soit assuré de la conservation adéquate des échantillons. Le même procédé d'échantillonnage pourrait être utilisé pour le phosphore total, mais seulement pendant la période de production primaire (avril-octobre). Les pesticides devraient être mesurés au moins mensuellement; la fréquence pourrait être plus élevée pendant la période d'utilisation de ces produits (juin-septembre).

Contraintes imposées par les méthodes de traitement des données

Pour faciliter l'interprétation des résultats, surtout si on veut utiliser une méthode multivariée, il est recommandé d'avoir un échantillonnage conduisant à des tableaux complets de données. Si seulement quelques données sont absentes, elles peuvent être reconstituées, mais on ne doit pas perdre de vue que cette reconstitution n'apporte aucune information supplémentaire et ne fait que permettre le traitement.

4.3 Récréation (sports de contact)

Le terme récréation utilisé ici se rapporte surtout à la baignade et aux autres sports qui exigent un contact prolongé avec l'eau.

4.3.1 Qualité de l'eau exigée pour la récréation

Les différentes caractéristiques de l'eau à considérer pour la récréation sont regroupées dans le Tableau 4.3. Elles tiennent compte des dangers:

- de contracter des maladies au contact de virus ou de bactéries;
- de contracter des maladies de la peau ou des irritations;
- d'accidents causés par une mauvaise visibilité;
- d'empoisonnement par ingestion;

et de l'esthétique du milieu.

4.3.2 Paramètres mesurés

Parmi les paramètres regroupés dans le Tableau 4.3, seuls les suivants:

pH, couleur, turbidité, coliformes
et coliformes fécaux

ont été mesurées par le SPEQ (1976) dans l'étude de la qualité de l'eau des rives.

4.3.3 Analyse des données

Ici encore, parmi les paramètres mesurés, ce sont surtout les coliformes et la turbidité dont la connaissance est importante pour la récréation.

TABEAU 4.3: Qualité exigée pour l'eau servant à la récréation (Canada, 1972).

Caractéristiques	Concentration	
	Objectif	Limite supérieure
coliformes (NPP, médian) ¹	<100	500
coliformes fécaux (NPP, médian)	< 20	200
turbidité (unités Jackson)	< 5	50
disque Secchi (mètres)	6	1.2
pH (unités)	6.5-8.3	6.9
couleur (unités Pt/Co)	< 15	100
huiles, graisses (mg/l)	non visible	5
détergents anioniques (mg/l, équiv. ABS) ²	< 0.5	2
toxiques (mg/l)	³	
radioactivité totale (pico-curies/l)	0	<10

¹ NPP: nombre le plus probable.

² ABS: alkylbenzène sulfonate.

³ Voir le tableau 4.1.

Rappelons que l'analyse déjà décrite à la section 4.2.3 pour la turbidité a permis de faire ressortir une certaine zonation. Les résultats obtenus doivent cependant être considérés comme indicatifs en raison du nombre relativement restreint de stations pour lesquelles nous disposons de données complètes. En ce qui a trait aux coliformes, le trop petit nombre de données n'a pas permis un traitement satisfaisant, d'autant plus que ce paramètre présente une grande variabilité spatiale comme le montre la Figure 4.1. Les données présentées sur cette figure proviennent d'une campagne intensive effectuée en une seule journée (novembre 1975) dans la baie de Valois (une étude plus complète des données de cette baie est effectuée dans la section 4.5).

4.3.4 Recommandations concernant le plan d'échantillonnage

Même si, comme on l'a vu dans la section précédente, on ne peut actuellement tirer que peu de renseignements sur les paramètres pertinents à la récréation, il est quand même possible de faire certaines recommandations d'ordre général quant au plan d'échantillonnage.

Choix des paramètres

Les paramètres qu'il importe de mesurer pour vérifier la qualité de l'eau du Saint-Laurent pour la récréation sont énumérés ci-dessous et une justification de leur mesure est également apportée.

Les *coliformes* et les *coliformes fécaux* devraient être mesurés de façon régulière à cause des concentrations de ces bactéries observées dans les Saint-Laurent et également en raison des risques signalés, par leur présence. On remarquera que les concentrations admissibles de ces bactéries dans l'eau sont beaucoup plus faibles pour la récréation que pour les sources d'alimentation en eau.

La *turbidité*, les *huiles* et les *graisses* pourraient être mesurées en certaines zones à potentiel récréatif où ces paramètres risquent d'avoir des valeurs élevées et de nuire à l'esthétique du milieu.

B A I E D E V A L O I S

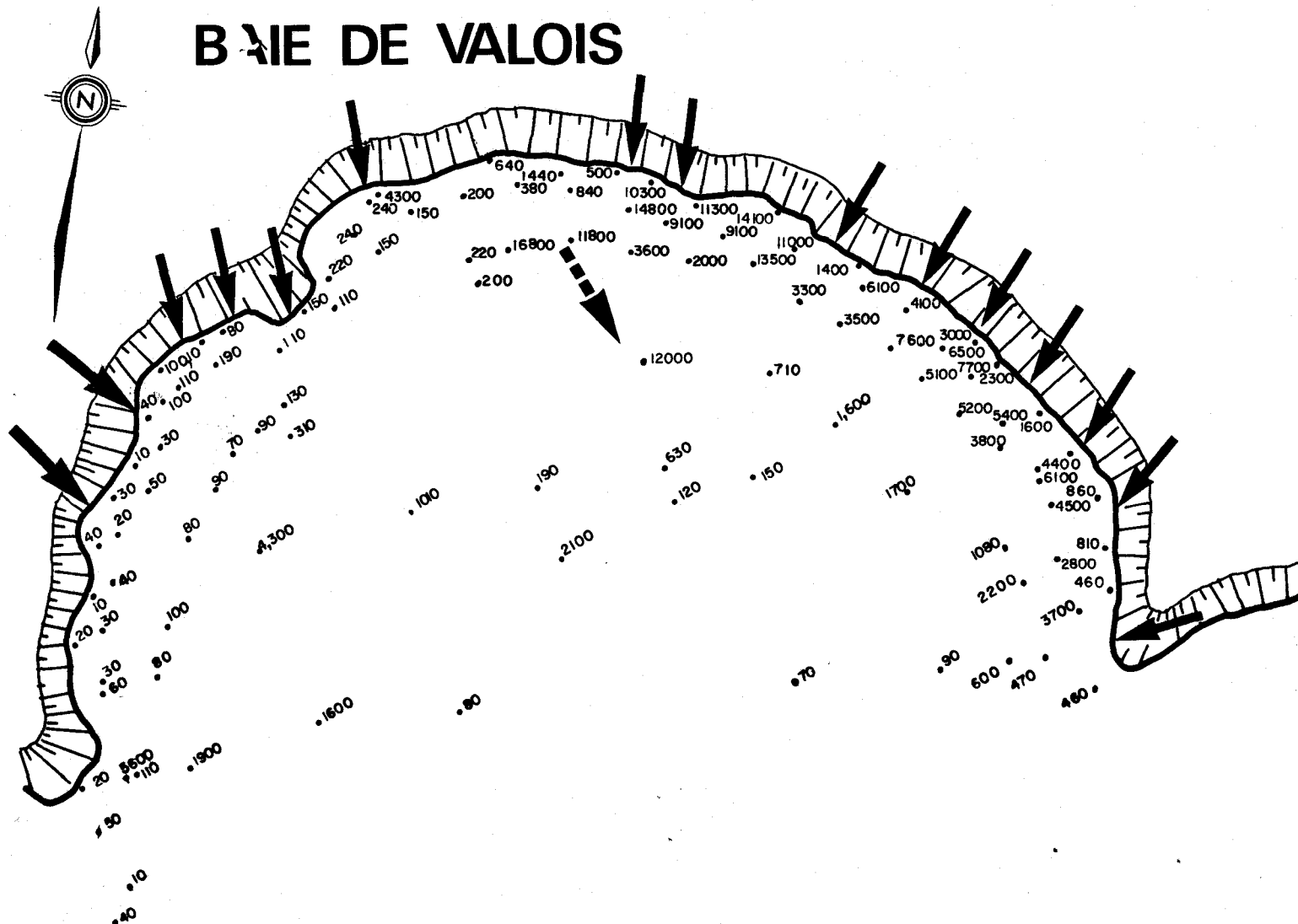


Fig. 4.1. Distribution des coliformes fécaux dans la Baie de Valois (les valeurs sont exprimées en terme de nombre de bactéries / ml),

Localisation des stations

Actuellement, pour l'ensemble des plages du Saint-Laurent, les normes en ce qui concerne les coliformes totaux et fécaux sont très souvent dépassées, ce qui fait que l'accès en est interdit pour la baignade. On peut, dans l'optique d'une restauration de la qualité de l'eau du fleuve, espérer que certaines d'entre elles pourront, dans un avenir plus ou moins proche, être utilisées à nouveau pour la récréation. Une telle amélioration pourrait, par exemple, résulter du traitement des eaux de la ville de Montréal.

Les informations que nous avons pu recueillir concernant les plages situées le long des rives du Saint-Laurent, du lac des Deux-Montagnes et des rivières des Prairies et des Mille-Iles sont regroupées dans le Tableau 4.4. Ces données, bien qu'incomplètes, montrent le grand potentiel récréatif du Saint-Laurent; on compte, en effet, pour les plages énumérées, plus de 170,000 pieds de berges utilisables pour la baignade.

Etant donné les fortes présomptions de contamination des plages du point de vue bactériologique, il est recommandé d'instaurer, comme point de départ, un nombre réduit de stations d'échantillonnage (p.e.: une ou deux stations par plage). Les échantillons devraient être obtenus en composant les prélèvements en différents points afin de tenir compte de la variabilité spatiale. Une comparaison des résultats obtenus avec les normes, en particulier pour les paramètres bactériologiques, devrait être effectuée le plus rapidement possible après le prélèvement des échantillons.

Pour les plages où on observe régulièrement un dépassement des normes, il n'y aurait pas lieu d'augmenter la densité des stations d'échantillonnage puisque ces plages doivent être alors interdites pour la baignade. Par contre, dans les cas où les concentrations observées sont en deçà des normes, il serait indiqué de déterminer la variabilité spatiale; l'important, dans ces cas, est en effet d'identifier s'il existe des zones où les concentrations dépassent les normes pour la récréation. A cet effet, la densité des stations devrait être augmentée; elle pourraient, par exemple, être disposées de façon à effectuer un quadrillage de la plage en s'inspirant de l'étude de la baie de Valois (voir la section 4.5).

TABLEAU 4.4: Caractéristiques des plages localisées le long du Saint-Laurent.

Municipalité	Plage	Longueur (pi)
Beaconsfield	Municipale	300
Ile Perrot	Sandy	165
Caughnawaga	Chief War Eagle Trailer	---
"	Mohawk	300
"	Wig Wam	400
"	Annabelle	230
Repentigny	3 non identifiées	4,900
St-Sulpice	1 non identifiée	3,900
Lanoraie	6 non identifiées	19,000
Berthierville et St-Barthélémy		152
Pointe du Lac	5 non identifiées	16,600
Verchères	1 non identifiée	16,000
Iles de Verchères	2 non identifiées	3,400
Contrecoeur	2 non identifiées	3,850
Sorel	5 non identifiées	25,500
Iles de Sorel	10 non identifiées	40,350
Ile St-Quentin (Trois-Rivières)	1 non identifiée	---
Champlain	1 non identifiée	---
Nicolet	5 non identifiées	9,400
Cap-Santé	1 non identifiée	---
Neuville	1 non identifiée	---
Cap-Rouge	1 non identifiée	---
St-Nicolas	1 non identifiée	---
St-François (Ile d'Orléans)	Camping Bellevue	---
"	Quai Saint-François	---
St-Jean	Parc Place Orléans	---
"	Parc Ile d'Orléans	---
St-Romuald	Domaine Etchemin	---
"	Plage Garneau	---
St-Gabriel-ouest	Plage Saint-Laurent	---

TABLEAU 4.4: Caractéristiques des plages localisées le long du Saint-Laurent (suite).

Municipalité	Plage	Longueur (pi)
St-Michel de Bellechasse	Plage Saint-Michel	---
Sillery	Plage Champlain	---
"	Plage Texaco	---
"	Quai Frontenac	---
Les Ecureuils	Quai des Ecureuils	---
Cap Santé	Quai de Cap Santé	---
Deschambault	Quai de Deschambault	---
St-Michel de Bellechasse	1 non identifiée	---
Berthier-sur-Mer	1 non identifiée	---
Lac des Deux-Montagnes		
Pierrefonds	Anse à l'Orme	840
Vaudreuil sur le lac	Anse de Vaudreuil	---
Ste-Marthe sur le lac	Camping Deux-Montagnes	540
St-Raphaël de l'Ile Bizard	Camping Royal Martin	600
Pointe-Calumet	Country Club	400
Oka	Des Familles	760
Pointe-Calumet	El Paraiso	800
Deux-Montagnes	El Rancho	720
Annonciation d'Oka	Jacob	540
Oka sur le lac	Parc provincial d'Oka	10,100
St-Raphaël de l'Ile Bizard	Pointe aux Carrières	900
Annonciation d'Oka	Richard	640
Ste-Marthe sur le lac	Roger	760
Hudson	Sandy	260
Annonciation d'Oka	Simon	165

TABLEAU 4.4: Caractéristiques des plages localisées le long du Saint-Laurent (suite).

Municipalité	Plage	Longueur (pi)
Rivière des Mille Iles		
Laval-ouest	De l'Est	720
Laval-ouest	De l'Ouest	95
Ile St-Joseph	Des Iles	720
Laval-ouest	Du Centre	840
Auteuil	Idéale	420
Auteuil	Jacques-Cartier	560
Bois-des-Filion	Municipale 39e avenue	142
Bois-des-Filion	Municipale 42e avenue	230
Bois-des-Filion	Municipale 59e avenue	140
Laval-ouest	Saratoga	450
Rivière des Prairies		
St-Raphaël de l'Ile Bizard	Camping Ile Bizard	135
Pierrefonds	Crystal	425
Chomedey	Mon Repos	400
St-Raphaël de l'Ile Bizard	Pointe-Théoret	630
Ste-Geneviève de Pierrefonds	Riveriera	350

Fréquence

Actuellement, on ne dispose que de mesures mensuelles qui ne donnent qu'une idée très superficielle et insuffisante de la variabilité temporelle le long des rives. Il est donc recommandé d'augmenter la fréquence des mesures afin de bien identifier le type de variation temporelle des paramètres importants pour la récréation.

Enfin, étant donné que l'eau des rives n'est utilisée pour la récréation que pendant une courte période de l'année, il est recommandé d'intensifier l'échantillonnage pendant cette période.

Contraintes imposées par les méthodes de traitement des données

Pour faciliter l'interprétation des résultats, surtout si on veut utiliser une méthode multivariée, il est recommandé d'avoir un échantillonnage conduisant à des tableaux complets de données. Si seulement quelques données sont absentes, elles peuvent être reconstituées, mais on ne doit pas perdre de vue que cette reconstitution n'apporte aucune information supplémentaire et ne fait que permettre le traitement.

4.4 Qualité de la vie

Par qualité de la vie, on entend ici l'aptitude du milieu à maintenir l'équilibre d'un écosystème.

4.4.1 Qualité de l'eau exigée

Lorsqu'on considère l'utilisation de l'eau pour le maintien de la faune et de la flore aquatique, les critères de qualité relatifs aux substances nutritives doivent être beaucoup plus exigeants que pour les autres utilisations. Ces critères ont été élaborés pour éviter l'eutrophisation du milieu. Comme l'indique le Tableau 4.5, au moins deux types de critères existent: d'une part, des concentrations limites au delà desquelles il y a danger de surpopulation d'algues et, d'autre part, des concentrations limites au delà desquelles la production primaire n'augmente plus.

Comme on peut le constater dans le Tableau 4.5, ces critères ont été développés surtout pour les lacs et l'application de tels critères aux eaux courantes n'est donc pas toujours appropriée. Il faut en effet tenir compte des différences entre les milieux lotiques (eaux courantes) et lénitiques (eaux stagnantes). Dans les deux cas, les facteurs influant sur la productivité primaire sont les mêmes, mais leur importance relative peut être très différente. Par exemple, les facteurs physiques (pénétration de la lumière, turbulence, vitesse de courant, substratum disponible) sont souvent déterminants dans un cours d'eau; par contre, les facteurs chimiques deviennent souvent prépondérants dans un milieu lacustre. Les concentrations limites indiquées pour le milieu lacustre ne peuvent donc s'appliquer directement aux eaux courantes, sauf si on veut évaluer la production des milieux lénitiques qui se trouvent en aval (lacs, estuaire). Si on vise le cours d'eau lui-même, il faut plutôt utiliser des critères développés spécifiquement pour ce milieu. Il est important de noter que dans le cas du classement des eaux suggéré par Nisbet et Vernaux (1970), on retrouve à la fois des critères relatifs à la productivité du cours d'eau et des critères indicatifs d'une pollution grossière; pour éviter toute ambiguïté, il est important de bien distinguer ces deux concepts. Dans des conditions physiques optimales, la productivité d'un cours d'eau répond aux ajouts de substances nutritives

TABLEAU 4.5: QUALITE DE L'EAU EXIGEE POUR LE MAINTIEN D'UNE VIE AQUATIQUE EQUILIBREE - SUBSTANCES NUTRITIVES

Milieu	Paramètre	Concentration (µg/l)	Remarques	Référence
lac	N-inorg (en solution) P-inorg (en solution)	300 ¹ 10 ¹	} Concentrations au delà desquelles il y a danger de "bloom" d'algues	Sawyer (1947)
lac	N-NO ₃ (en solution) P-total (en solution)	200 ¹ 10 ¹	} Concentrations au delà desquelles il y a danger de "bloom" d'algues	Sylvester (1961)
lac	N-inorg. (en solution et en suspension) P-total (en solution et en suspension)	<200 200 - 400 300 - 650 500 - 1500 >1500 <5 5 - 10 10 - 30 30 - 100 >100	Concentration donnant lieu à un état: - ultra-oligotrophe - oligo-mésotrophe - méso-eutrophe - eu-polytrophe - polytrophe - ultra-oligotrophe - oligo-mésotrophe - méso-eutrophe - eu-polytrophe - polytrophe	Vollenweider (1962)
lac	P-total (en solution et en suspension)	10 ² 56 ²	Concentration donnant lieu à des teneurs en chlorophylle-a d'environ 2 µg/l; récréation et pêche en eau froide possibles Concentration donnant lieu à des teneurs en chlorophylle-a d'environ 25 µg/l; pas de récréation ni pêche en eau froide	Dillon et Rigier (1975)
rivière (entrée d'un lac ou réservoir)	P-total (en solution et en suspension)	50	Concentration au delà de laquelle il y a danger de surproduction d'algues dans le lac ou réservoir en aval	Mackenthum (1968)
rivière	N-NO ₃ ³ N-NH ₄ ³ phosphates ^{3,4}	<225 225 - 675 675 - 1130 1130 - 2250 2260 - 3390 >3390 <10 10 - 1000 >1000 <10 10 - 50 50 - 150 150 - 300 300 - 500 >500	eau très peu productive eau peu productive eau moyennement productive eau fortement productive eau polluée eau nettement polluée situation normale à douteuse pollution insidieuse sensible pollution critique eau très peu productive eau peu productive eau moyennement productive eau fortement productive eau polluée eau nettement polluée	Nisbet et Vernaux (1970)

TABLEAU 4.5 (SUITE): QUALITE DE L'EAU EXIGEE POUR LE MAINTIEN D'UNE VIE AQUATIQUE EQUILIBREE - SUBSTANCES NUTRITIVES

Milieu	Paramètre	Concentration (µg/l)	Remarques	Référence
ruisseau expérimental	N-inorg. (en solution) P-inorg. ³	400 - 700 8	} Concentrations au delà desquelles la production de périphyton (microphytes) n'augmente plus	Wuhrmann et Eichenburger (1975)
ruisseau	P-total (en solution et en suspension)	60	Concentration au delà de laquelle la production de <i>Cladophora</i> n'augmente plus	Wong et Clark (1976)

¹ Concentration mesurée à l'isothermie printannière.

² Concentrations limites établies pour des lacs où le phosphore est le facteur chimique limitant la production primaire (rapport {N/P} > 12 selon Dillon et Rigler, 1975).

³ Il n'est pas spécifié s'il s'agit de la solution uniquement ou de la solution et suspension.

⁴ Le paramètre n'est indiqué que par le sigle "phosphates"; il pourrait s'agir d'orthophosphates, de phosphore inorganique, de phosphore organique ou de phosphore total.

jusqu'à une certaine concentration limite (phénomène de saturation); les concentrations plus élevées n'auront pas d'effet sur la productivité primaire, mais elle peuvent néanmoins servir d'indication d'une pollution grossière.

En plus des substances nutritives, d'autres facteurs doivent être considérés pour le maintien de l'équilibre d'un écosystème. Parmi ceux-ci, mentionnons la température, la concentration d'oxygène dissous, les huiles, la turbidité, le pH et les substances toxiques. Cependant, à cause de la complexité des interactions dans les écosystèmes, il est impossible actuellement de donner des critères précis en ce qui concerne ces paramètres (MRN-INRS-Eau, 1974).

4.4.2 Paramètres mesurés

Parmi les paramètres mentionnés dans la section précédente, seuls les suivants:

pH, turbidité, azote ammoniacal (F), nitrites et nitrates (F), orthophosphates (F), phosphore inorganique (F), phosphore total (F), phosphore inorganique (NF), phosphore total (NF)

ont été mesurés par le SPEQ (1976) dans l'étude de la qualité de l'eau des rives.

4.4.3 Analyse des données

La méthode d'analyse factorielle des correspondances (décrite dans l'Annexe 6) a été utilisée pour traiter les données recueillies sur les plages entre Cornwall et Montmagny. On disposait de données provenant d'environ 300 stations réparties sur la rive nord, sur la rive sud et près des îles du fleuve Saint-Laurent. Parmi les paramètres mesurés (voir la section 4.4.2) à ces stations, on en a retenu six qui peuvent fournir des renseignements sur la qualité de l'eau pour le maintien de la vie en milieu aquatique (voir la section 4.4.1). Ce sont:

- les nitrates (F)
- l'azote ammoniacal (F)
- l'azote organique (F)
- les orthophosphates (F)
- le phosphore inorganique (F)
- le phosphore total (F)

A cause du grand nombre de stations considérées et du comportement global des stations susceptible de varier d'un mois à un autre, les données de chaque mois ont été traitées séparément. Chaque mois comportait un nombre différent de stations: aux mois d'août, de septembre et d'octobre, le nombre se situait autour de 260 tandis qu'en juin et juillet il n'atteignait respectivement que 177 et 209.

La représentation des stations dans le plan des deux premiers axes principaux donne une image, pour un mois donné, du comportement global des stations en fonction des substances nutritives azotées et phosphorées. De plus, la proximité des stations dans le plan de ces axes indique une similitude de comportement pour ce mois. En regroupant des stations voisines entre elles, on peut ainsi délimiter des zones géographiques où les stations ont un comportement homogène.

D'un point de vue pratique, la représentation simultanée d'un grand nombre de stations (entre 176 et 260) rend difficile la détermination de zones homogènes à cause de l'échelle comprimée qui en résulte et de la proximité relative des points entre eux; c'est pourquoi la procédure utilisée a d'abord consisté:

- à déterminer *à priori* des zones géographiques susceptibles d'être homogènes pour les paramètres considérés;
- à encercler, sur les graphiques, les stations localisées dans ces zones;
- à examiner sur les graphiques le comportement de ces groupes de stations entre eux.

Les zones choisies *a priori* comportaient un nombre de stations variant de 5 à 15. Après avoir essayé ce premier groupement pour chacun des cinq mois, quelques zones ont été ensuite redéfinies. Ceci se produisant lorsque plusieurs stations se retrouvaient de façon répétitive dans une autre zone ou encore lorsqu'à l'intérieur d'une zone il était possible de distinguer plusieurs groupes homogènes de stations permettant de définir de nouvelles zones. Les zones définies selon cette procédure sont indiquées dans le Tableau 4.6. On retrouve la représentation graphique des zones dans l'Annexe 7 (Figures A.7.3 à A.7.17). A partir de ces figures, on voit qu'il est possible d'obtenir à l'intérieur d'une région délimitée des stations de comportement semblable qu'on retrouve à chaque mois de la période d'étude.

La délimitation des nuages de points sur les graphiques a cependant nécessité l'élimination de quelques points qui se trouvaient complètement à l'écart du nuage. Le fait de retrouver pour différents mois ces mêmes stations à l'extérieur du nuage de points peut ainsi être un indice du comportement particulier de ces stations et de la présence plus ou moins importante d'apports provenant d'émissaires ou d'autres sources à proximité de la station d'échantillonnage. Ces stations particulières sont énumérées dans le Tableau 4.6.

Le chevauchement et la superposition des nuages de points indiquent la présence de régions de comportement semblable. Ces superpositions sont obtenues le plus souvent pour des régions contigües: les zones comprenant le port de Montréal, les îles de Boucherville et de Varennes, et la région située entre Repentigny et Sorel (rive-nord) ont ainsi un comportement semblable qu'on retrouve pour les cinq mois (Figures A.7.4, A.7.7, A.7.10, A.7.13 et A.7.16). Egalement, on pourrait regrouper certaines régions situées entre la partie aval du lac Saint-Pierre et Québec (Figures A.7.5, A.7.8, A.7.11, A.7.14 et A.7.17). On peut aussi retrouver un chevauchement de nuages représentant des régions géographiquement éloignés. Par exemple, on observe un comportement globalement semblable pour certaines stations situées dans le lac Saint-Louis et d'autres situées entre Trois-Rivières et Québec.

La grandeur et la forme des nuages de points pourraient être un indice de diversité et de variabilité dans une région. La comparaison de l'importance relative de chaque région pour un mois donné est cependant diffici-

TABLEAU 4.6: Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent - Découpages en zones où les stations ont un comportement semblable.

Zone	Mois	Stations considérés	Stations exclues de la zone
I) Lac Saint-François	Juin	rive nord: 84.5, 95.0, 99.3, 106.8, 108.7, 112.2	84.5, 106.8
		rive sud: 98.5, 101.0, 104.2, 115.0, 115.7, 116.1	101.0
	Juillet	rive nord: 95.0, 99.3, 106.8, 112.2, 114.0	114.0
		rive sud: 98.5, 101.0, 102.8, 104.2, 108.6, 115.7, 116.1	101.0
	Août	rive nord: 95.0, 99.3, 106.8, 108.7, 112.2, 114.0	108.7, 114.0
		rive sud: 93.0, 98.5, 101.0, 102.8, 104.2, 108.6, 110.0, 115.7, 116.1	93.0
	Septembre	rive nord: 95.0, 99.3, 106.8, 108.7, 112.2, 114.0	106.8
		rive sud: 93.0, 98.5, 101.0, 102.8, 104.2, 108.6, 110.0, 115.7, 116.1	
	Octobre	rive nord: 95.0, 99.3, 106.8, 108.7, 112.2, 114.0	99.3, 106.8, 108.7, 114.0
		rive sud: 93.0, 98.5, 101.0, 102.8, 104.2, 108.6, 110.0, 115.7, 116.1	
II) Baie de Valleyfield	Juin	îles: 116.2, 116.3, 116.5, 116.6, 117.2, 117.4, 117.5	116.3
	Juillet	idem	117.4
	Août	idem	116.2, 116.5
	Septembre	idem	
	Octobre	idem	
III) Sortie du lac Saint-François	Juin	îles: 115.7, 115.9, 122.0	
		rive nord: 116.0	116.0
	Juillet	îles: 115.3, 115.6, 115.9, 122.0, 126.7	115.3
		rive nord: 116.0	116.0
	Août	rive nord: 116.0, 127.3	116.0, 127.3
		îles: 115.3, 115.7, 115.9, 117.3, 121.0, 122.0, 126.7	115.9, 117.3, 121.0, 122.0
	Septembre	rive nord: 116.0, 127.3	116.0
îles: 115.3, 115.6, 115.9, 117.3, 121.0, 122.0, 126.7		115.9, 121.0, 122.0, 126.7	
Octobre	rive nord: 116.0, 127.3	127.3	
	îles: 115.3, 115.6, 115.9, 117.3, 121.0, 122.0, 126.7	117.3, 122.0	
IV) Lac Saint-Louis (rive nord)	Juin	rive nord: 132.1, 134.2, 137.3, 139.0, 139.4, 140.0, 140.4, 140.7, 144.9	140.0, 140.4
	Juillet	rive nord: 132.1, 135.1, 137.3, 139.0, 139.4, 140.0, 140.4, 140.7, 144.9	135.1, 137.3
	Août	idem	132.1, 135.1, 137.3, 139.4
	Septembre	idem	140.4, 142.0
Octobre	idem	140.7, 142.0, 144.9	

TABLEAU 4.6: Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent - Découpages en zones où les stations ont un comportement semblable (suite).

Zone	Mois	Stations considérés	Stations exclues de la zone
V) Lac Saint-Louis (île Perrot)	Juin	rive nord: 125.2, 128.0, 128.4, 128.5 130.5, 131.0, 132.0, 132.9, 133.0, 135.5, 135.7	128.5
	Juillet	rive nord: 125.2, 127.2, 129.4, 128.5, 130.5, 131.0, 132.0, 132.9, 133.0 îles: 133.1	125.2, 128.5
	Août	rive nord: 125.2, 127.2, 128.4, 128.5 130.5, 131.0, 132.0, 132.9, 133.0, 134.5, 135.7 îles 133.0	125.2, 127.2, 128.4, 133.0, 134.5
	Septembre	rive nord: 125.2, 127.2, 128.4, 128.5, 130.5, 131.0, 132.0, 132.9, 133.0, 135.7 îles 133.1	128.4
	Octobre	rive nord: 125.2, 127.2, 128.4, 128.5, 130.5, 131.0, 132.0, 133.0, 135.7 îles: 133.1	
VI) Lac Saint-Louis (rive sud)	Juin	rive sud: 130.2, 133.6, 139.4, 141.1, 143.8	
	Juillet	rive sud: 130.2, 133.6, 134.4, 135.9, 139.4, 143.8 îles 135.0	134.4
	Août	rive sud: 130.2, 133.6, 134.4, 135.9, 139.4, 141.1, 141.9, 143.8 îles: 135.0, 135.6	130.2, 134.4, 135.9 135.0
	Septembre	idem:	133.6, 134.4, 135.0
	Octobre	rive sud: 130.2, 133.6, 134.4, 139.4, 141.1, 141.9, 143.8 îles: 135.0, 135.6	
VII) Bassin de la Prairie	Juin	rive nord: 148.2, 149.8, 151.6, rive sud: 150.9 îles: 152.0, 162.5	148.2, 151.8
	Juillet	rive nord: 148.2, 149.8, 154.0 rive sud: 150.9 îles: 152.0, 160.5, 162.1	148.2 150.9
	Août:	rive nord: 148.2, 154.0 rive sud: 150.0, 150.9 îles: 152.0, 160.5, 162.1	148.2 152.0
	Septembre	rive nord: 148.2, 154.0 rive sud: 150.0 îles: 152.0, 160.5, 162.1	148.2
	Octobre	rive nord: 148.2, 154.0 rive sud: 150.0, 150.9 îles: 152.0, 160.5, 162.1	148.2
VIII) Petit bassin de la Prairie	Juin	rive sud: 153.5, 155.5	
	Juillet	rive sud: 153.5, 155.0, 155.5	
	Août	rive sud: 153.0, 153.5, 155.0, 155.5, 157.0, 158.0	
	Septembre	rive sud: 153.0, 153.5, 155.0, 155.5, 157.0, 158.0	
	Octobre	rive sud: 153.0, 153.5, 155.0, 155.5, 157.0, 158.0	

TABLEAU 4.6: Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent - Découpages en zones où les stations ont un comportement semblable (suite).

Zone	Mois	Stations considérés	Stations exclues de la zone
IX) Port de Montréal	Juin	rive nord: 160.3, 160.9, 161.2, 162.6, 163.8, 164.5, 164.9, 165.5, 166.9, 168.7, 173.1, 174.2	160.3, 160.9, 162.6, 174.2
	Juillet	rive nord: 160.3, 160.9, 161.2, 162.6, 163.8, 164.5, 164.9, 165.5, 165.9, 166.9, 168.7, 169.6, 174.2	160.3, 163.8, 174.2
	Août	rive nord: 160.3, 161.2, 162.0, 162.6, 163.1, 163.8, 164.5, 164.9, 165.5, 165.9, 166.5, 168.7, 173.1, 174.2	164.5, 164.9, 165.5, 165.9, 166.5
	Septembre	rive nord: 160.3, 160.9, 162.0, 162.6, 163.1, 163.8, 164.5, 164.9, 165.5, 165.9, 166.5, 166.9, 168.7, 169.6, 173.1, 174.2	162.6, 174.2
	Octobre	rive nord: 160.3, 161.2, 162.0, 162.6, 163.1, 163.8, 164.5, 164.9, 165.5, 165.9, 166.5, 166.9, 168.7, 169.6, 170.5, 173.1, 174.2	160.3
X) Rive sud face au port de Montréal	Juin	rive sud: 165.4, 170.9, 174.1	174.1
	Juillet	rive sud: 163.0, 165.4, 168.2, 169.1, 174.1	
	Août	rive sud: 163.0, 163.2, 164.0, 165.0, 165.4, 168.2, 169.1, 170.9, 176.1, 176.2, 177.3	163.0 à 176.1 valeurs extrêmes
	Septembre	rive sud: 163.0, 163.2, 165.0, 165.4, 168.2, 169.1, 173.2, 174.1, 176.1, 177.3	163.0, 163.2, 165.0, 165.4, 173.2
	Octobre	rive sud: 163.0, 163.2, 164.0, 165.0, 165.4, 168.2, 169.1, 173.2, 174.1, 176.1, 177.3	163.0, 164.0, 165.0, 165.4
XI) Iles de Boucherville et de Varennes	Juin	îles: 168.0, 169.0, 171.0, 174.3, 175.2, 175.4, 175.5, 175.9, 176.5, 177.2	177.2
	Juillet	îles: 167.0, 168.5, 171.5, 172.0, 174.3, 175.2, 175.4, 175.5, 175.9, 176.5, 177.2	174.3
	Août	îles: 167.0, 168.0, 168.5, 169.0, 171.0, 171.5, 172.0, 172.5, 174.3, 174.4, 175.2, 175.4, 175.5, 175.9, 176.5, 177.7	168.0, 171.0, 174.4
	Septembre	idem	168.0, 174.4
	Octobre	idem	171.0, 175.2

TABLEAU 4.6: Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent - Découpages en zones où les stations ont un comportement semblable (suite).

Zone	Mois	Stations considérés	Stations exclues de la zone
XII) De Repentigny à Sorel (rive nord)	Juin	rive nord: 177.7, 183.4, 193.9, 197.1 203.0, 210.4	177.7, 210.4
	Juillet	rive nord: 175.0, 177.7, 180.2, 183.4 185.9, 189.9, 193.6, 197.1 203.0, 210.4 flés: 190.0	175.0, 180.2
	Août	rive nord: 175.0, 175.1, 176.0, 177.7 180.2, 183.4, 185.9, 189.9 193.9, 197.1, 203.0, 210.4 flés: 190.0	175.0, 175.1, 177.7, 180.2, 183.4, 185.9, 210.4
	Septembre	rive nord: 175.0, 176.0, 177.7, 180.2 183.4, 185.9, 189.9, 193.9, 197.1, 203.0, 210.4 flés: 190.0	183.4
	Octobre	idem	
XIII) De Cap St-Michel à Sorel (rive sud)	Juin	rive sud: 177.8, 182.4, 185.3, 188.4, 189.7, 193.5, 197.0, 200.2, 203.8, 205.5, 207.7	205.5
	Juillet	rive sud: 177.8, 182.4, 188.0, 189.7, 197.0, 200.2, 205.5, 207.7, 208.0, 213.0 flés: 189.6, 192.0, 193.0	
	Août	rive sud: 177.8, 181.0, 184.0, 185.3, 188.0, 189.7, 197.0, 200.2, 202.0, 203.8, 205.5, 207.7, 208.0, 213.0 flés: 189.6, 192.0, 193.0	181.0, 185.3, 188.0, 197.0, 202.0 189.6
	Septembre	rive sud: 177.8, 181.0, 182.4, 184.0, 185.3, 188.0, 189.7, 197.0, 200.2, 202.0, 203.8, 205.5, 207.7, 208.0, 213.0 flés: 189.6, 192.0, 193.0	177.8, 202.0, 205.5, 207.7, 208.0, 213.0
	Octobre	rive sud: 177.8, 181.0, 182.4, 184.0, 185.3, 188.0, 189.7, 197.0, 200.2, 202.0, 203.8, 205.5, 207.7, 208.0, 213.0, 192.0, 193.0 flés: 192.0, 193.0	189.6, 192.0 185.3
XIV) Iles de Verchères	Juin	flés: 178.5, 180.0, 182.8, 187.9	180.0, 187.9
	Juillet	flés: 177.4, 180.0, 182.5, 184.2, 185.0, 186.0, 187.9	182.5, 185.0
	Août	flés: 178.5, 179.9, 180.0, 182.0, 182.5, 185.0, 186.0, 187.9	185.0, 186.0, 187.9
	Septembre	flés: 178.5, 179.9, 180.0, 182.0 182.5, 184.2, 185.0, 186.0, 187.9	182.5, 185.0
	Octobre	flés: 178.5, 179.9, 180.0, 182.0, 182.5, 182.8, 184.2, 185.0, 186.0, 187.9	
XV) Iles de Sorel	Juin	flés: 209.5, 210.5, 210.9, 211.0 211.9	209.5
	Juillet	flés: 207.6, 207.8, 209.0, 209.5 209.8, 210.5, 210.9, 211.0, 211.1, 211.9	207.8, 209.0, 209.5, 210.5, 211.0, 211.9
	Août	flés: 207.8, 209.0, 209.8, 210.5, 210.7, 210.9, 211.0, 211.1, 211.9	209.0

TABLEAU 4.6: Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent - Découpages en zones où les stations ont un comportement semblable (suite).

Zone	Mois	Stations considérés	Stations exclues de la zone
XVI) Du Lac St-Pierre à Trois-Rivières (rive nord)	Septembre	fls: 207.6, 207.8, 209.0, 209.8, 210.5, 210.7, 210.9, 211.0, 211.1, 211.9	207.8, 209.0, 211.0
	Octobre	fls: 207.8, 209.0, 209.8, 210.5, 210.7, 210.9, 211.0, 211.1, 211.9	209.0, 210.5, 211.1
	Juin	rive nord: 222.5, 225.7, 233.4, 237.8, 241.2	222.5, 241.2
	Juillet	rive nord: 218.0, 222.5, 225.7, 232.0, 233.4, 235.0, 241.2	222.5, 232.0, 233.4, 241.2
	Août	idem	22.5, 225.7, 241.2
	Septembre	idem	218.0, 222.5, 241.2
XVII) Lac St-Pierre (rive sud)	Octobre	idem	
	Juin	rive sud: 224.4, 228.3, 233.0,	
	Juillet	idem	
	Août	idem	224.4
	Septembre	idem	224.4
XVIII) De Trois-Rivières à Batis-can	Octobre	rive sud: 224.4, 228.3	
	Juin	rive nord: 241.7, 243.8, 245.2, 249.5, 259.2	
	Juillet	rive nord: 241.7, 243.0, 245.2, 249.5, 253.0, 259.2	241.7, 259.2
	Août	rive nord: 241.7, 243.0, 243.8, 245.2, 249.3, 249.5, 253.0, 259.0, 259.2, 261.1	
	Septembre	idem	243.8, 259.0, 261.1
	Octobre	idem	243.8, 259.0, 259.2
XIX) De Batis-can à Qué-bec	Juin	rive nord: 261.3, 271.5, 297.8,	
	Juillet	rive nord: 263.0, 266.0, 271.5, 297.8	266.0
	Août	rive nord: 263.0, 263.2, 263.4, 266.0, 266.1, 271.5, 272.0, 281.0, 282.0, 286.3, 286.8, 297.8	263.2
	Septembre	rive nord: 263.0, 263.2, 263.4, 266.0, 266.1, 271.5, 272.0, 281.0, 282.0, 286.3, 286.8, 291.0, 293.0, 297.8, 306.6	263.4, 266.0, 291.0, 306.6
	Octobre	idem	263.0, 263.2, 263.4
XX) Du Lac Saint-Pierre à Lévis (rive sud)	Juin	rive sud: 234.8, 249.4, 250.5, 252.2, 255.9, 261.0, 265.6, 268.3, 273.6, 276.4, 292.7, 302.3, 306.5, 315.3, 318.4	
	Juillet	rive sud: 234.8, 238.0, 249.4, 250.5, 252.2, 255.9, 265.6, 268.3, 276.4, 286.0, 288.0, 296.0, 302.3, 306.5, 315.3, 320.0	268.3
	Août	rive sud: 234.8, 238.0, 249.4, 250.5, 252.2, 255.9, 261.0, 265.6, 268.3, 273.6, 276.4, 278.0, 288.0, 292.7, 298.0, 306.5, 313.0, 315.3, 318.4, 319.0	238.0, 249.4, 255.9, 261.0, 265.6, 306.5

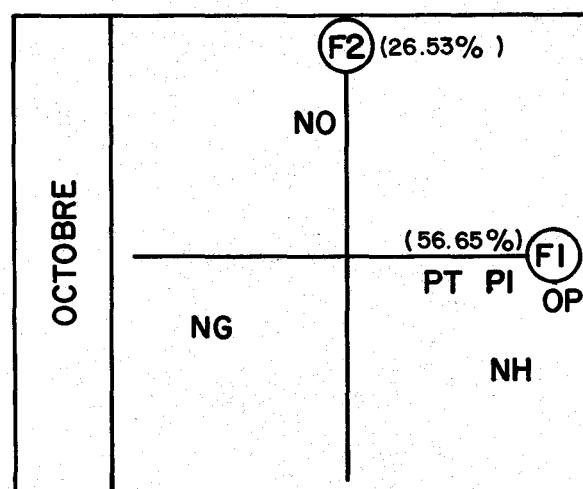
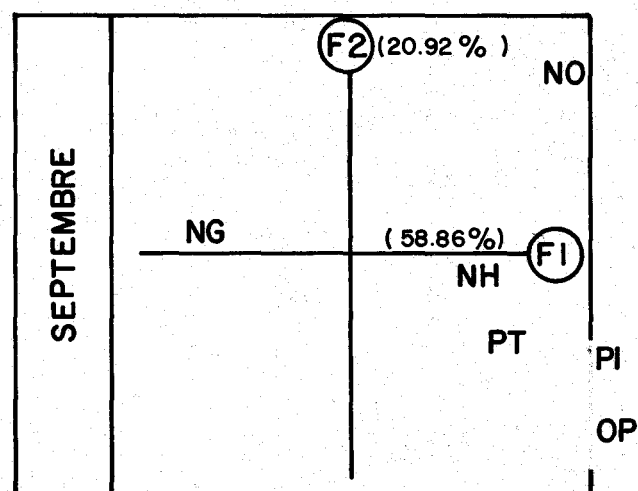
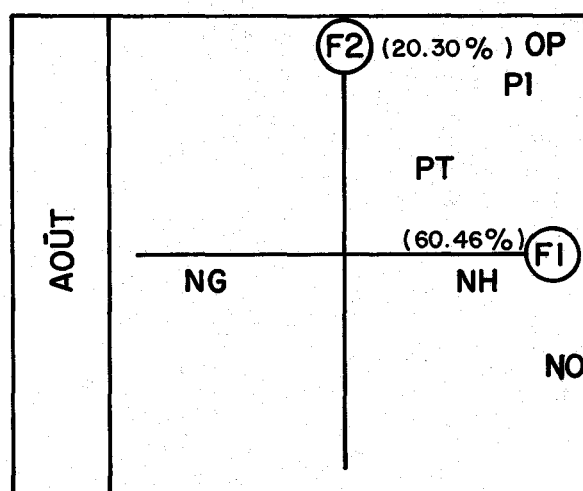
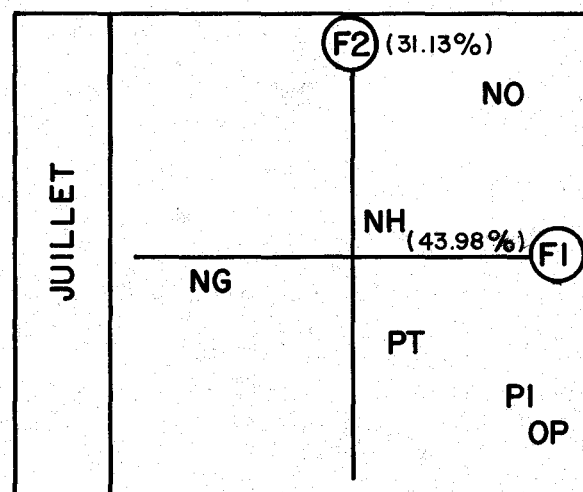
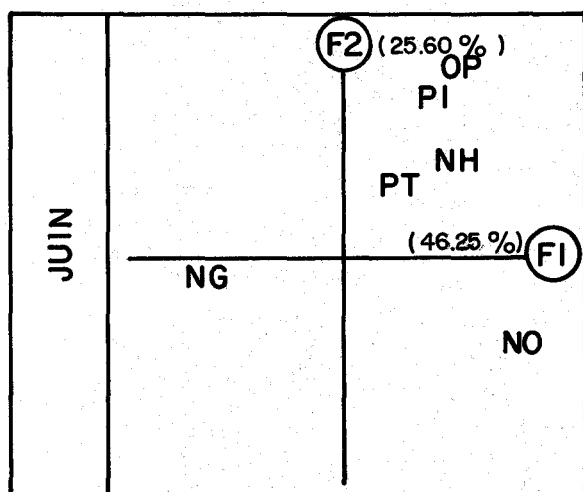
TABLEAU 4.6: Comportement des substances nutritives le long des rives du fleuve Saint-Laurent - Découpages en zones où les stations ont un comportement semblable (fin).

Zone	Mois	Stations considérés	Stations exclues de la zone
XXI) Québec (rive nord)	Septembre	rive sud: 234.8, 238.0, 247.4, 250.5, 252.2, 255.9, 261.0, 265.6, 268.3, 273.6, 276.4, 278.0, 286.0, 288.0, 289.0, 298.0, 303.2, 306.5, 313.0, 315.3, 318.4, 319.0	234.8, 238.0, 250.5, 255.9, 261.0
	Octobre	rive sud idem	
	Juin	rive nord: 315.0, 317.2, 318.2, 318.5, 320.0, 320.5	
	Juillet	rive nord: 315.0, 316.0, 317.2, 318.2, 318.5, 320.0, 320.5	320.0
	Août	rive nord: 313.8, 315.0, 316.0, 317.2, 318.2, 318.3, 318.5, 320.0, 320.5	
	Septembre	rive nord: 313.8, 316.0, 317.2, 318.2, 318.3, 318.5, 320.0, 320.5	
	Octobre	rive nord: 313.8, 315.0, 316.0, 317.2, 318.2, 318.3, 318.5, 320.0	

le à cause du nombre différent de stations incluses dans la zone et des multiples configurations différentes qu'on pourrait obtenir en délimitant autrement les zones. Ainsi, malgré un nombre élevé de stations, les zones du port de Montréal et du lac Saint-François sont relativement peu étendues indiquant une homogénéité plus grande pour ces deux zones.

La localisation des nuages de points "stations" par rapport aux points "paramètres" peut nous renseigner sur l'influence du ou des paramètres physico-chimiques qui caractérisent une zone donnée. La Figure 4.2 nous donne la représentation des points "paramètres" sur les deux premiers axes principaux. On voit que les trois formes de phosphore sont toujours situées les unes près des autres, dans le même quadrant, mais que le phosphore total est toujours plus près du point origine et les orthophosphates en sont toujours plus éloignés. On remarque aussi la proximité entre l'azote ammoniacal et le phosphore total indiquant une relation entre ces deux paramètres. De façon générale, on remarque que les paramètres qui ont plus de poids et contribuent le plus dans la détermination des axes principaux sont l'azote organique, les nitrates et le groupe composé de l'azote ammoniacal et des trois formes de phosphore. Les mois de juin et août ont une représentation semblable; on peut dire la même chose pour les mois de juillet et septembre. Par contre, pour le mois d'octobre, on observe une représentation un peu différente de celle des autres mois.

En considérant l'évolution des nuages de points "stations" et leur proximité relative avec les points "paramètres", on peut suivre l'évolution des zones géographiques d'amont en aval en fonction du ou des paramètres qui caractérisent le comportement du groupe de stations. La figure 4.3 a été obtenue en considérant l'allure de l'ensemble des graphiques des figures A.7.3 à A.7.17 en groupant dans quelques cas certaines zones contiguës qui se chevauchent de façon répétée. Les paramètres situés près des zones sont les principaux responsables du comportement de ce groupe de stations. Ils indiquent que dans ces zones on retrouve des concentrations élevées de ces paramètres et, aussi que la variabilité de ces paramètres est la principale caractéristique de ces stations.



Année 1975

NO = NO₃

NH = NH₄

NG = N organique

PT = Phosphore total

PI = Phosphore inorganique

OP = O - PO₄

(F1) = 1^{er} axe principal

(F2) = 2^e axe principal

Fig. 4.2 . Localisation, pour les différents mois, des points représentatifs des paramètres physico-chimiques dans le plan des deux premiers axes principaux (les valeurs entre parenthèses indiquent la variance-expliquée).

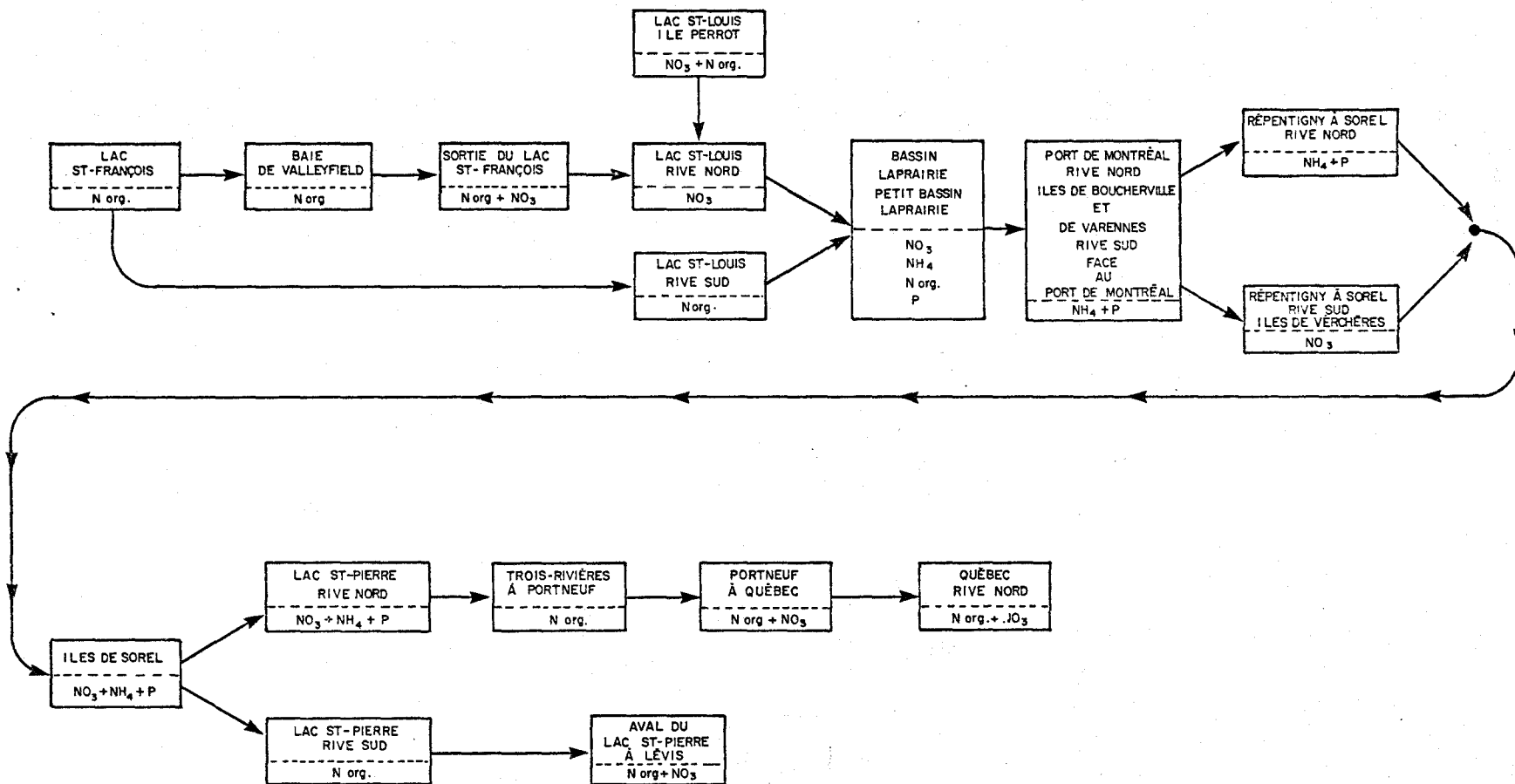


Fig. 4.3. Évolution des zones géographiques délimitées pour les rives du Saint-Laurent en fonction des paramètres qui les caractérisent.

Dans les zones situées entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis, on remarque une diminution progressive de l'influence de l'azote organique aux dépens des nitrates. Les zones situées entre la partie aval du lac Saint-Louis et Varennes subissent l'influence de Montréal et sont caractérisées principalement par le phosphore et l'azote ammoniacal. Cette influence de Montréal semble se faire sentir sur la rive nord du fleuve jusqu'à Sorel. Dans cette section du fleuve, les stations situées près les îles de Verchères ont un comportement qui ressemble plutôt à celui des stations situées sur la rive sud et qui dépend principalement des nitrates.

Il est intéressant de remarquer que les résultats pour la rive nord du lac Saint-Pierre sont différents de ceux de la rive sud. Pour le tronçon compris entre l'aval du lac Saint-Pierre et Québec, la rive sud présente une plus grande homogénéité que la rive nord correspondante; en effet la rive nord entre Trois-Rivières et Portneuf est influencée par les eaux du Saint-Maurice et les stations situées dans cette zone sont plutôt caractérisées par l'azote organique. Par contre, à partir de Portneuf sur la rive nord, on remarque une augmentation de l'influence des nitrates, et cette influence augmente progressivement jusqu'à Québec.

En résumé, on peut considérer que la méthode d'analyse factorielle des correspondances peut être utilisée avec succès pour traiter les données provenant de l'étude de la qualité de l'eau des berges du Saint-Laurent; elle permet de grouper des stations et caractériser des régions. Il faut cependant souligner que la validité des conclusions que l'on peut tirer de l'utilisation de cette méthode est fortement conditionnée par la représentativité des données et donc par la qualité de l'échantillonnage du phénomène étudié.

Pour chaque zone définie, une étude de la représentativité des stations a été faite. Le Tableau 4.6 donne pour chaque zone les stations considérées ainsi que celles où les valeurs mesurées ne correspondent pas à la tendance enregistrée dans la zone. Une brève description de chacune des zones est faite ci-dessous en tentant d'expliquer le comportement des stations¹ ne suivant pas la tendance générale de la zone.

¹ N: rive nord; S: rive sud; I: îles.

Zone I) Lac Saint-François (12 à 15 stations)

Le lac Saint-François constitue une zone homogène sauf en ce qui concerne les stations suivantes:

- la station 84.5 (N), soumise à l'influence des eaux usées de Cornwall (elle a été éliminée après l'échantillonnage de juin);
- les stations 106.8 (N) et 108.7 (N) qui ne sont pas représentatives de la zone en raison de leur localisation en aval de petits tributaires, dont la rivière Beaudet;
- la station 114.0 (N) qui est, de son côté, exagérément influencée par les déversements des eaux usées de Coteau Landing.

Zone II) Baie de Valleyfield (7 stations)

Cette zone semble assez homogène. On note à chaque mois 1 ou 2 stations non représentatives de la zone; la même station ne ressort toutefois pas plus d'une fois.

Zone III) Sortie du lac Saint-François (3 à 9 stations)

La sortie du lac Saint-François constitue une zone peu homogène si on la compare aux deux précédentes. Deux stations sont influencées par des déversements locaux:

- la station 116.0 (N), située en aval des rivières Rouge et Delisle;
- la station 115.9 (I), située à proximité des bassins de sédimentation de la compagnie Allied Chemical.

Zone IV) Lac Saint-Louis rive nord (9 à 10 stations)

La rive nord du lac Saint-Louis est peu homogène en raison des nombreux émissaires de la partie ouest de l'île de Montréal et de la présen-

ce des eaux de la rivière des Outaouais dont l'influence varie selon le débit.

Zone V) Lac Saint-Louis, île Perrot (10 à 13 stations)

La rivière des Outaouais longe une bonne partie des rives de l'île Perrot. Les stations situées dans ses eaux, soient les stations 125.2 (N), 127.2 (N), 128.4 (N) et 128.5 (N), ne sont donc pas représentatives du mélange des eaux de la rivière avec celles du fleuve.

Zone VI) Lac Saint-Louis, rive sud (5 à 10 stations)

Cette zone est généralement caractéristique des eaux du fleuve provenant du barrage de Beauharnois. Elle est cependant soumise aux influences locales des émissaires urbains et surtout industriels de Melocheville et de Beauharnois, et de la rivière Saint-Louis. Les stations 130.2 (S), 134.4 (S) et 135.0 (I) sont celles où des valeurs extrêmes ont été mesurées.

Zone VII) Bassin de La Prairie (6 à 7 stations)

Cette zone comprend les stations situées le long des rives nord et sud du bassin, ainsi que les îles. Elle exclut toutefois la partie appelée "petit bassin de La Prairie" où des valeurs extrêmes ont été mesurées. Deux stations sont à éliminer de la zone, soient la station 148.2 (N) qui est située dans la partie amont de la zone et la station 151.8 (N) qui est située dans les rapides de Lachine.

Zone VIII) Petit bassin La Prairie (2 à 6 stations)

Le nombre de stations étant insuffisant nous n'avons pas interprété les résultats obtenus pour cette zone.

Zone IX) Port de Montréal, rive nord (12 à 17 stations)

Cette zone est influencée par de nombreux émissaires municipaux et industriels. Des valeurs extrêmes ont souvent dû être retirées lors du trai-

tement notamment pour les stations 160.3 (N) et 174.2 (N).

Zone X) Rive sud, face au port de Montréal (3 à 11 stations)

Cette zone est également soumise à l'influence de nombreux émissaires. Les stations les moins représentatives sont les suivantes: 163.0 (S), 163.2 (S), 164.0 (S), 165.0 (S) et 165.4 (S).

Zone XI) Iles de Boucherville et de Varennes (10 à 16 stations)

Le débit des rivières des Outaouais, des Prairies et des Mille Iles exerce une influence importante sur la qualité de l'eau le long des berges de ces îles. Selon le débit, la même station peut se retrouver dans des eaux aux caractéristiques différentes. Les stations 168.0 (I), 171.0 (I) et 174.4 (I) ne sont pas représentatives de la qualité de l'eau de cette zone.

Zone XII) De Repentigny à Sorel, rive nord (6 à 13 stations)

Cette zone est soumise à l'influence des rivières des Prairies, des Mille Iles et l'Assomption. Il importerait d'éliminer les stations situées trop près de l'embouchure de ces tributaires, soient les stations 175.0 (N), 175.1 (N) et 180.2 (N) qui ne sont pas représentatives de la zone.

Zone XIII) De Repentigny à Sorel, rive sud (11 à 18 stations)

Des déversements industriels importants à Cap St-Michel, Varennes, Contrecoeur et Tracy influencent la qualité de l'eau dans cette zone. De plus, certaines stations (185.3 (S), 189.6 (I) et 202.0 (S)) situées près des îles de Contrecoeur présentent des caractéristiques qui s'éloignent de la tendance générale de la zone.

Zone XIV) Iles de Verchères (4 à 10 stations)

Ces îles sont baignées par des eaux de mélange aux caractéristiques différentes du côté nord et du côté sud; il y aurait donc lieu dans les

études futures de délimiter deux zones. Les stations 182.5 (I) et 185.0 (I) ne sont pas représentatives de la tendance générale.

Zone XV) Iles de Sorel (5 à 10 stations)

Ces îles constituent une zone relativement homogène sauf pour la partie baignée par les eaux du Richelieu et qui est représentée par les stations 207.8 (I), 209.0 (I) et 209.5 (I).

Zone XVI) Du Lac Saint-Pierre à Trois-Rivières, rive nord (5 à 7 stations)

Deux stations sont soumises à une influence locale, soient la station 222.5 (N) qui est située en aval des rivières du Loup et Petite du Loup et la station 241.2 (N) qui est localisée à proximité des déversements de Trois-Rivières.

Zone XVII) Lac Saint-Pierre rive sud (2 à 3 stations)

Cette zone ne comporte pas assez de stations pour que les résultats puissent être interprétés.

Zone XVIII) De Trois-Rivières à Portneuf, rive nord (5 à 10 stations)

Cette zone est homogène sauf pour la station 259.0 (N).

Zone XIX) De Portneuf à Québec, rive nord (3 à 15 stations)

Dans cette zone, la qualité de l'eau est soumise à l'influence des marées et du mélange quasi complet des divers types d'eau au niveau de Portneuf. Les stations 263.2 (N), 263.4 (N) et 266.0 (N) ne sont pas représentatives de cette zone.

Zone XX) De l'aval du lac Saint-Pierre à Lévis, rive sud (15 à 22 stations)

Cette zone est aussi complexé que la précédente au point de vue hydrologique. Les stations non représentatives sont les suivantes: 238.0 (S) et 261.0 (S).

Zone XXI) Québec rive nord (7 à 10 stations).

Cette zone est homogène.

Notons que les stations situées dans le Chenal Perdu et dans le canal de Beauharnois étaient trop peu nombreuses pour permettre la définition d'une zone.

4.4.4 Recommandations concernant le plan d'échantillonnage

Choix des paramètres

Les paramètres qu'il importe de mesurer pour vérifier la qualité de l'eau du Saint-Laurent pour le maintien de l'équilibre d'un écosystème sont énumérés ci-dessous par ordre décroissant de priorité et une justification de leur mesure est également apportée.

Etant donné leur importance pour estimer le niveau d'enrichissement des eaux (voir le Tableau 4.5), certaines formes d'azote et de phosphore devraient être mesurées. D'après notre expérience (MRN-INRS, 1976) la détermination de certaines formes de substances nutritives pose souvent des problèmes. Par exemple, on observe une contamination en azote organique par les membranes en acétate de cellulose souvent utilisées pour filtrer les échantillons d'eau. Dans certains cas, les digestions des échantillons non filtrés, précédant les déterminations de l'azote et du phosphore organiques sont incomplètes. De plus, l'introduction d'échantillons non filtrés dans l'autoanalyseur "Technicon" cause des problèmes de représentativité au niveau du sous-échantillonnage (aspiration de l'échantillon) et, souvent, d'interférence. Considérant ces difficultés analytiques, et les faibles teneurs d'azote en suspension, nous suggérons de filtrer les échantillons sur des *membranes inertes* (ex.: fibre de verre, Whatman, GF/C) et de mesurer ensuite:

- *sur le filtrat*, les diverses formes d'azote et de phosphore (N-NH₄, N-NO₂₋₃, N-org; P-inorg, P-org);
- *sur le filtre*, le phosphore total (P-inorg, P-org).

Les substances *toxiques* devraient être mesurées étant donné les dangers qu'elles peuvent comporter pour les organismes, même à des concentrations sub-léthales. Pour le choix des substances toxiques à déterminer dans le milieu aqueux on devrait se baser sur une étude préalable de ces substances dans les sédiments (ex.: métaux traces) ou dans des organismes qui les concentrent (ex.: pesticides).

Les *huiles* devraient être mesurées au moins en certains endroits où elles peuvent causer des problèmes. Il peut en effet y avoir formation d'un film de surface qui empêche les échanges gazeux entre l'atmosphère et l'eau. Ces films sont susceptibles également d'affecter les animaux qui utilisent la surface de l'eau et les poissons qui viennent occasionnellement en surface. De plus, des hydrocarbures solubles (ex.: extraits du film superficiel) dans l'eau peuvent avoir des répercussions nuisibles sur les écosystèmes.

La *température*, le *pH* et la concentration d'*oxygène dissous* peuvent également poser des problèmes pour la vie aquatique. Cependant, dans le fleuve Saint-Laurent, il est peu probable que ce soit le cas, si on se fie aux résultats des nombreuses mesures de ces paramètres déjà effectuées.

Localisation des stations

Actuellement, les principales zones d'utilisation des rives par la faune ou la flore aquatique nous sont assez mal connues. Il serait sûrement approprié d'établir, en concertation avec des biologistes, une cartographie des zones les plus importantes. Une classification de ces zones devrait également être faite en fonction des possibilités de détérioration. En l'absence de tels renseignements, il est très difficile de définir l'emplacement judicieux des stations. En première approximation, il est cependant permis d'avancer que des zones importantes devraient se situer le long des berges des lacs Saint-François, Saint-Louis et Saint-Pierre, dans les régions de faible courant et de faible profondeur.

La densité des stations doit également tenir compte de l'analyse des données présentées à la section 4.4.3. Tel que décrit dans cette section,

on a pu mettre en évidence 21 zones plus ou moins homogènes en ce qui concerne le comportement des composés de l'azote et du phosphore. Cette zonation, même si elle est grossière et ne s'applique qu'à la période de juin à octobre et non à toute l'année, permet de réduire le nombre de stations par un choix de stations représentatives de chaque zone en ce qui a trait à ces substances et d'échantillonner la variabilité spatiale tout en évitant la duplication. Nous recommandons d'établir deux ou trois stations par zone homogène en fonction de l'importance de la zone pour la vie aquatique et de la variabilité des concentrations de substances nutritives dans la zone considérée.

Parmi les stations qui ne sont pas partie de zones homogènes, il y a lieu d'examiner attentivement lesquelles devront être conservées pour échantillonner des phénomènes particuliers (ex. effet d'un tributaire).

En ce qui concerne les substances toxiques, l'emplacement des stations ne devrait être décidé qu'après une identification de ces substances à des concentrations élevées dans les sédiments ou dans les organismes aquatiques.

Fréquence

La réduction du nombre de stations notamment pour les paramètres liés aux substances nutritives a pour but de permettre d'effectuer un plus grand nombre de mesures à chaque station. En effet, les données actuelles ne permettent pas d'avoir une bonne idée de la variabilité temporelle des paramètres liés aux substances nutritives et il est important, selon nous, que les mesures de 1976-77 permettent de bien apprécier cette variabilité. C'est pourquoi il nous semble important d'effectuer, aux différentes stations choisies, des mesures plus fréquentes (p.e.: hebdomadaires).

Contraintes imposées par les méthodes de traitement des données

Pour faciliter l'interprétation des résultats, surtout si on veut utiliser une méthode multivariée, il est recommandé d'avoir un échantillonnage conduisant à des tableaux complets de données. Si seulement quelques données sont absentes, elles peuvent être reconstituées, mais on ne doit pas perdre de vue que cette reconstitution n'apporte aucune information supplé-

mentaire et ne fait que permettre le traitement.

4.5 Analyse spéciale de la Baie de Valois

A notre demande le SPEQ a effectué le prélèvement d'échantillons en 114 points de la Baie de Valois le 27 octobre 1975. Cette étude avait pour but de bien identifier, dans un cas particulier, la variabilité spatiale de différents paramètres de qualité de l'eau et de montrer le potentiel de l'analyse factorielle des correspondances dans le traitement d'un tel ensemble de données.

Les paramètres¹ mesurés aux 114 stations étaient:

turbidité, conductivité, azote ammoniacal (F), azote total Kjeldahl (F), orthophosphates (F), phosphore total inorganique (F), solides en suspension, coliformes fécaux, azote total Kjeldahl (NF), phosphore total inorganique (NF), nitrites + nitrates (F) et phénols.

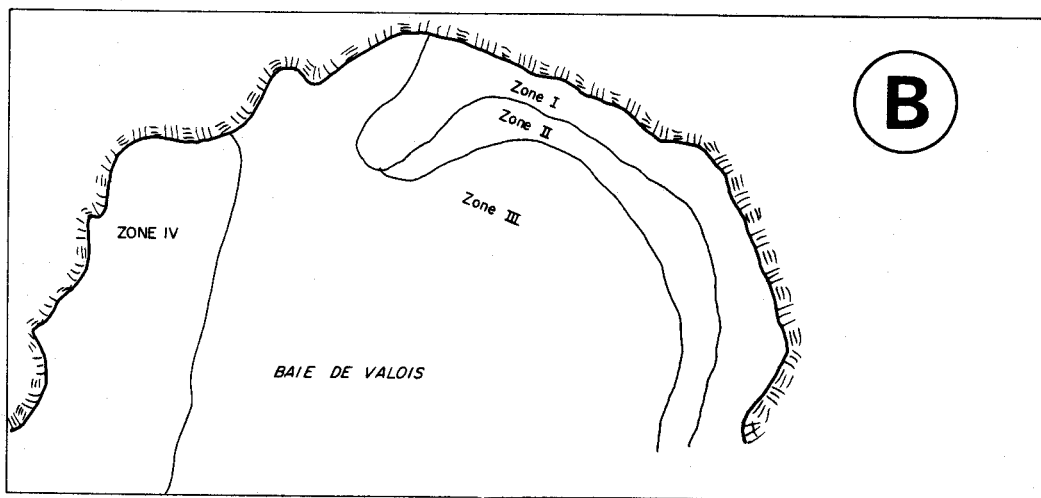
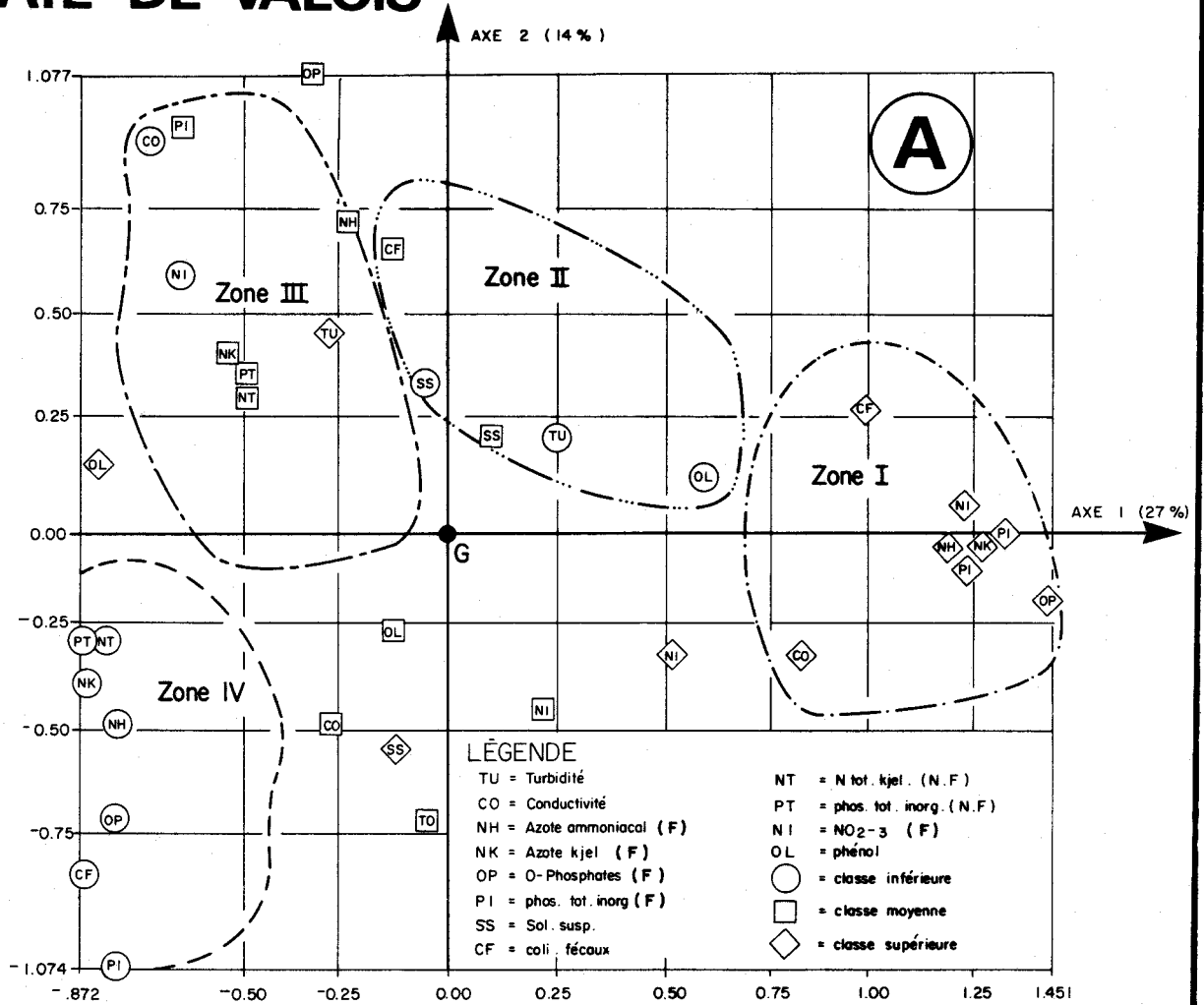
La gamme de variation de chaque paramètre a été séparée en 3 classes équiprobables, correspondant respectivement aux valeurs inférieures, moyennes et supérieures de chaque paramètre. Nous disposons donc d'un tableau de 114 lignes (les points de mesure) et de 36 colonnes (12 paramètres pour lesquels nous considérons 3 classes). Nous avons appliqué l'analyse factorielle des correspondances (voir l'Annexe 6) à cette matrice de données.

La Figure 4.4 indique la position des points représentatifs des paramètres dans le plan des 2 premiers axes. Pour chaque paramètre, nous avons 3 points représentatifs, 1 pour chacune des 3 classes. Sur ce même graphique, nous avons regroupé les points relatifs à chaque station (le tracé des 114 points aurait été trop confus). A partir de cette analyse, il est possible de mettre en évidence 4 zones:

- la zone I, qui correspond aux fortes valeurs des paramètres représentant les divers composés de l'azote et du phosphore;

¹ F: échantillon filtré; N.F.: échantillon non filtré.

BAIE DE VALOIS



Représentation des paramètres et des zones dans le plan factoriel (1; 2).

Fig. 4.4.

- les zones II et III, qui sont des régions de transition correspondant généralement aux valeurs moyennes des paramètres;
- la zone IV, qui est caractérisée par de faibles valeurs des paramètres, essentiellement ceux comprenant de l'azote et du phosphore.

Le premier axe montre l'opposition entre les fortes valeurs (extrémité positive) et les faibles valeurs (extrémité négative) d'un grand nombre de paramètres, en particulier les paramètres reliés à l'azote et au phosphore. Le comportement du phénol est cependant différent de celui de l'ensemble des paramètres.

Pour mieux mettre en évidence la signification de l'axe 1, qui révèle les principales tendances des données, nous avons cartographié (voir la Figure 4.5) la valeur du 1^{er} facteur (coordonnée sur l'axe 1) de chaque station. Ce premier facteur peut être considéré comme un "indice de qualité générale" puisqu'une forte valeur de ce premier facteur correspond à de fortes valeurs de la plupart des paramètres et qu'une faible valeur correspond aux valeurs inférieures de la plupart des paramètres.

Cet exemple montre l'intérêt de l'analyse des correspondances pour l'étude de tableaux importants de données. Ici nous avons pu effectuer une zonation à partir d'un ensemble de paramètres et avoir une vue générale. Il est intéressant de comparer la figure (4.5) avec la distribution obtenue pour les coliformes fécaux (Fig. 4.1), la même zonation peut être globalement mise en évidence dans les 2 cas. Dans l'optique de l'élaboration d'un plan d'échantillonnage, 2 éléments sont à retenir de cette analyse:

- . la variabilité spatiale assez grande des paramètres, visible dans le cas des coliformes fécaux (Fig. 4.1), se traduit par la variabilité de 10 facteurs (Fig 4.5), et montre la nécessité de ne pas se limiter à un seul point pour la baie ou même pour zone. Il y a lieu de prendre plusieurs points ou encore de composer des échantillons;
- . dans le cas d'un usage donné, (ex.: alimentation ou récréation) la zonation permet de voir les régions critiques où les seuils sont dépassés.

BAIE DE VALOIS

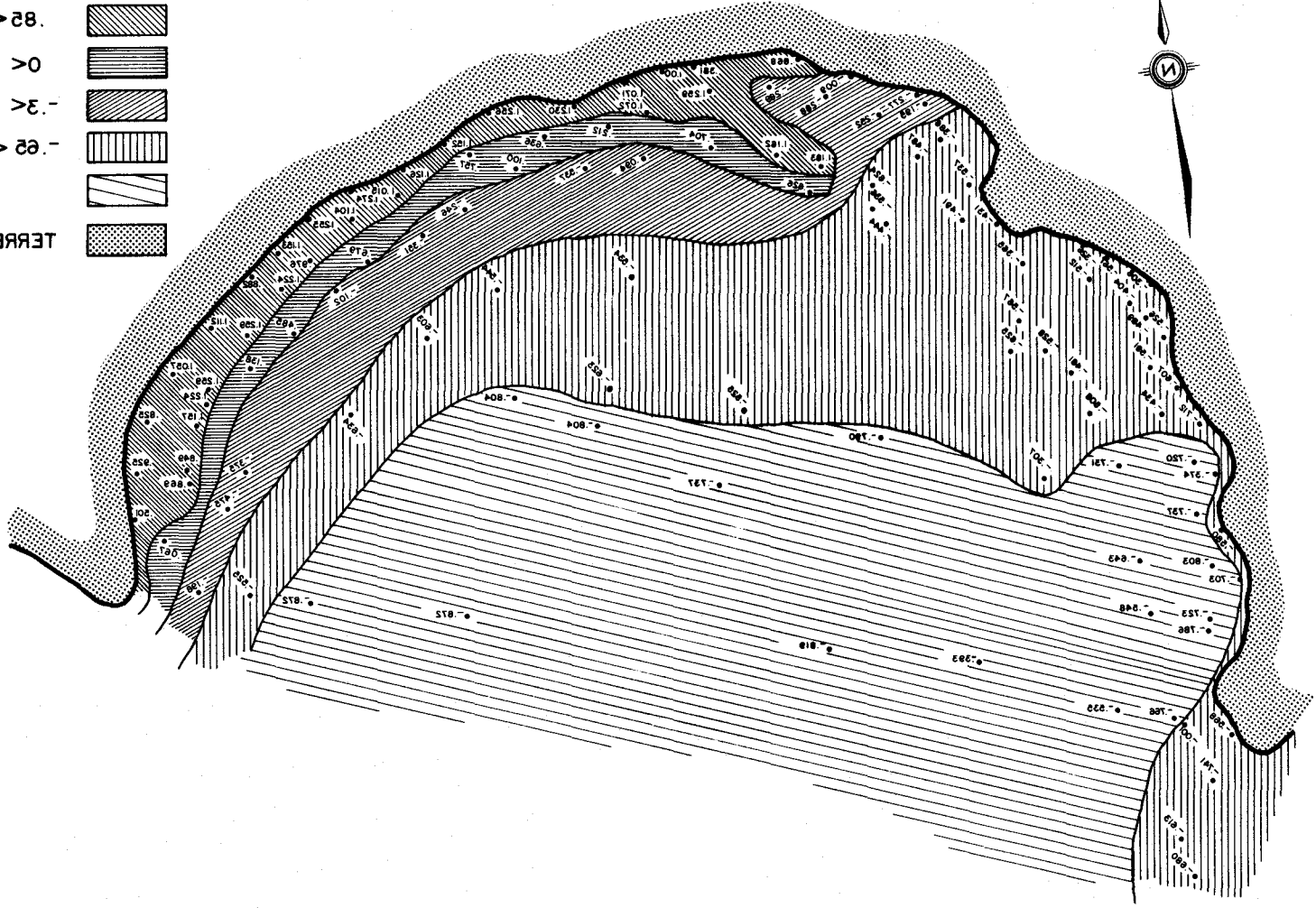
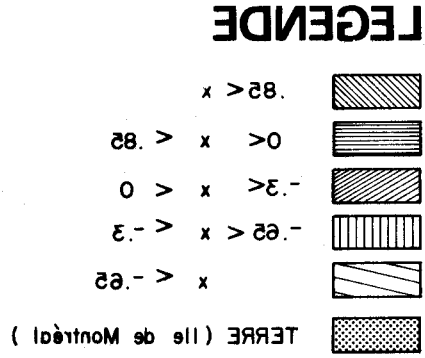


Fig 4. 5. Zonation à partir de la valeur du 1^{er} facteur.

Il est clair cependant que l'étude effectuée n'est qu'une "photographie" de la situation observée un jour donné et qu'il y aurait lieu d'examiner la stabilité des zones mises en évidence, par comparaison des résultats obtenus pour différents jours.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME. (1973).
Municipal statistics. Water and Pollution Control, Directory 1972-73, 36-46.
- DILLON, P.J. et RIGLER, F.H. (1975).
A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status. J. Fish. Res. Board Can., 32: 1519-1531.
- LALONDE, VALOIS, LAMARRE, VALOIS ET ASSOCIES. (1974).
Etude du fleuve Saint-Laurent. Inventaire des équipements en eau et relevés industriels. (4 volumes).
- MACKENTHUM, K.M. (1968).
The phosphorous problem. J. Am. Wat. Works. Assoc., 60: 1047-1054.
- MRN-INRS-Eau. (1974).
Planification de l'acquisition des données de qualité de l'eau au Québec. Tome 1: Relations entre l'utilisation de la ressource eau et sa qualité, par Campbell, P.G., Meybeck, M. et Tessier, A. Ministère des Richesses naturelles, Direction Générale des Eaux, Service Qualité des Eaux, rapport No Q.E.-6, 94p.
- MRN-INRS. (1976).
Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Secteur des substances nutritives. Ministère des Richesses naturelles, Service Qualité des Eaux, rapport sous presse.
- NISBET, M. et VERNAUX, J. (1970).
Composantes chimiques des eaux courantes - discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. Annales de Limnologie, 6: 161-190.
- SAWYER, C.N. (1947).
Fertilization of lakes by agricultural and urban drainage. J. New Eng. Wat. Works Assoc., 61: 109-124.
- SPEQ. (1973).
Etude du fleuve Saint-Laurent. Tronçon Cornwall-Varenes. Répertoire des résultats d'analyse.
- SPEQ. (1974).
Etude du fleuve Saint-Laurent. Tronçon Varenes-Montmagny. Répertoire des résultats d'analyse.
- SPEQ. (1975).
Etude du fleuve Saint-Laurent. Tronçon Montmagny-Gaspé. Répertoire des résultats d'analyse.
- SYLVESTER, R.O. (1961).
Nutrient content of drainage water from forested, urban and agricultural areas. Algae and metropolitan wastes, U.S. Public Health Service, SEC TR W 61-3, 80, US Government Printing Office, Washington, D.C.

VOLLENWEIDER, R.A. (1968).

Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Organization for Economic Cooperation and Development, publication DAS/CSI/68.27, 194 p.

WONG, S.L. et CLARK, B. (1976).

Field determination of the critical nutrient concentrations for cladophora in streams. J. Fish. Res. Board Can., 33: 85-92.

ANNEXE 1

Description des opérations effectuées sur les banques de
données et des problèmes rencontrés

Lors des discussions concernant le présent contrat, il était entendu que les banques de données de qualité de l'eau du Saint-Laurent seraient fournies sous une forme traitable sur l'ordinateur CDC de l'Université du Québec. Suite à un premier essai, il s'est avéré que ces banques n'étaient pas du tout utilisables sur le système CDC et qu'il fallait procéder à plusieurs modifications pour les rendre compatibles. Les opérations qui ont dû être effectuées sont les suivantes:

- conversion des banques du format "Field Data", UNIVAC, densité 1600 BPI, longueur d'enregistrement logique de 788 caractères, en format EBCDIC, densité 1600 BPI; cette conversion a été effectuée par les services gouvernementaux;
- réduction de la longueur des enregistrements physiques de 788 à moins de 136 caractères, puisque l'ordinateur CDC ne peut décoder, en FORTRAN, des enregistrements d'une telle longueur (788 caractères); pour effectuer cette réduction, l'ordinateur HP 2100A d'INRS-Eau a été utilisé;
- traduction des rubans du format EBCDIC, densité 1600 BPI au format ASCII, densité 800 BPI afin de les utiliser sur l'ordinateur HP 2100A; cette traduction a dû être effectuée sur l'ordinateur IBM de l'Université Laval (à cette occasion, le nombre et la longueur exacte des enregistrements ont été établis).

De nombreux problèmes ont été rencontrés lors de ces opérations; les principaux sont les suivants:

problèmes d'ordre technique

- les multiples transformations UNIVAC → EBCDIC, EBCDIC → ASCII ont rendu les surperforations des symboles (>) et (<) inintelligibles;
- contrairement aux premières informations reçues, la longueur des enregistrements s'est avérée être de 788 caractères plutôt que 3152;

problèmes de qualité des données

- l'appellation de certains paramètres et l'ordre de leur codification changent d'une année à l'autre;
- de nombreuses erreurs ont été décelées (symboles (>) au lieu de (<), perforation de lettres au lieu de chiffres, colonnes décalées les unes par rapport aux autres;

problème d'ordre général

- sans mettre en doute l'empressement et la bonne volonté de chacun, il est très difficile d'obtenir l'information concernant les paramètres et les modifications d'une année à l'autre (en particulier sur le format des nouveaux paramètres introduits au début d'une année).

Pour résoudre les différents problèmes décrits ci-haut, il a été nécessaire de composer des programmes d'ordinateur pour:

- réduire la longueur des enregistrements;
- traduire du format EBCDIC en format ASCII;
- identifier les surperforations et les convertir en code;
- détecter les erreurs et les corriger par les valeurs appropriées;
- établir une banque standardisée pour les différentes années.

Toutes les opérations décrites précédemment n'avaient pas été prévues et ont consommé beaucoup de temps.

Les banques homogènes possèdent les caractéristiques suivantes:

- longueur des enregistrements: l'enregistrement logique qui était de 788 caractères sur le ruban original est maintenant subdivisé en six (6) enregistrements physiques, le premier de 134 caractères, les deux suivants de 132 et les trois derniers de 128;
- ordre et format des paramètres (voir le Tableau A.1.1);
- les caractères (>) et (<) sont remplacés par un signe (-);
- les valeurs manquantes sont identifiées par la valeur -9.00.

TABLEAU A.1.1: Ordre et format des paramètres dans les banques de données

ENREGISTREMENT #1134 CARACTERES

<u>Paramètres</u>	<u>Format</u>	<u>Colonnes</u>
1 Date	I6	1 - 6
2 Bassin	A4	7 - 10
3 Sous-bassin	A4	11 - 14
4 Millage	F4.1	15 - 18
5 Type et lac	A4	19 - 22
6 Chapitre	A1	23
7 Méthodologie	A1	24
8 Condition météo	A1	25
9 Passe	A2	26
10 Identification	A2	27 - 28
11 Longitude	I6	29 - 34
12 Latitude	I6	35 - 40
13 Profondeur (pi)	I3	41 - 43
14 Heure	F4.2	44 - 47
15 Température Air (°C)	F3.1	48 - 50
16 pH	F3.1	51 - 53
17 Couleur vraie (unités)	F4.1	54 - 57
18 Turbidité (UTJ)	F5.2	58 - 62
19 Alcalinité totale (mg/l CaCO ₃)	F4.0	63 - 66
20 Dureté totale (mg/l CaCO ₃)	F4.0	67 - 70
21 Chlorures (mg/l Cl)	F6.1	71 - 76
22 Sulfates (mg/l SO ₄)	F5.1	77 - 81
23 Calcium (mg/l Ca)	F5.1	82 - 86
24 Conductivité (µmhos/cm)	F6.1	87 - 92
25 Détergents (mg/l LAS)	F4.2	93 - 96
26 N.T.A. (mg/l NTA)	F4.2	97 - 100
27 Azote amoni. (mg/l NH ₃ -N)	F4.2	101 - 104
28 Azote organ. (mg/l N)	F4.2	105 - 108
29 Nitrates (mg/l NO ₃ -N)	F4.2	109 - 112
30 Nitrites (mg/l NO ₂ -N)	F5.3	113 - 117
31 o-Phosphates (mg/l PO ₄)	F4.2	118 - 121
32 Phos. tot. inorg (mg/l PO ₄)	F4.2	122 - 125
33 Phosphore tot. (mg/l PO ₄)	F4.2	126 - 129
34 DBO (mg/l O ₂)	F5.1	130 - 134

TABLEAU A.1.1 (suite): Ordre et format des paramètres dans les banques de données

ENREGISTREMENT #2132 CARACTERES

<u>Paramètres</u>	<u>Format</u>	<u>Colonnes</u>
1 D.C.O. (mg/l O ₂)	F5.0	1 - 5
2 Température eau (°C)	F3.1	6 - 8
3 Oxygène dissous (mg/l O ₂)	F3.1	9 - 11
4 % saturation	F3.0	12 - 14
5 T.I.C. (mg/l C)	F6.1	15 - 20
6 T.O.C. (mg/l C)	F6.1	21 - 26
7 Silice (mg/l SiO ₂)	F4.2	27 - 30
8 Sol. susp. (mg/l)	F5.0	31 - 35
9 Sol. tot. (mg/l)	F5.0	36 - 40
10 Sol. diss. (mg/l)	F5.0	41 - 45
11 Coliformes (N/100 cc)	F7.0	46 - 52
12 Colif. fécaux (N/100 cc)	F7.0	53 - 59
13 Strept. fécaux (N/100 cc)	F6.0	60 - 65
14 Tanin lignine (mg/l tannin)	F4.2	66 - 69
15 Chrome total (mg/l)	F5.3	70 - 74
16 Cuivre (mg/l)	F5.3	75 - 79
17 Fer total (mg/l)	F6.3	80 - 85
18 Magnésium (mg/l)	F8.4	86 - 93
19 Manganèse (mg/l)	F6.3	94 - 99
20 Nickel (mg/l)	F5.3	100 - 104
21 Plomb (mg/l)	F5.3	105 - 109
22 Sodium (mg/l)	F8.3	110 - 117
23 Potassium (mg/l)	F6.3	118 - 123
24 Zinc (mg/l)	F5.3	124 - 128
25 C. organ. (mg/l C)	F4.2	129 - 132

TABLEAU A.1.1 (suite): Ordre et format des paramètres dans les banques de données

ENREIGSTREMENT #3132 CARACTERES

<u>Paramètres</u>	<u>Format</u>	<u>Colonnes</u>
1 N. organ. (mg/1 N)	F4.2	1 - 4
2 (inconnu)		5 - 12
3 "		13 - 20
4 "		21 - 28
5 Comp. tot. (20°C, N/100 cc)	F8.0	29 - 36
6 Comp. tot. (35°C, N/100 cc)	F8.0	37 - 44
7 Salinité	F8.2	45 - 52
8 (inconnu)		53 - 60
9 "		61 - 68
10 "		69 - 76
11 "		77 - 84
12 "		85 - 92
13 "		93 - 100
14 Phos. tot. NF (mg/1 PO ₄)	F8.2	101 - 108
15 Phos. inorg. tot. NF (mg/1 PO ₄)	F8.2	109 - 116
16 o-Phos. tot. NF (mg/1 PO ₄)	F8.2	117 - 124
17 Azote tot. Kj. (mg/1 N)	F8.2	125 - 132

TABLEAU A.1.1 (suite): Ordre et format des paramètres dans les banques de données

ENREGISTREMENT #4128 CARACTERES

<u>Paramètres</u>	<u>Format</u>	<u>Colonnes</u>
1 Ammoniaque tot. (NF) (mg/l N)	F8.2	1 - 8
2 Nit/Nitrate tot. (mg/l N)	F8.2	9 - 16
3 Ammoniaque (G) (mg/l N)	F8.2	17 - 24
4 Nitrites (G) (mg/l N)	F8.3	25 - 32
5 Transpar. SECCHI	F8.0	33 - 40
6 Fluorures solub. (mg/l F)	F8.1	41 - 48
7 Phénols (mg/l)	F8.0	49 - 56
8 Huiles & graisses (mg/l)	F8.1	57 - 64
9 Mercure (mg/l)	F8.4	65 - 72
10 Cadmium (mg/l)	F8.3	73 - 80
11 Mercure - NF (mg/l)	F8.4	81 - 88
12 Cadmium - NF (mg/l)	F8.3	89 - 96
13 Cuivre - NF (mg/l)	F8.3	97 - 104
14 Zinc - NF (mg/l)	F8.3	105 - 112
15 Plomb - NF (mg/l)	F8.3	113 - 120
16 Nitri et Nitra. tot NF (mg/l N)	F8.2	121 - 128

TABLEAU A.1.1 (suite): Ordre et format des paramètres dans les banques de données

ENREGISTREMENT #5128 CARACTERES

<u>Paramètres</u>	<u>Format</u>	<u>Colonnes</u>
1 Azote tot. Kj. NF (mg/l N)	F8.2	1 - 8
2 D.I.O.D. (dem. immédiate)(mg/l O ₂)	F8.1	9 - 16
3 Chlore résid. (mg/l Cl ₂)	F8.1	17 - 24
4 Acidité (mg/l CaCO ₃)	F8.0	25 - 32
5 Mercure (mg/l)	F8.3	33 - 40
6 Cyanure (mg/l CN)	F8.3	41 - 48
7 Aluminium (mg/l)	F8.3	49 - 56
8 Argent (mg/l)	F8.3	57 - 64
9 Arsenic (mg/l)	F8.3	65 - 72
10 (champ libre)		73 - 80
11 "		81 - 88
12 "		89 - 96
13 "		97 - 104
14 "		105 - 112
15 "		113 - 120
16 "		121 - 128

TABLEAU A.1.1 (suite): Ordre et format des paramètres dans les banques de données

ENREGISTREMENT #6128 CARACTERES

<u>Paramètres</u>	<u>Format</u>	<u>Colonnes</u>
1 "champ libre"		
2 "		
3 "		
4 "		
5 "		
6 "		
7 "		
8 "		
9 "		
10 "		
11 "		
12 "		
13 "		
14 "		
15 "		
16 DCO NF (mg/l O ₂)	F8.0	121 - 128

ANNEXE 2

Exemples de simplification de l'équation générale du
débit massique

Equations simplifiées du débit massique "instantané"

L'équation générale (3.2) du bilan est difficile d'utilisation parce qu'elle implique une grande quantité de mesures. Si on accepte certaines hypothèses, cette équation peut être réduite à des expressions plus simples et qui impliquent moins de mesures. On donne ici quelques exemples détaillés de simplification.

1er exemple: Supposons que dans chacune des sections considérées, la concentration est constante en tout point durant la période considérée pour le calcul du bilan.

Cette hypothèse implique donc:

$$\frac{dc}{dx} = 0, \quad \frac{dc}{dy} = 0, \quad \frac{dc}{dt} = 0$$

Dans ces conditions, l'équation 3.2 du débit massique s'écrit:

$$Q_{mT} = \frac{c}{TE} \int_0^y \int_0^x \int_0^t v(x,y,t) dx dy dt \quad (A2.1)$$

où:

$$\frac{1}{TE} \int_0^y \int_0^x \int_0^t v(x,y,t) dx dy dt \quad \text{est la définition du débit moyen dans}$$

la section pour la période T considérée. L'évaluation du débit massique revient, dans ce cas, à multiplier la concentration par le débit moyen:

$$Q_{mT} = \bar{Q} c \quad (A2.2)$$

L'équation du bilan s'écrit alors:

$$B = (\bar{Q}_1 \cdot c_1 - \bar{Q}_2 \cdot c_2) T \quad (\text{A2.3})$$

Si τ est négligeable devant T et s'il n'y a pas d'apports spécifiques de débit entre les deux sections, on peut écrire:

$$\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = Q \quad (\text{A2.4})$$

et l'équation (A2.3) devient:

$$B = (c_1 - c_2) \bar{Q} T \quad (\text{A2.5})$$

L'équation (A2.5) est l'expression la plus simple du bilan.

2e exemple: Supposons que dans chacune des sections considérées, la concentration varie horizontalement, mais qu'elle ne varie ni verticalement, ni durant la période considérée. On suppose également que les vitesses varient horizontalement et verticalement, mais qu'elles ne varient pas durant la période considérée.

Cette hypothèse implique donc:

$$\frac{dc}{dy} = 0, \quad \frac{dc}{dt} = 0, \quad \frac{dc}{dx} \neq 0, \quad \frac{dv}{dx} \neq 0, \quad \frac{dv}{dy} \neq 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0$$

On peut alors diviser verticalement chacune des sections en sous-sections telles que, pour chacune, la concentration au centre puisse être considérée comme la concentration moyenne pour la sous-section considérée. On peut alors écrire, pour la sous-section:

$$(Q_m)_{x_j, x_{j+1}} = \frac{\bar{c}_{x_j, x_{j+1}}}{T} \int_{x_j}^{x_{j+1}} \int_0^y \int_0^t v(x, y, t) dx dy dt \quad (\text{A2.6})$$

Ce qui peut être traduit par:

$$(Q_m)_{x_j, x_{j+1}} = \bar{c}_{x_j, x_{j+1}} \cdot \bar{Q}_{x_j, x_{j+1}} \quad (A2.7)$$

Pour toute la section, le débit massique s'écrirait:

$$Q_{mT} = \sum_j \bar{c}_{x_j, x_{j+1}} \cdot \bar{Q}_{x_j, x_{j+1}} \quad (A2.8)$$

3e exemple: Supposons que, dans chacune des sections considérées, la concentration varie verticalement mais qu'elle ne varie ni horizontalement, ni dans le temps considéré. On suppose également que les vitesses varient horizontalement et verticalement, mais qu'elles ne varient pas dans le temps considéré.

Cette hypothèse implique donc:

$$\frac{dc}{dx} = 0, \quad \frac{dc}{dy} \neq 0, \quad \frac{dc}{dt} = 0, \quad \frac{dv}{dx} \neq 0, \quad \frac{dv}{dy} \neq 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0$$

On peut alors diviser horizontalement chacune des sections en sous-sections telles que, pour chacune, la concentration au centre puisse être considérée comme la concentration moyenne. On peut alors écrire, pour la sous-section:

$$(Q_m)_{y_k, y_{k+1}} = \bar{c}_{y_k, y_{k+1}} \int_0^x \int_{y_k}^{y_{k+1}} \int_0^t v(x,y,t) dx dy dt \quad (A2.9)$$

Ce qui peut être traduit par:

$$(Q_m)_{y_k, y_{k+1}} = \bar{c}_{y_k, y_{k+1}} \cdot \bar{Q}_{y_k, y_{k+1}} \quad (A2.10)$$

Pour toute la section, le débit massique s'écrirait:

$$Q_m = \sum_k \bar{c}_{y_k, y_{k+1}} \cdot \bar{Q}_{y_k, y_{k+1}} \quad (\text{A2.11})$$

4e exemple: Supposons que, dans chacune des sections considérées, les vitesses varient verticalement mais qu'elles ne varient ni horizontalement ni dans le temps considéré pour le calcul du bilan. On suppose également que la concentration varie horizontalement et verticalement, mais non dans le temps considéré.

Cette hypothèse implique donc:

$$\frac{dx}{dx} = 0, \quad \frac{dv}{dy} \neq 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0, \quad \frac{dc}{dx} \neq 0, \quad \frac{dc}{dy} = 0, \quad \frac{dc}{dt} = 0$$

On peut alors diviser horizontalement chacune des sections en sous-sections telles que, pour chacune, la vitesse au centre puisse être considérée comme la vitesse moyenne pour la sous-section considérée.

$$(Q_m)_{y_k, y_{k+1}} = \bar{Q}_{y_k, y_{k+1}} \int_0^x \int_{y_k}^{y_{k+1}} \int_0^t c(x,y,t) dx dy dt \quad (\text{A2.12})$$

Ce qui peut être traduit par:

$$(Q_m)_{y_k, y_{k+1}} = \bar{c}_{y_k, y_{k+1}} \cdot \bar{Q}_{y_k, y_{k+1}} \quad (\text{A2.13})$$

Pour toute la section, le débit massique s'écrirait:

$$Q_m = \sum \bar{c}_{y_k, y_{k+1}} \cdot \bar{Q}_{y_k, y_{k+1}} \quad (\text{A2.14})$$

ANNEXE 3

Calcul détaillé de la variance du débit
massique instantané

Calcul d'erreur

Lorsque l'on dispose de plusieurs mesures d'un phénomène, l'erreur que l'on commet sur une mesure de ce phénomène est évaluée à partir du calcul de la variance.

Ainsi, pour le débit massique qui est donné par la relation suivante:

$$Q_m = Q \cdot c$$

où Q et c sont des fonctions de x , y et t dans une section donnée, la variance sera donnée par l'équation suivante:

$$\text{var } Q_m = Q^2 \text{ var } c + c^2 \text{ var } Q + 2cQ \text{ cov } cQ \quad (\text{A3.1})$$

où:

$$\begin{aligned} \text{var } c &= \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)^2 \text{ var } x + \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right)^2 \text{ var } y + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)^2 \text{ var } t \\ &+ 2 \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right) \text{ cov } xy + 2 \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) \text{ cov } t + 2 \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) \text{ cov } t \quad (\text{A3.2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{var } Q &= \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right)^2 \text{ var } x + \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right)^2 \text{ var } y + \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)^2 \text{ var } t \\ &+ 2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right) \text{ cov } xy + 2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \text{ cov } xt + 2 \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \text{ cov } yt \quad (\text{A3.3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{cov } cQ &= \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \text{ var } x + \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \text{ cov } xy + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \text{ cov } xt \\ &+ \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right) \text{ cov } xy + \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right) \text{ var } y + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial y}\right) \text{ cov } yt \\ &+ \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \text{ cov } xt + \left(\frac{\partial c}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \text{ cov } yt + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \text{ var } t \quad (\text{A3.4}) \end{aligned}$$

Cependant, si l'on considère les différents termes qui apparaissent dans les équations (A3.2) (A3.3) (A3.4), on constate que certains peuvent être éliminés, tels que:

cov xy

cov xt

cov yt

étant donné que les variables x, y et t sont indépendantes l'une de l'autre.

Les termes $\frac{\partial c}{\partial x}$, $\frac{\partial c}{\partial y}$, $\frac{\partial c}{\partial t}$, $\frac{\partial Q}{\partial x}$, $\frac{\partial Q}{\partial y}$ et $\frac{\partial Q}{\partial t}$ sont évalués pour la valeur moyenne des coordonnées x, y et t du point considéré. Pour simplifier l'écriture dans tout le texte, on écrit par exemple $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)^2$ au lieu de $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)^2 / x_m y_m t_m$.

Lorsque l'on connaît la variance, on exprime donc, nonobstant les erreurs de laboratoires, etc., le débit massique de la façon suivante:

$$Q_m \pm S_{Q_m}$$

$$\text{où } S_{Q_m} = \sqrt{\text{var } Q_m}$$

ANNEXE 4

Cycles des transformations de l'azote, du phosphore et du carbone

La figure A4-1 montre le cycle des transformations de l'azote dans le milieu aquatique. Les formes majeures d'azote en solution qui peuvent être assimilées par les organismes autotrophes sont les nitrates, les nitrites et l'azote ammoniacal; l'azote moléculaire en solution peut également être fixé par certaines bactéries ou algues pour la synthèse d'azote organique. Une partie de cet azote organique dans les organismes peut être excrétée par ces derniers dans la solution. Lors de la décomposition des organismes, une fraction de l'azote organique est transformée en azote ammoniacal ou en nitrite alors que l'autre est réfractaire (beaucoup moins disponible). L'azote ammoniacal peut être oxydé en milieu aérobie, par des bactéries autotrophes, sous forme de nitrite et, finalement, de nitrates. En milieu anaérobie, les nitrates peuvent être transformés en nitrites et en azote moléculaire par des bactéries hétérotrophes. L'azote ammoniacal et l'azote organique en solution peuvent s'adsorber sur les sédiments en suspension ou, inversement, être remis en solution.

Ces transformations, d'une forme à l'autre, se produisent naturellement dans les eaux du fleuve et risquent de se produire dans l'échantillon d'eau s'il n'est pas préservé adéquatement.

La figure A4-2 montre le schéma de transformation du phosphore dans le milieu aquatique. Les formes de phosphore assimilables pour la productivité biologique sont les ortho-phosphates et le phosphore organique en solution. Les organismes peuvent excréter du phosphore organique en solution. Lors de la décomposition des organismes, une fraction du phosphore organique est remise en solution sous forme d'ortho-phosphate ou de phosphore organique, alors que l'autre fraction est réfractaire. En solution, des ortho-phosphates sont produits par minéralisation des phosphates organiques ou par hydrolyse des polyphosphates. Les ortho-phosphates, les polyphosphates et les phosphates organiques peuvent s'adsorber sur les sédiments en suspension ou, inversement, être remis en solution.

Comme pour l'azote, ces transformations, d'une forme à l'autre, risquent de se produire dans l'échantillon d'eau s'il n'est pas préservé adéquatement.

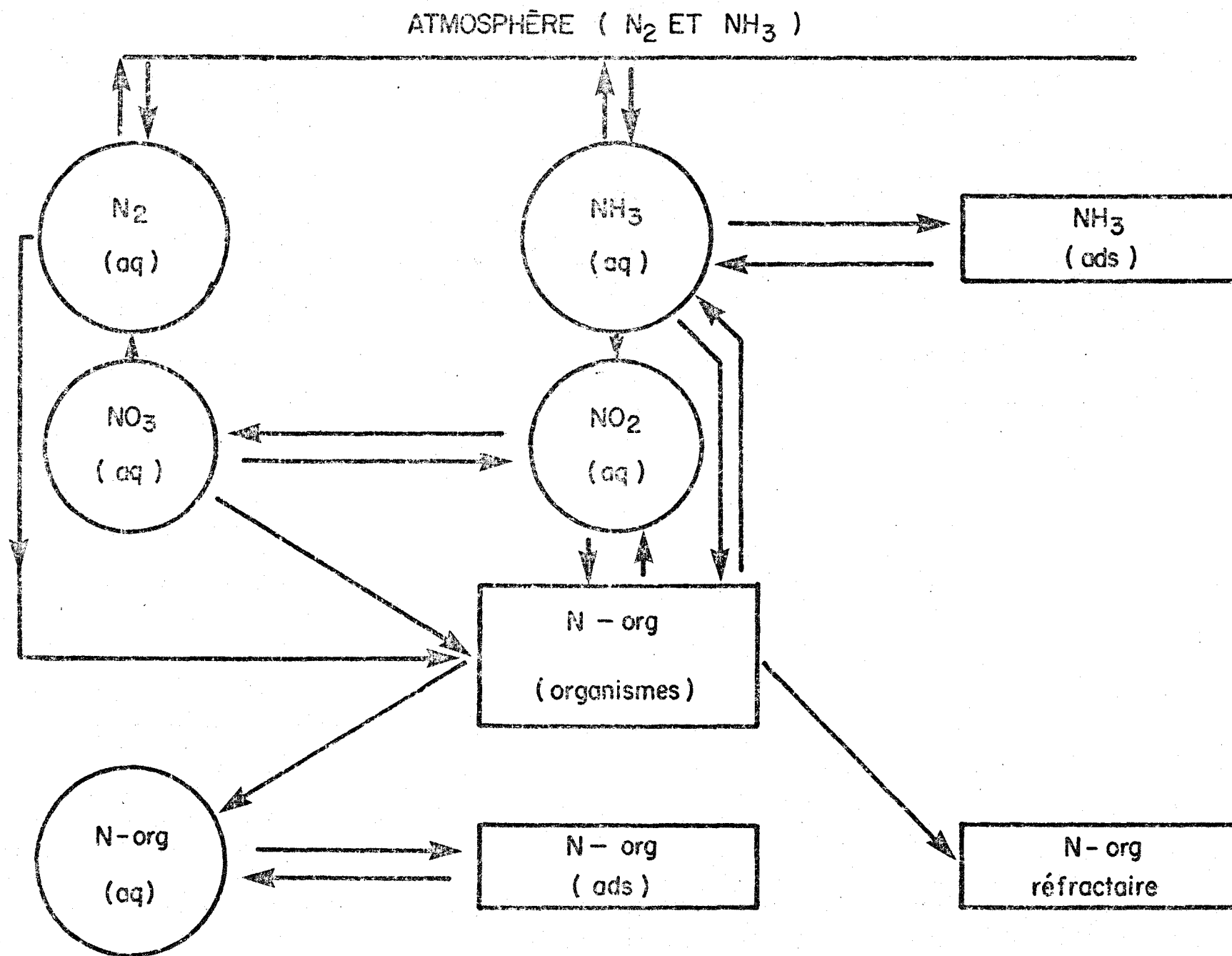


Fig. A.4.1. Schéma des transformations de l'azote en milieu aquatique.

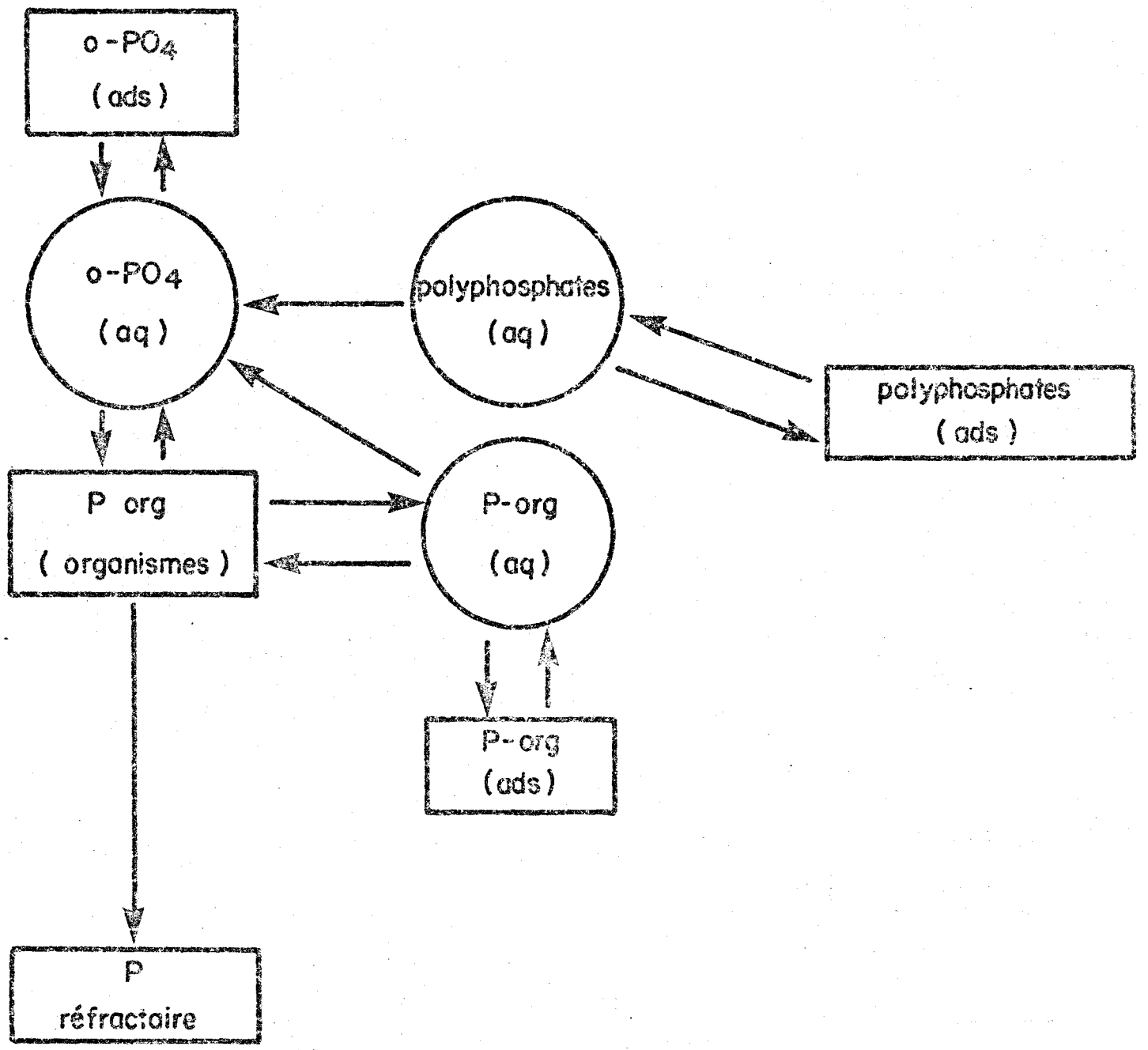


Fig. A.4.2. Schéma des transformations du phosphore en milieu aquatique.

La figure A4-3 montre le cycle du carbone dans le milieu aquatique. La matière organique allochtone ou autochtone peut être transformée par les microorganismes hétérotrophes en CO_2 , lequel peut être échangé avec l'atmosphère. Le CO_2 peut être utilisé par les organismes autotrophes, lesquels peuvent excréter du carbone organique en solution. Du carbone inorganique peut être perdu de la solution par précipitation de carbonates (ex.: CaCO_3) ou remis en solution par dissolution de carbonates de métaux. La matière organique en solution peut également s'associer aux sédiments en suspension ou, à l'inverse, être remise en solution à partir des sédiments en suspension.

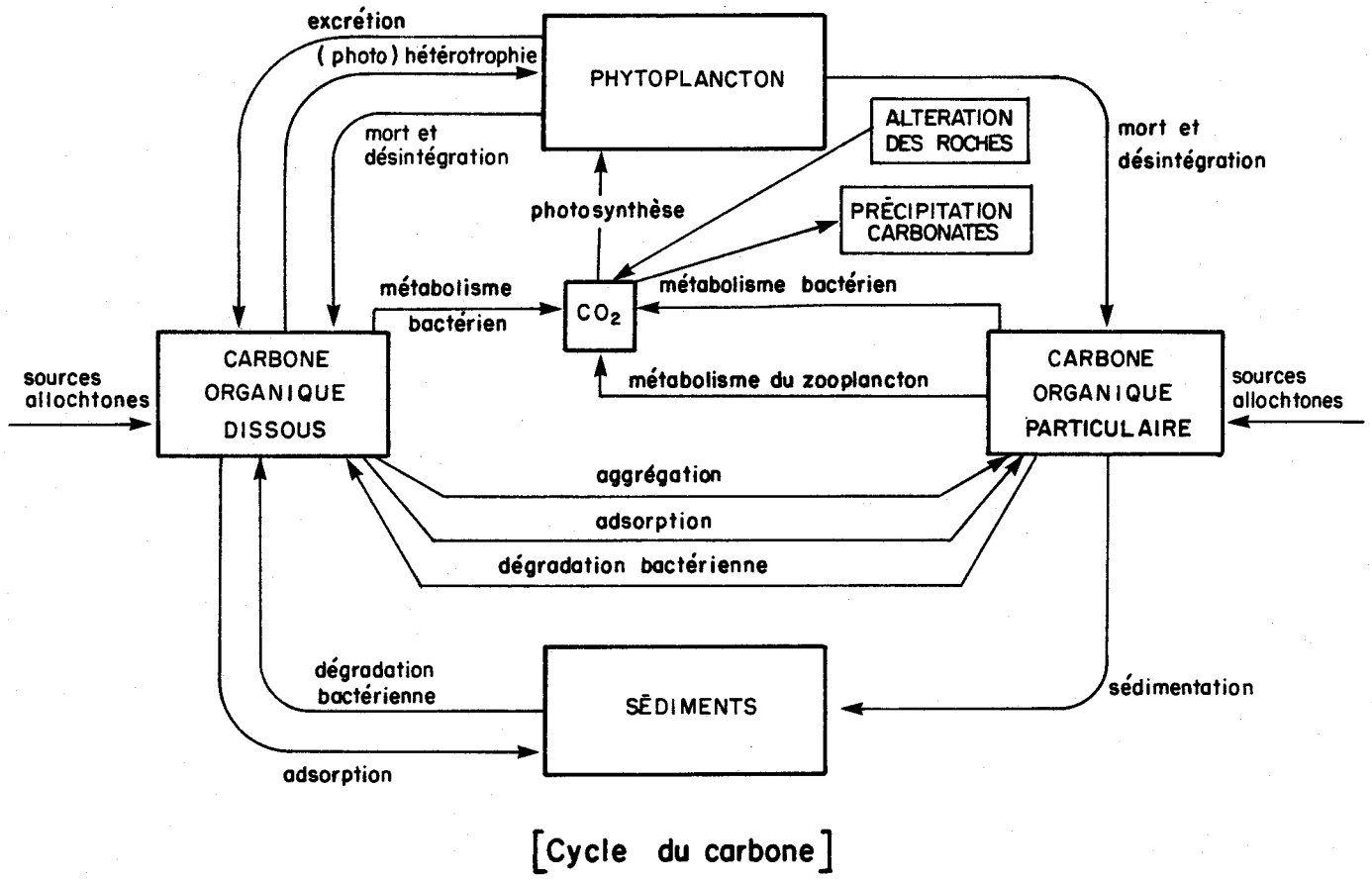


Fig. A.4.3. Cycle du carbone dans le milieu aquatique.

ANNEXE 5

Calcul de la variance du débit massique pour la
section du lac Saint-Louis

En faisant les hypothèses:

$$\text{var } t = \text{var } y = 0$$

on obtient (voir la section 3.3.3), pour la variance du débit massique, l'équation:

$$\begin{aligned} \text{var } Q_{mT} = & \sum_k \left\{ Q^2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \text{var } x \right\}_k + \sum_k \left\{ c^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{var } x \right\}_k \\ & + \sum_k \left\{ 2 c Q \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{var } x \right\}_k \end{aligned} \quad (\text{A.5.1})$$

Pour évaluer $\text{var } Q_{mT}$, il faut donc calculer les taux moyens de variation de $\frac{\partial c}{\partial x}$ et de $\frac{\partial Q}{\partial x}$, ainsi que $\text{var } x$. Le calcul est présenté en détail pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

Détail du calcul des taux moyens de variation de $\frac{\partial c}{\partial x}$

Le taux moyen de variation des concentrations en fonction des distances d'une station à une autre, $\overline{\frac{\partial c}{\partial x}}$, est donné par l'équation:

$$\overline{\frac{\partial c}{\partial x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right)_i}{n} \quad (\text{A.5.2})$$

où n est le nombre de mesures faites sur des paires de stations voisines.

Les données de phosphore total (F), azote total (F) et solides en suspension, obtenues en 1975 pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5) ont été utilisées pour ce calcul; les valeurs de concentration et les distances de la rive nord sont présentées dans les Tableaux A.5.1 à A.5.3. Les différences de concentration (Δc) et les distances correspondantes (Δx) entre les stations voisines apparaissent dans les Tableaux A.5.4 à A.5.6. On remarque que les données du mois d'août 1975 n'ont pas été utilisées car le positionnement des stations n'a pas

TABLEAU A.5.1: Concentrations de phosphore total (F)¹ et position des stations de mesure par rapport à la rive nord pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

STATION ²	JUN 1975		JUILLET 1975		AOÛT 1975		SEPTEMBRE 1975		NOVEMBRE 1975	
	[P] _T mg PO ₄ /l	distance ³ (pi)	[P] _T mg PO ₄ /l	distance ³ (pi)	[P] _T mg PO ₄ /l	distance ³ (pi)	[P] _T mg PO ₄ /l	distance ³ (pi)	[P] _T mg PO ₄ /l	distance ³ (pi)
01	.03	90	.05	220	.01	320	.10	176	.39	120
02	.02	330	.05	515	.03	640	.06	420	.08	400
03	.06	600	.04	800	.03	960	.05	720	.05	720
04	.02	800	.06	1100	.04	1380	.04	1025	.08	1000
05	.03	1025	.05	1400	-		.04	1325	.07	1300
06			.05	1650	.04	1700	.05	1616	.06	1560
07			.06	2005	.04	2020	.05	1897	.06	1900
08			.06	2310	.04	2340	.05	2200	.06	2160
09			.05	2590	.05	2660	.05	2500	.02	2500
10			.06	2902	.05	2980	.04	2825	.03	2820
11			.06	3100	-	3230	.04	3105	.02	3060

¹F: échantillon filtré

² : échantillonnée en surface

³ : distance par rapport à la rive nord

TABLEAU A.5.2: Concentrations d'azote total (F)¹ et position des stations de mesure par rapport à la rive nord pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5)

STATION ²	JUIN 1975		JUILLET 1975		AOÛT 1975		SEPTEMBRE 1975		NOVEMBRE 1975	
	[N] _T (mg N/l)	distance ³ (pi)	[N] _T (mg N/l)	distance ³ (pi)	[N] _T (mg N/l)	distance ³ (pi)	[N] _T (mg N/l)	distance ³ (pi)	[N] _T (mg N/l)	distance ³ (pi)
01	.90	90	.44	220	.23	320	.50	176	.86 ⁴	120
02	.62	330	.50	515	.26	640	.33	420	.58	400
03	.56	600	.35	800	.27	960	.35	720	.50	720
04	.54	800	.39	1100	.36	1380	.30	1025	.46	1000
05	.53	1023	.46	1400	-		.33	1325	.57	1300
06			.45	1650	.37	1700	.32	1616	.44	1560
07			.48	2005	.34	2020	.40	1897	.41	1900
08			.44	2310	.36	2340	.39	2200	.47	2160
09			.45	2590	.34	2660	.32	2500	.47	2500
10			.39	2902	.38	2980	.32	2825	.45	2820
11			.36	3100	-	3230	.39	3105	.43	3060

¹F: échantillon filtré

² : échantillonnée en surface

³ : distance par rapport à la rive nord

⁴ : échantillon prélevé à une profondeur de 5 pieds

TABLEAU A.5.3: Concentrations de solides en suspension et position des stations de mesure par rapport à la rive nord pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

STATION ¹	JUIN 1975		JUILLET 1975		AOÛT 1975		SEPTEMBRE 1975		NOVEMBRE 1975	
	S.S. ² (mg/l)	distance ³ (pi)	S.S. ² (mg/l)	distance ³ (pi)	S.S. ² (mg/l)	distance ³ (pi)	S.S. ² (mg/l)	distance ³ (pi)	S.S. ² (mg/l)	distance ³ (pi)
01	21	90	4.0	220	10.0	320	5.6	176	33	120
02	18	330	4.0	515	1.5	640	-	420	16	400
03	7	600	1.5	800	1.5	960	1.5	720	12	720
04	9	800	1.5	1100	1.5	1380	-	1025	14	1000
05	11	1025	5.0	1400	-		4.0	1325	15	1300
06			7.0	1650	8.0	1700	-	1616	21	1560
07			7.0	2005	6.0	2020	5.0	1897	24	1900
08			7.0	2310	4.0	2340	-	2200	32	2160
09			5.0	2590	4.0	2660	3.0	2500	16	2500
10			7.0	2902	4.0	2980	-	2825	28	2820
11			6.0	3100	-	3230	5.0	3105	22	3060

¹: échantillonnée en surface

²: solides en suspension

³: distance de la rive nord

TABLEAU A.5.4: Variation de la concentration de phosphore total (F)¹ en fonction de la distance entre les stations pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

JUILLET 1975		SEPTEMBRE 1975		NOVEMBRE 1975	
Δc (mg PO ₄ /l)	Δx (pi)	Δc (mg PO ₄ /l)	Δx (pi)	Δc (mg PO ₄ /l)	Δx (pi)
.00	295	.04	244	.31	380
.01	285	.01	300	.03	320
.02	300	.01	305	.03	280
.01	300	.00	300	.01	300
.00	250	.01	291	.01	260
.01	355	.00	281	.00	340
.00	305	.00	303	.00	260
.01	280	.00	300	.04	340
.01	312	.01	325	.01	320
.00	198	.00	280	.01	240

¹F: échantillon filtré

TABLEAU A.5.5: Variation de la concentration d'azote total (F)¹ en fonction de la distance entre les stations pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

JUILLET 1975		SEPTEMBRE 1975		NOVEMBRE 1975	
Δc (mg N/l)	Δx (pi)	Δc (mg N/l)	Δx (pi)	Δc (mg N/l)	Δx (pi)
.06	295	.17	244	(.28)	380
.15	285	.02	300	.08	320
.04	300	.05	305	.04	280
.07	300	.03	300	.11	300
.01	250	.01	291	.13	260
.03	355	.08	281	.03	340
.04	305	.01	303	.06	260
.01	280	.07	300	.00	340
.06	312	.00	325	.02	320
.03	198	.07	280	.02	240

¹F: échantillon filtré

TABLEAU A.5.6: Variation de la concentration de solides en suspension en fonction de la distance entre stations pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

JUILLET 1975		SEPTEMBRE 1975		NOVEMBRE 1975	
Δc (mg/l)	Δx (pi)	Δc (mg/l)	Δx (pi)	Δc (mg/l)	Δx (pi)
0	295	4.1	544	17	380
2.5	285	-	-	4	320
0	300	2.5	605	2	280
3.5	300	-	-	1	300
2	250	1	572	6	260
0	355	-	-	3	340
0	305	2	603	8	260
2	280	-	-	16	340
2	312	2	605	12	320
1	198	-	-	6	240

été effectué pour ce mois.

Finalement, les taux moyens de variation des concentrations en fonction des distances, calculés à l'aide de l'équation (A.5.1) sont présentés dans le Tableau A.5.7.

Calcul de la variance de x

La variance de x est calculée par l'équation:

$$\text{var } x = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x)_i^2}{n-1} \quad (\text{A.5.2})$$

où:

n = nombre total de stations échantillonnées

$(\Delta x)_i$ = écart par rapport à la position moyenne de la station i.

La variance de x ainsi obtenue est une mesure de la déviation moyenne de l'ensemble des stations d'une section.

L'écart dans la position des stations, par rapport à la valeur moyenne est donné dans le Tableau A.5.8 pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5). En appliquant l'équation (A.5.2) à ces valeurs, on calcule:

$$\text{var } x = 1951 \text{ pi}^2$$

Calcul du taux moyen de variation $\frac{\partial Q}{\partial x}$

Le taux moyen de variation du débit en fonction des distances d'une station à l'autre, $\frac{\partial Q}{\partial x}$, est donné par:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \bar{S} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \quad (\text{A.5.3})$$

TABLEAU A.5.7: Taux moyen de variation des concentrations en fonction des distances d'une station à l'autre pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

ECHANTILLONNAGE	$\overline{\frac{\partial c}{\partial x}}$		
	Phosphore total (mg PO ₄ /l)	Azote total (mg N/l)	Solides en suspension (mg/l)
juillet 1975	2.3×10^{-5}	1.7×10^{-4}	4.7×10^{-3}
septembre 1975	2.9×10^{-5}	1.9×10^{-4}	4.0×10^{-3}
novembre 1975	1.3×10^{-4}	2.5×10^{-4}	2.4×10^{-2}

TABLEAU A.5.8: Ecart de la position de chaque station par rapport à la moyenne dans le temps pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

Station	Distance moyenne par rapport à la rive nord ¹ (pi)	Ecart par rapport à la moyenne, Δx (pi)		
		Juillet 1975	Septembre 1975	Novembre 1975
01	166	54	-8	-46
02	445	70	-25	-45
03	747	53	-27	-26
04	1042	58	-17	-41
05	1342	58	-17	-41
06	1610	40	10	-50
07	1934	71	-37	-34
08	2223	87	-23	-64
09	2530	60	-30	-30
10	2849	53	-24	-29
11	3088	12	17	-29

¹: Moyenne pour les mois de juillet, septembre et novembre 1975; les valeurs mensuelles sont données dans le Tableau A.5.1.

où \bar{S} , la surface moyenne couverte par une station, est donnée par:

$$\bar{S} = \frac{S_T}{n+1} \quad (\text{A.5.4})$$

et $\overline{\frac{\partial v}{\partial x}}$, le taux moyen de variation de la vitesse en fonction des distances d'une station à l'autre, par:

$$\overline{\frac{\partial v}{\partial x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|\Delta v|}{\Delta x} \right)_i}{n+1} \quad (\text{A.5.5})$$

Dans les équations (A.5.4) et (A.5.5), S_T est la surface totale de la section transversale, n est le nombre de mesures de la vitesse alors que Δv et Δx sont respectivement la différence de vitesse et la distance entre deux points de mesure de la vitesse.

Les mesures de vitesses faites à la section du lac Saint-Louis (millage 143.5) proviennent d'un échantillonnage effectué en septembre 1975. On suppose que le taux moyen de variation de la vitesse est constant. Les valeurs présentées dans le Tableau A.5.9 permettent donc de calculer:

$$\bar{S} = 5045 \text{ pi}^2$$

ainsi que les variations de vitesse entre chaque paire de points de mesure; ces dernières valeurs sont présentées dans le Tableau A.5.10. En appliquant les équations (A.5.5) et (A.5.3), on calcule:

$$\overline{\frac{\partial v}{\partial x}} = 0.0036 \text{ sec}^{-1}$$

$$\overline{\frac{\partial Q}{\partial x}} = 18.2 \text{ pi}^2/\text{sec} \quad (1.57 \times 10^6 \text{ pi}^2/\text{j})$$

La valeur de $\overline{\frac{\partial Q}{\partial x}}$, ainsi calculée, est une bonne estimation du taux moyen de variation du débit en fonction de la distance de la rive.

TABLEAU A.5.9: Valeurs de la vitesse et du débit dans la section du lac Saint-Louis (millage 143.5) - Echantillonnage de septembre 1975.

Numéro de la section	Vitesse moyenne (pi/sec)	Aire (pi ²)	Q corrigé (pi ³ /sec)	% Q _{total}
1	.30	562	177	0.06
2	1.00	506	529	0.18
3	1.20	788	987	0.34
4	2.90	2644	8009	2.72
5	1.71	7706	13765	4.68
6	0.75	4781	3746	1.27
7	1.80	6131	11528	3.92
8	0.90	7594	7140	2.43
9	2.70	3938	11107	3.78
10	3.42	1969	7034	2.39
11	3.24	2025	6854	2.33
12	2.16	2306	5203	1.77
13	2.16	3319	7489	2.55
14	2.61	2869	7822	2.66
15	2.25	2869	6742	2.29
16	1.98	1350	2792	0.95
17	2.07	3150	6811	2.32
18	2.88	11644	35031	11.92
19	2.70	16200	45692	15.54
20	3.15	10969	36095	12.28
21	1.76	11138	20419	6.95
22	4.05	11588	49025	16.68
TOTAL		116046	293997	

TABLEAU A.5.10: Variation de la vitesse en fonction de la distance entre les stations pour la section du lac Saint-Louis (millage 143.5) - Echantillonnage de septembre 1975.

Points de mesures considérés	Différence de vitesse (pi/sec)	Distance entre les points de mesure (pi)
0 - 1	0.30	340
1 - 2	0.70	120
2 - 3	0.20	220
3 - 4	1.70	100
4 - 5	-1.19	600
5 - 6	-0.96	1050
6 - 7	1.05	910
7 - 8	-0.90	1020
8 - 9	1.80	440
9 - 10	0.72	60
10 - 11	-0.18	40
11 - 12	-1.08	80
12 - 13	0.00	220
13 - 14	0.45	140
14 - 15	-0.36	170
15 - 16	-0.27	140
16 - 17	0.09	50
17 - 18	0.81	430
18 - 19	-0.18	1000
19 - 20	0.45	1010
20 - 21	-1.39	1060
21 - 22	2.29	940
22 - 23	-2.29	560

Calcul de la variance du débit massique

Un exemple détaillé du calcul de la variance du débit massique de phosphore total (F) est donné pour l'échantillonnage de novembre 1975 à la section du lac Saint-Louis (millage 143.5). Les résultats pour le phosphore total (F), l'azote total (F) et les solides en suspension sont ensuite présentés en détail dans le Tableau A.5.11.

Le débit massique de $P_T(F)$ est de 49,500 kg/j (voir le Tableau 3.19) et le débit total, Q_T , pour l'échantillonnage de novembre 1975 était de $3.12 \times 10^5 \text{ pi}^3/\text{sec}$ ($2.70 \times 10^{10} \text{ pi}^3/\text{j}$); on peut donc calculer la concentration moyenne \bar{c} de phosphore total (F) dans la section:

$$\bar{c} = Q_{mT}/Q_T = 1.84 \times 10^{-6} \text{ kg/pi}^3$$

D'après le Tableau A.5.7, le taux moyen de variation de la concentration de $P_T(F)$ par rapport à x est:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ mg/l-pi} \quad (3.68 \times 10^{-9} \text{ kg/pi}^4)$$

On a calculé précédemment que $\frac{\partial Q}{\partial x}$ est de $18.2 \text{ pi}^2/\text{sec}$ ($1.57 \times 10^6 \text{ pi}^2/\text{j}$) et que la variance de x est de 1951 pi^2 .

On peut donc évaluer les trois termes de l'équation (A.5):

$$\begin{aligned} Q_T^2 \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x &= 1.9 \times 10^7 \text{ kg}^2/\text{j}^2 \\ \bar{c}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \text{ var } x &= 1.6 \times 10^4 \text{ kg}^2/\text{j}^2 \\ 2 \bar{c} Q_T \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \text{ var } x &= 1.1 \times 10^6 \text{ kg}^2/\text{j}^2 \end{aligned}$$

La variance du débit massique est donc:

$$\text{var } Q_{mT} = 2.0 \times 10^7 \text{ kg}^2/\text{j},$$

TABLEAU A.5.11: Calcul détaillé de la variance du débit massique de phosphore total (F), d'azote total (F) et de solides en suspension - Echantillonnage de novembre 1975 à la section du lac Saint-Louis (millage 143.5).

	P_T (F)	N_T (F)	Sédiments en suspension
Q_{mT} (kg/j)	4.95×10^4	3.38×10^5	1.72×10^7
Q_T (pi ³ /j)	2.70×10^{10}	2.70×10^{10}	2.70×10^{10}
\bar{c} (kg/pi ³)	1.84×10^{-6}	1.25×10^{-5}	6.4×10^{-4}
$\left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right)$ (kg/pi ⁴)	3.68×10^{-9}	7.08×10^{-9}	6.8×10^{-7}
$\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right)$ (pi ² /j)	1.57×10^6	1.57×10^6	1.57×10^6
var x (pi ²)	1951	1951	1951
$Q_T^2 \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right) \text{ var } x$ (kg ² /j ²)	1.9×10^7	7.1×10^7	6.5×10^{11}
$\bar{c}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \text{ var } x$ (kg ² /j)	1.6×10^4	7.6×10^5	2.0×10^9
$2\bar{c} Q_T \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \text{ var } x$ (kg ² /j)	1.1×10^6	1.5×10^7	7.2×10^{10}
var Q_{mT} (kg ² /j)	2.0×10^7	8.7×10^7	7.3×10^{11}
C_v (Q_{mT})	0.09	0.03	0.05

ce qui donne un coefficient de variation:

$$C_v (Q_{mT}) = 0.09$$

ANNEXE 6

Description de la méthode d'analyse factorielle des correspondances

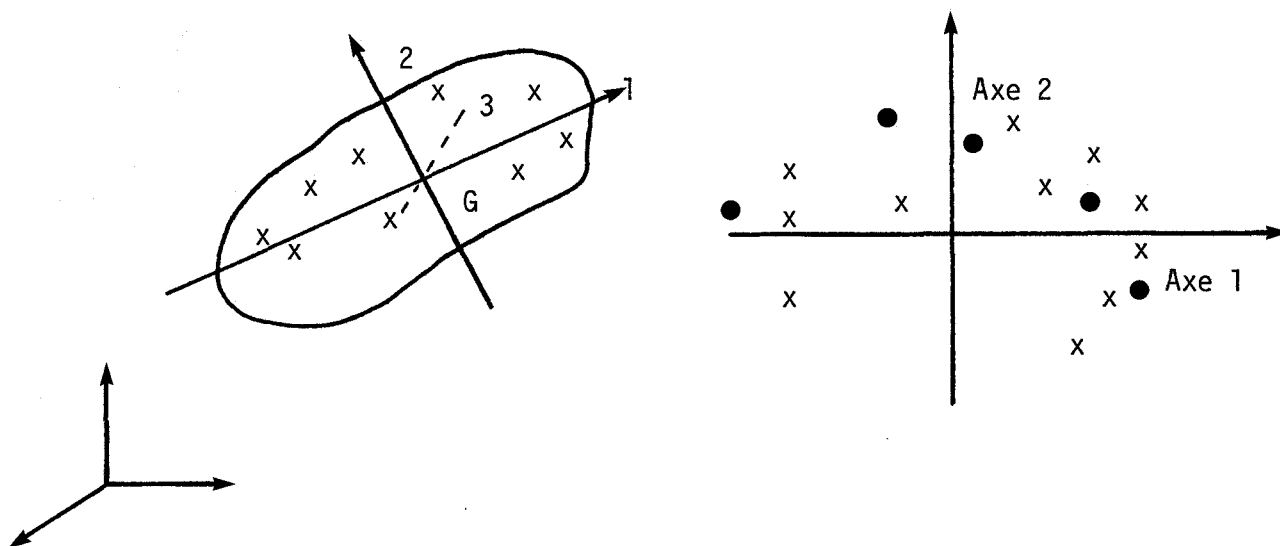
L'analyse factorielle des correspondances, une variante de l'analyse en composantes principales, a été développée récemment (Benzecri et al., 1973). Les grandes lignes de cette méthode sont décrites ci-dessous.

Considérons un tableau de N lignes et p colonnes composé de nombres positifs (représentant, par exemple, les valeurs de p paramètres, en N stations, à une date donnée), que l'on transforme en divisant chaque élément par la somme des éléments du tableau. Si l'on note respectivement $x_{.j}$ et $x_{i.}$ la somme des éléments de la colonne j et de la ligne i , on peut considérer que:

- le vecteur colonne $\{x_{1j}/x_{.j}, \dots, x_{ij}/x_{.j}, \dots, x_{Nj}/x_{.j}\}$ représente le point "paramètre" P_j dans l'espace à N dimensions;
- le vecteur ligne $\{x_{i1}/x_{i.}, \dots, x_{ij}/x_{i.}, \dots, x_{ip}/x_{i.}\}$ représente le point "station" M_i dans l'espace à p dimensions.

On peut donc associer au tableau soit un ensemble de p points P_j ($j=1, \dots, p$) ou encore un ensemble de N points M_i ($i=1, \dots, N$).

La méthode permet de déterminer les axes principaux du nuage des p points P_j et du nuage des N points M_i et de projeter ensuite les points de chaque nuage dans le plan d'axes principaux pris 2 à 2. En pratique, on utilise, pour chaque nuage, surtout le plan des 2 premiers axes. La projection d'un point (coordonnée) sur un axe i est le facteur i relatif à ce point (voir le schéma ci-dessous).



La transformation effectuée sur le tableau de départ implique que 2 vecteurs lignes (ou colonnes) de ce tableau qui ont des composantes proportionnelles sont représentés dans le nuage (donc en projection dans le plan d'axes principaux) par 2 points confondus. Cette particularité de l'AFC permet donc de mettre en évidence des similitudes de comportement ou des types de variations identiques, puisque les points représentatifs (paramètres ou stations) seront confondus ou voisins dans la représentation graphique, et auront donc des facteurs identiques ou du même ordre de grandeur.

L'analyse effectuée sur chaque nuage permet de déterminer les axes principaux de chacun des nuages, et il est particulièrement intéressant de superposer les plans des axes (i,j) obtenus par chacune des 2 analyses; on démontre en effet que dans cette représentation simultanée, la proximité entre un point "paramètre" et un groupe de point "station" signifie que ce paramètre caractérise le comportement du groupe de stations. De plus, il est en général possible, compte tenu de la position des points "paramètres" et des points "stations" par rapport aux axes, de donner une signification physique à ces derniers.

ANNEXE 7. Représentation sur les axes factoriels des régions homogènes

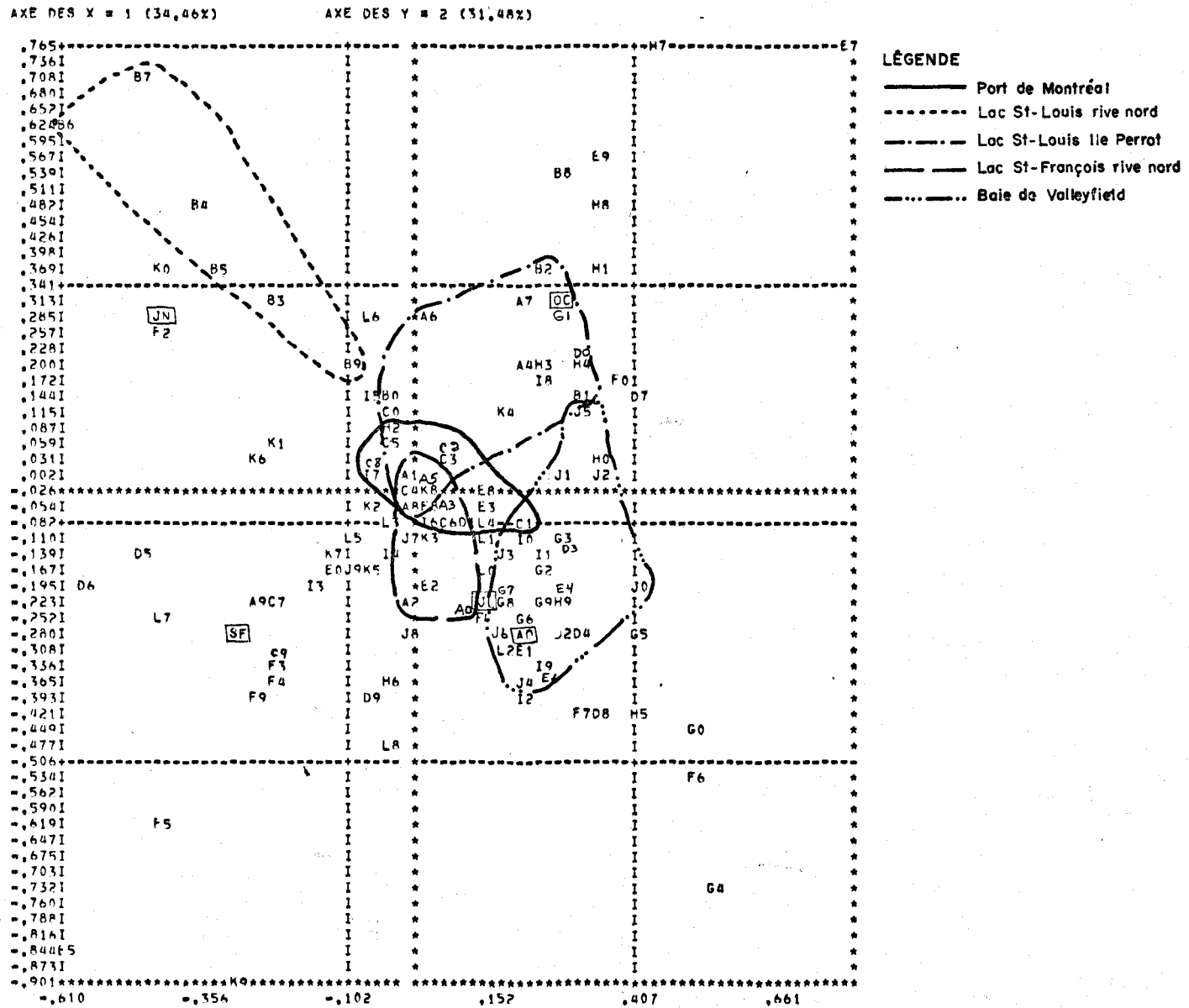
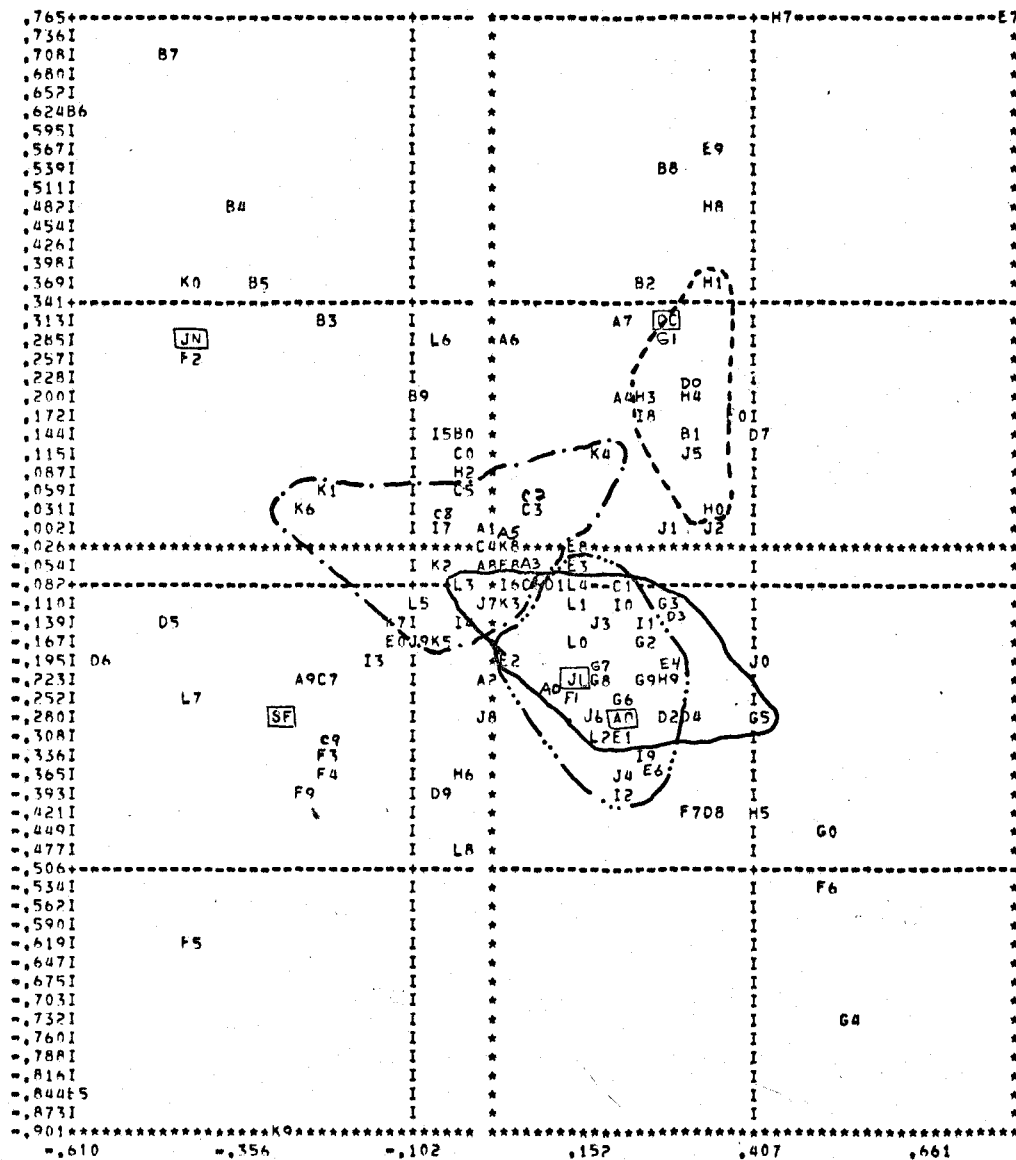


Fig. A.7.1. Représentation des stations de mesure de turbidité et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac St-François et le port de Montréal.

AXE DES X = 1 (34,46X)

AXE DES Y = 2 (31,48X)



LÉGENDE

- Répentigny - amont du lac Saint-Pierre
- - - - - Aval du lac Saint-Pierre à Gentilly
- Iles de Boucherville et de Varenne
- Portneuf à Québec

Fig. A.7.2. Représentation des stations de mesure de turbidité et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre les îles de Boucherville et Québec.

AXE DES X = 1 (46,25%)

AXE DES Y = 2 (25,60%)

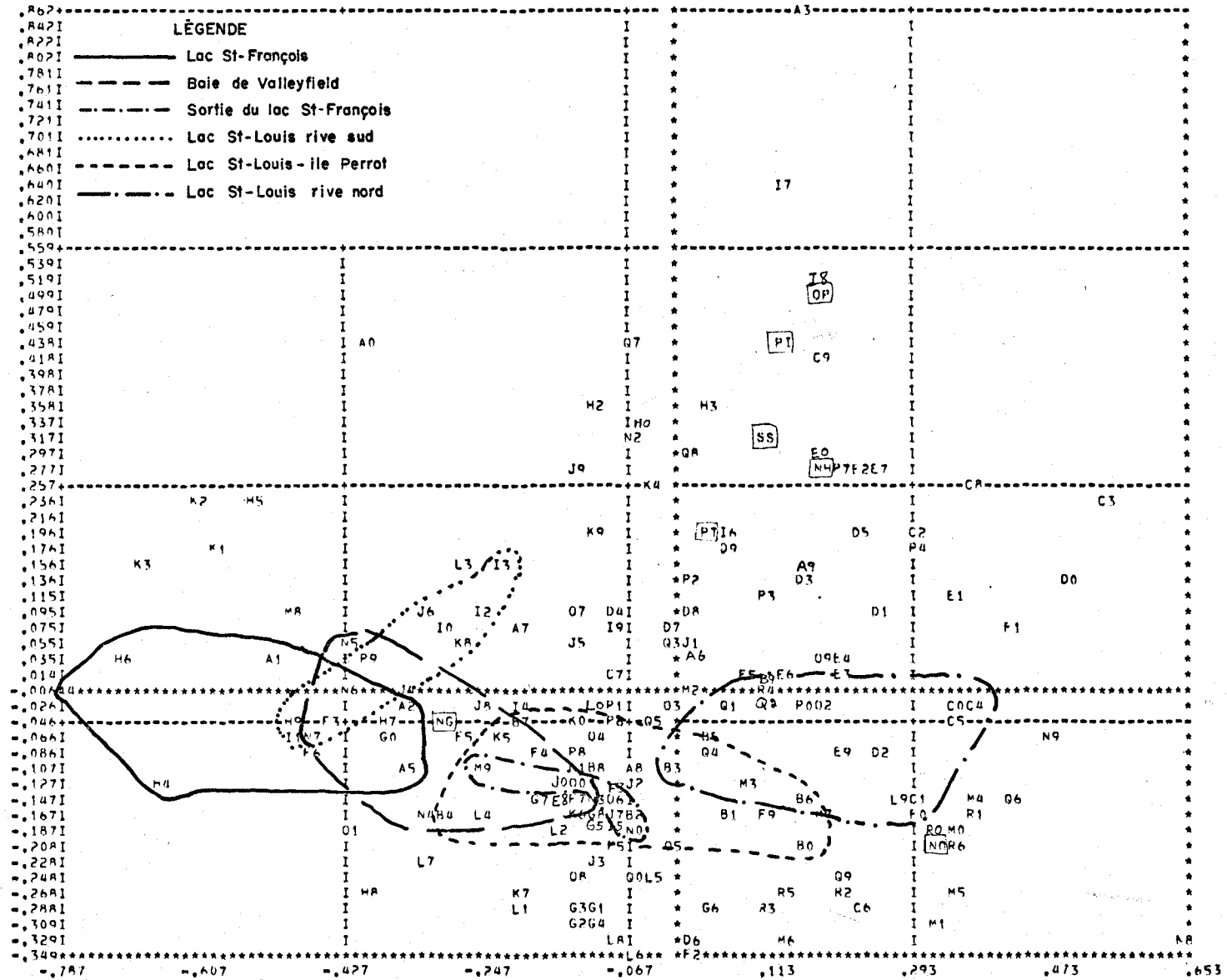


Fig. A.7.3. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis (juin 1975).

AXE DES X = 1 (46,25%)

AXE DES Y = 2 (25,60%)

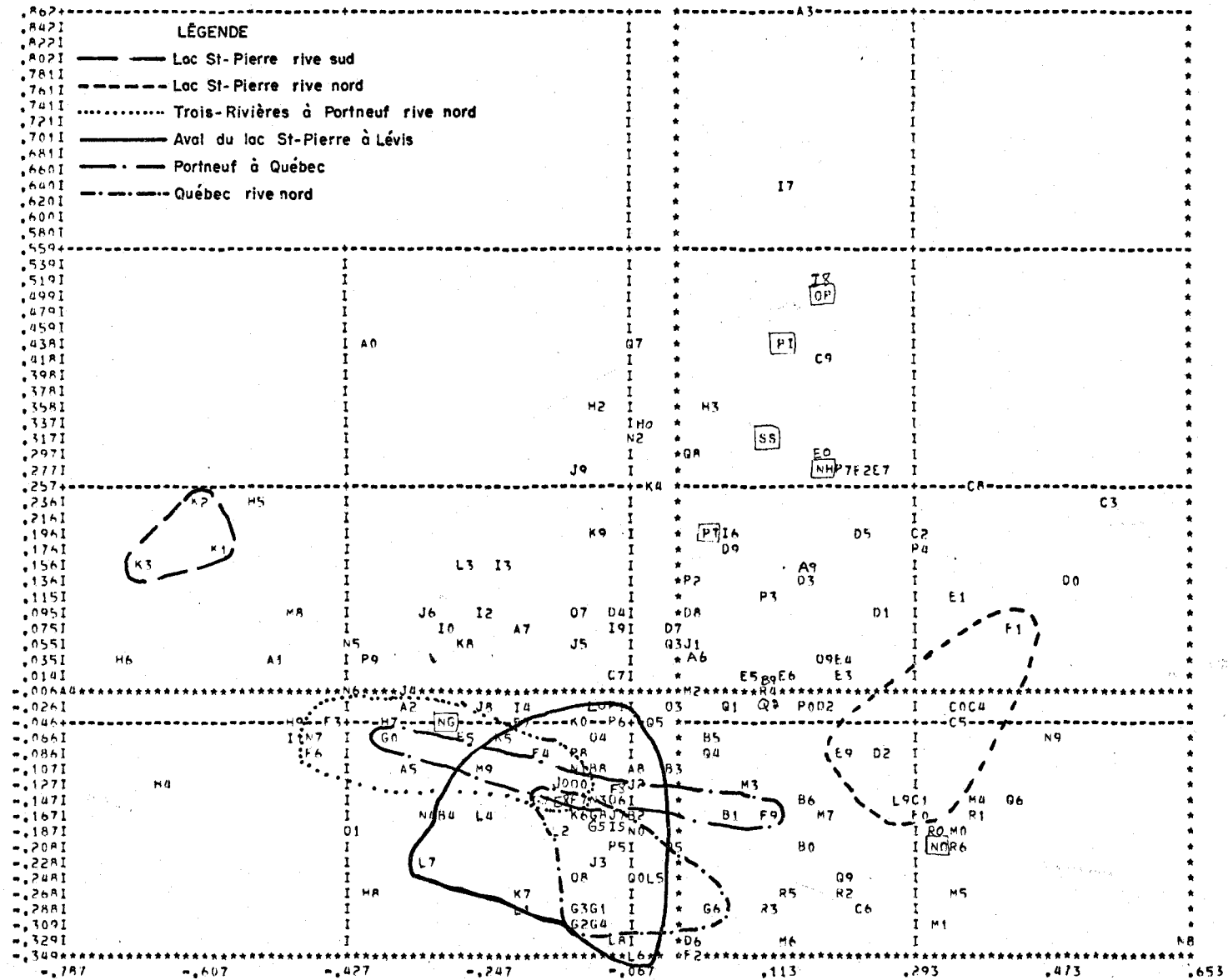


Fig. A.7.5. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-Pierre et Québec (juin 1975).

AXL DES X = 1 (43,08%)

AXY DES Y = 2 (31,13%)

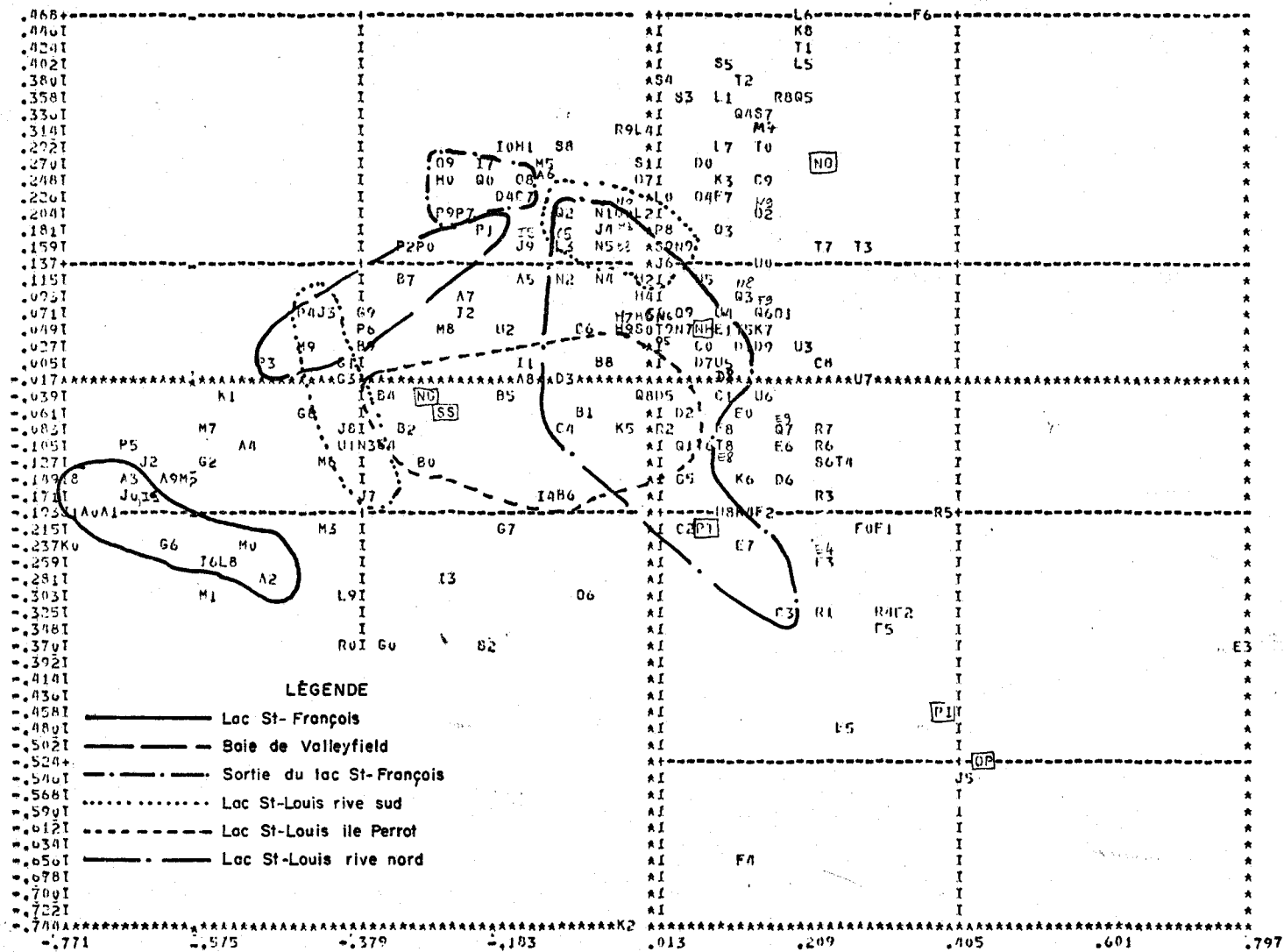


Fig. A.7.6. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis (juillet 1975).

AXL DES X = 1 (43,08X)

AXY DES Y = 2 (31,13X)

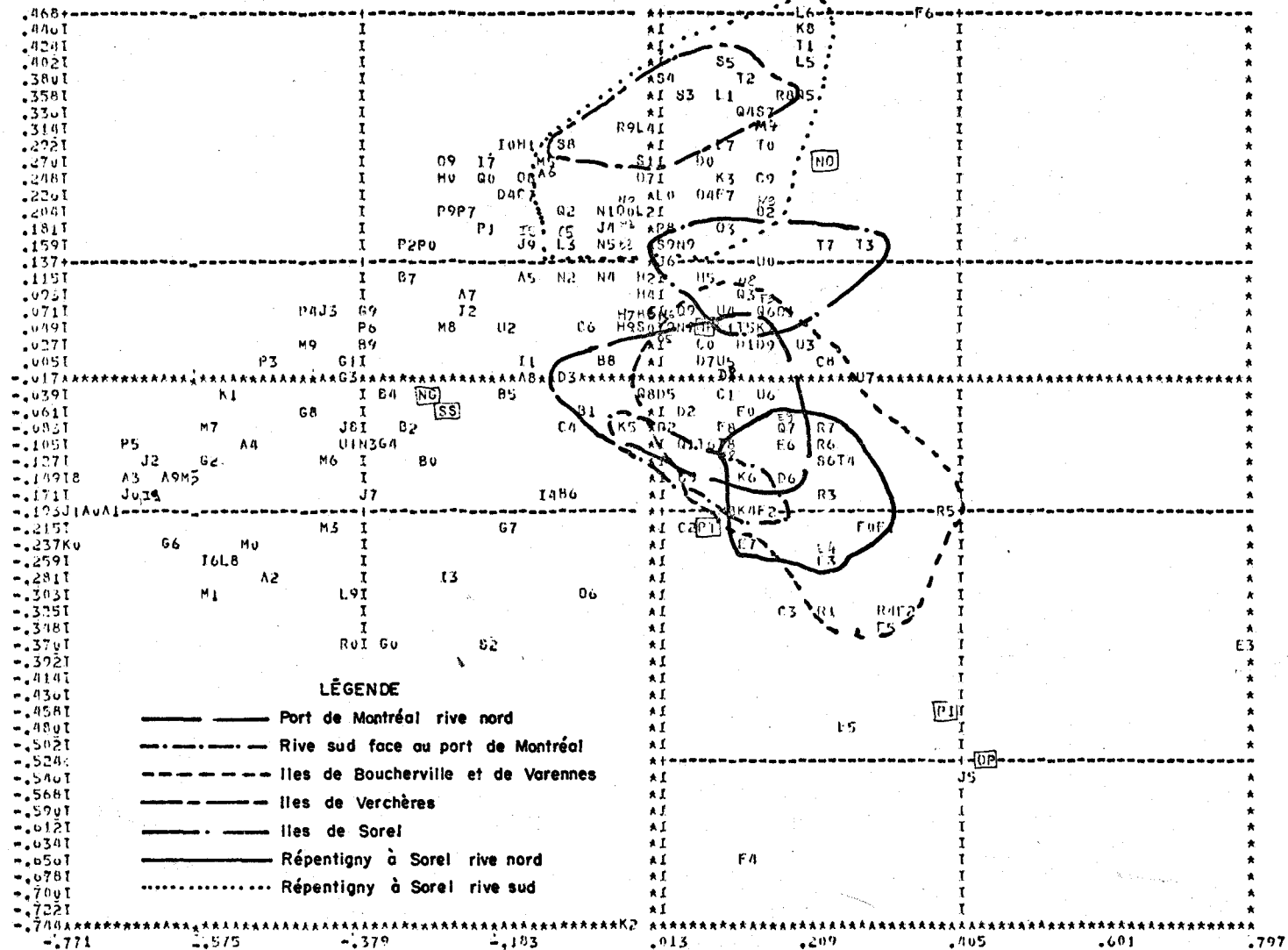


Fig. A.7.7. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le port de Montréal et les îles de Sorel (juillet 1975).

AXL DES X = 1 (43,08%)

AXY DES Y = 2 (51,13%)

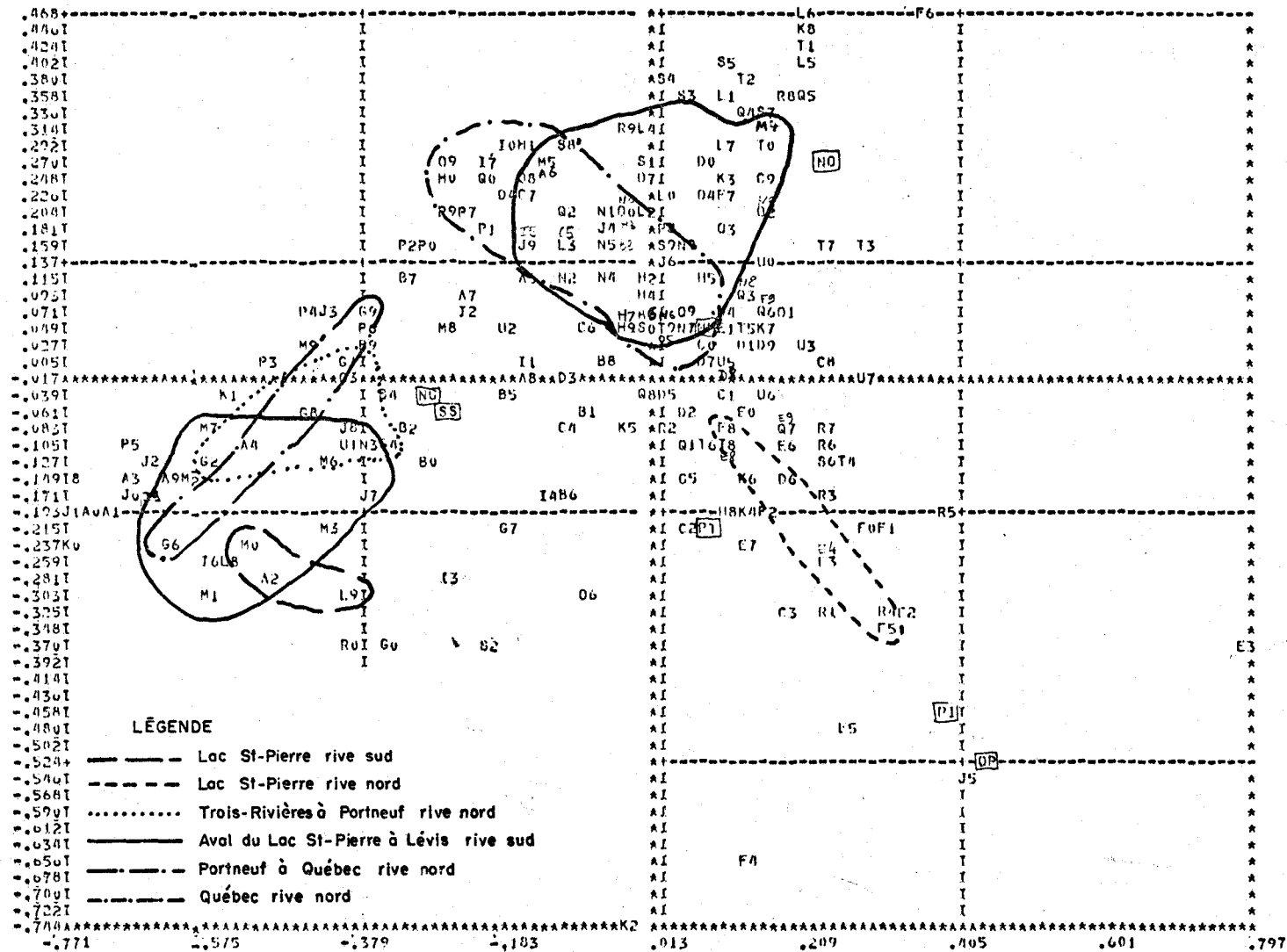


Fig. A.7.8. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-Pierre et Québec (juillet 1975).

AXI DES X = 1 (60,462)

AXF DES Y = 2 (20,302)

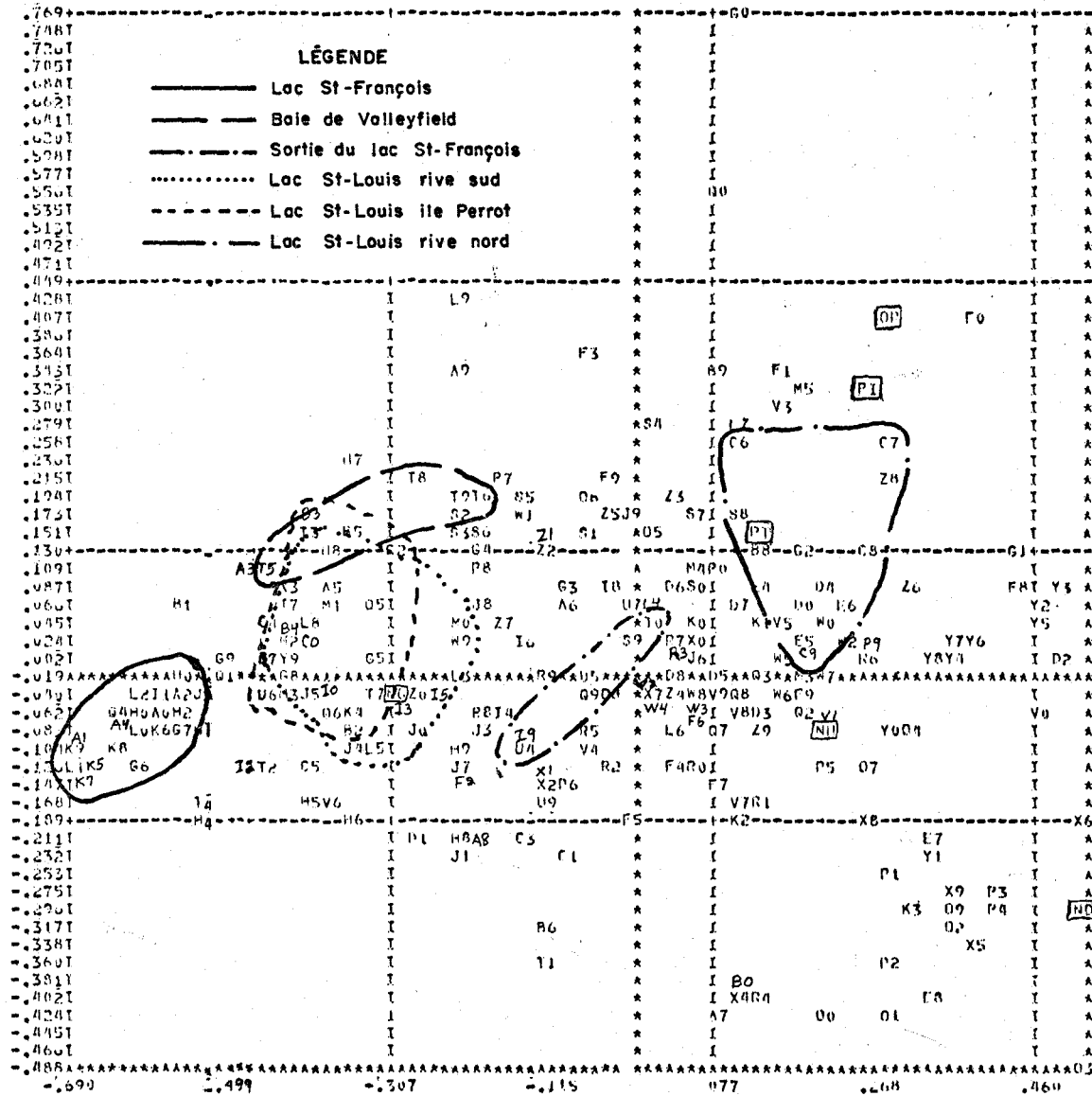


Fig. A.7.9. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis (août 1975).

AXI DES X = 1 (60,462)

AXI DES Y = 2 (20,302)

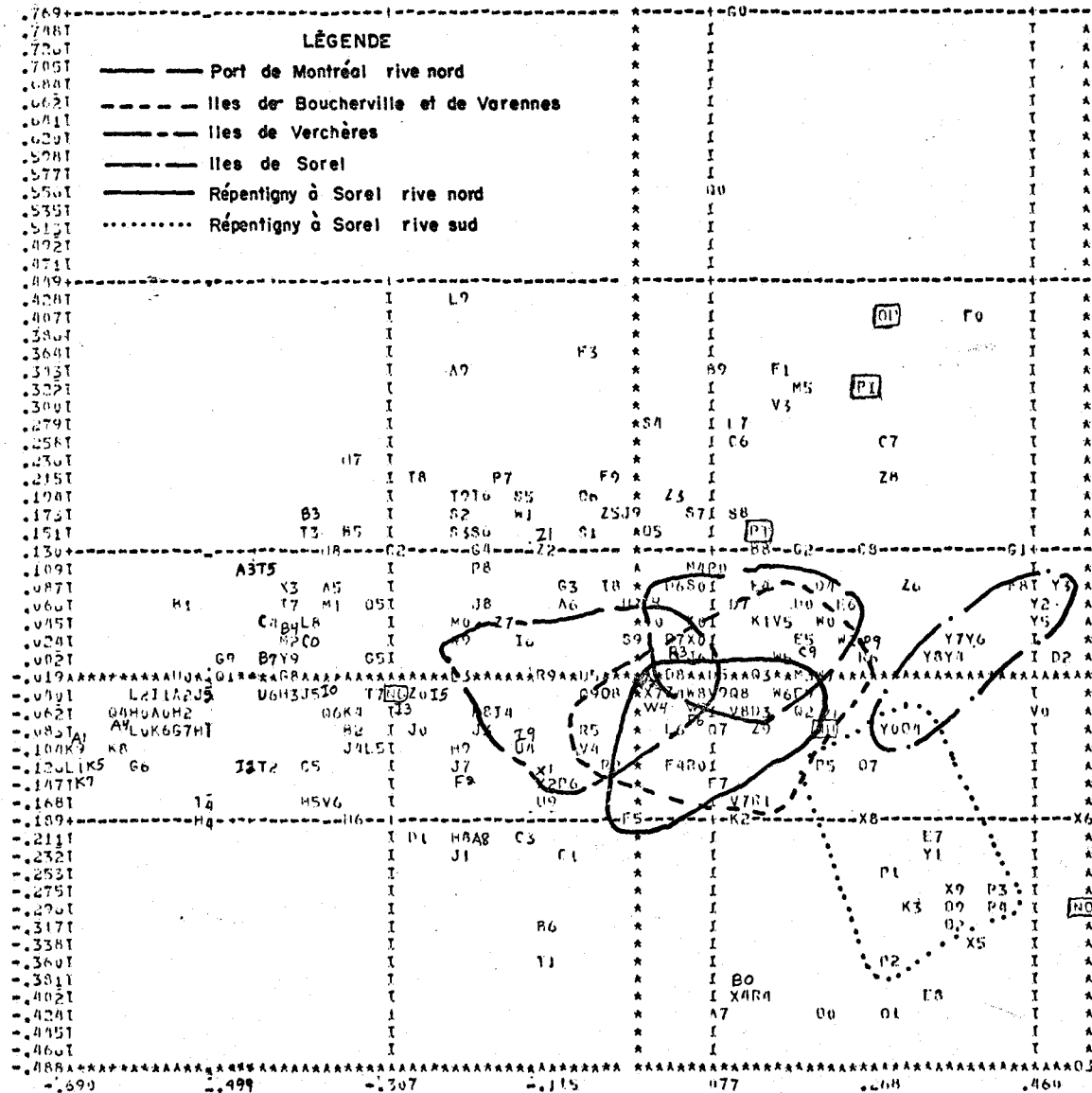


Fig. A.7.10. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le port de Montréal et les îles de Sorel (août 1975).

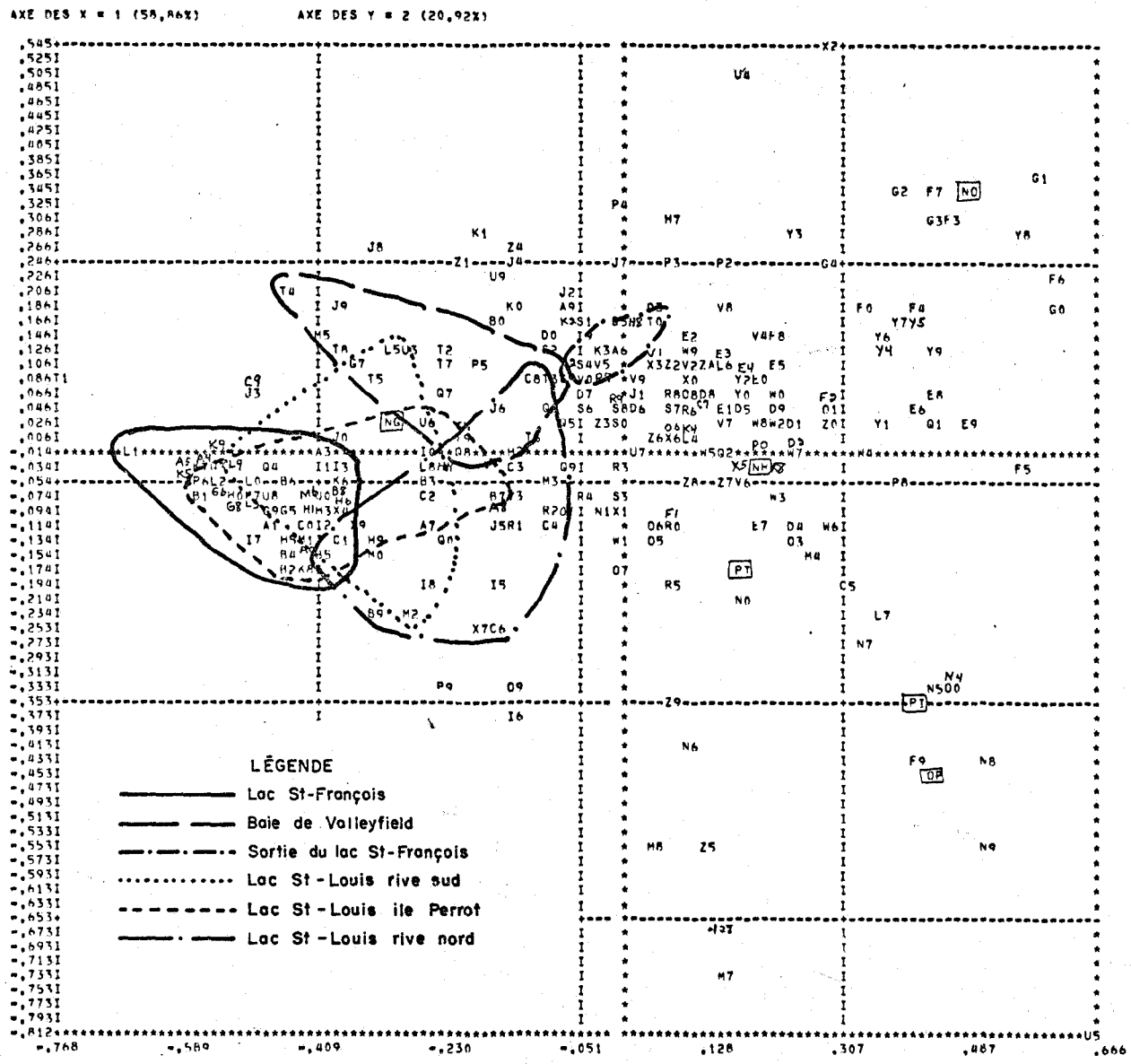


Fig. A.7.12. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis (septembre 1975).

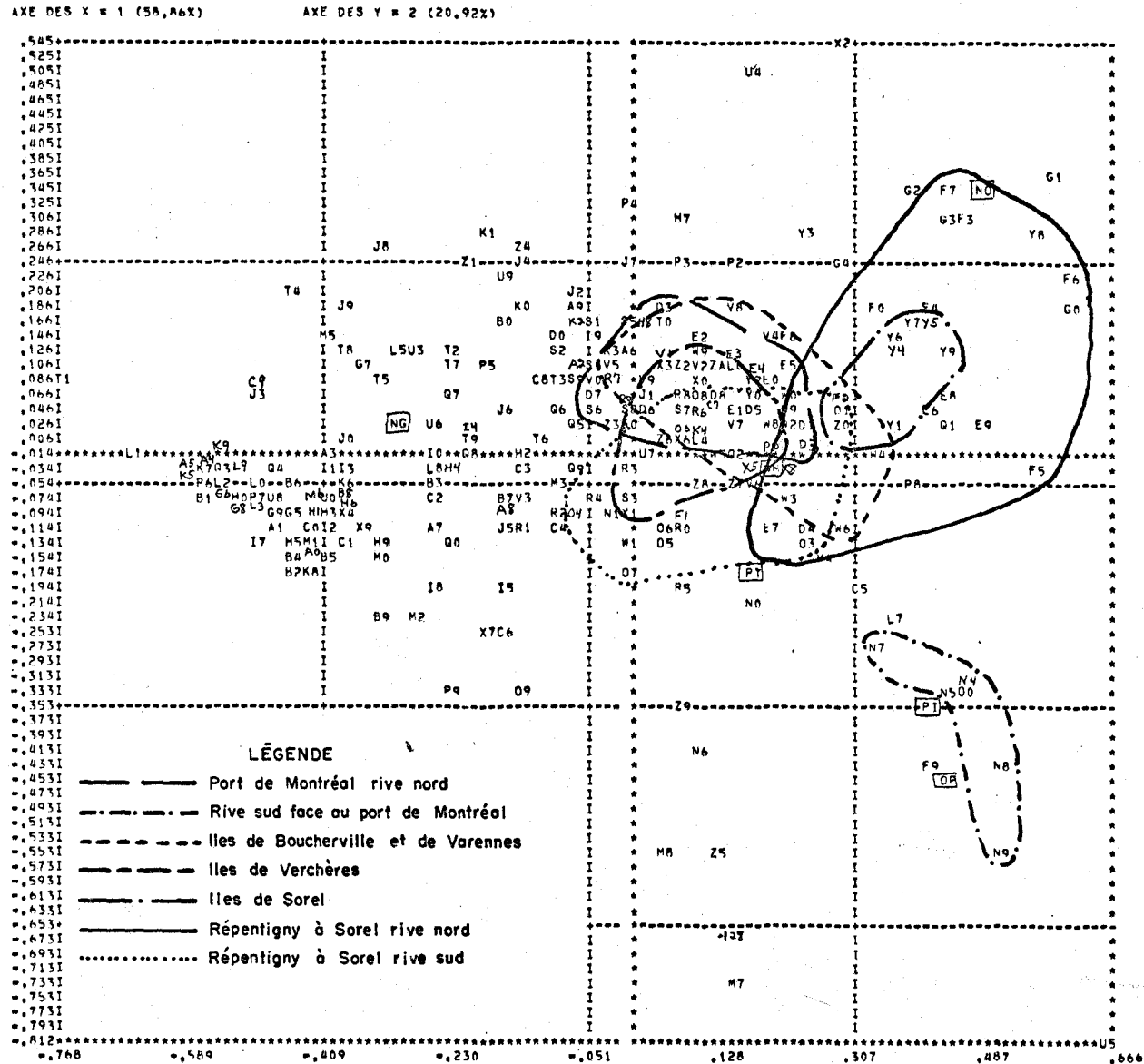


Fig. A.7.13. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le port de Montréal et les îles de Sorel (septembre 1975).

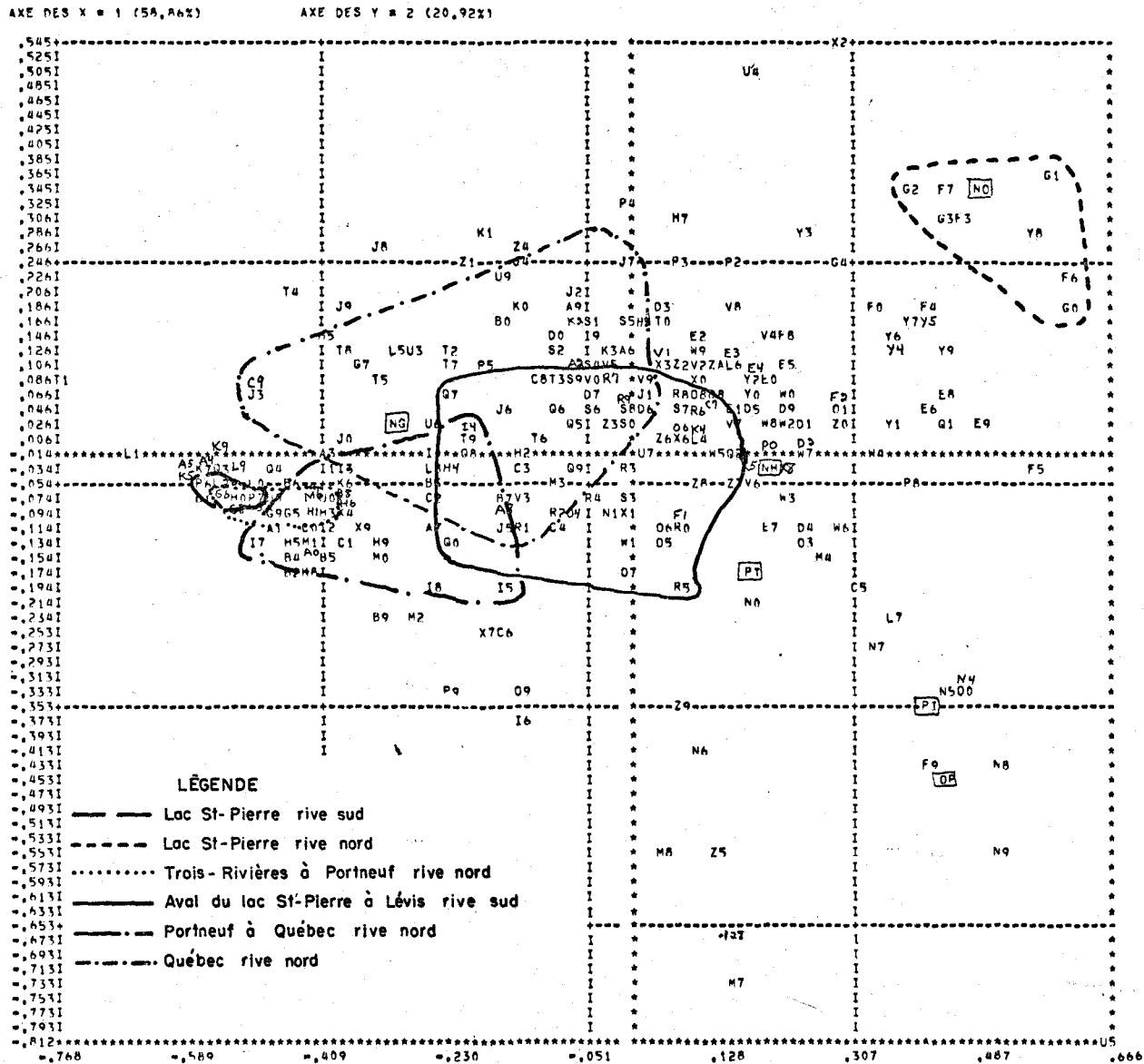


Fig. A.7.14. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-Pierre et Québec (septembre 1975).

AXE DES X = 1 (56,65%)

AXE DES Y = 2 (26,53%)

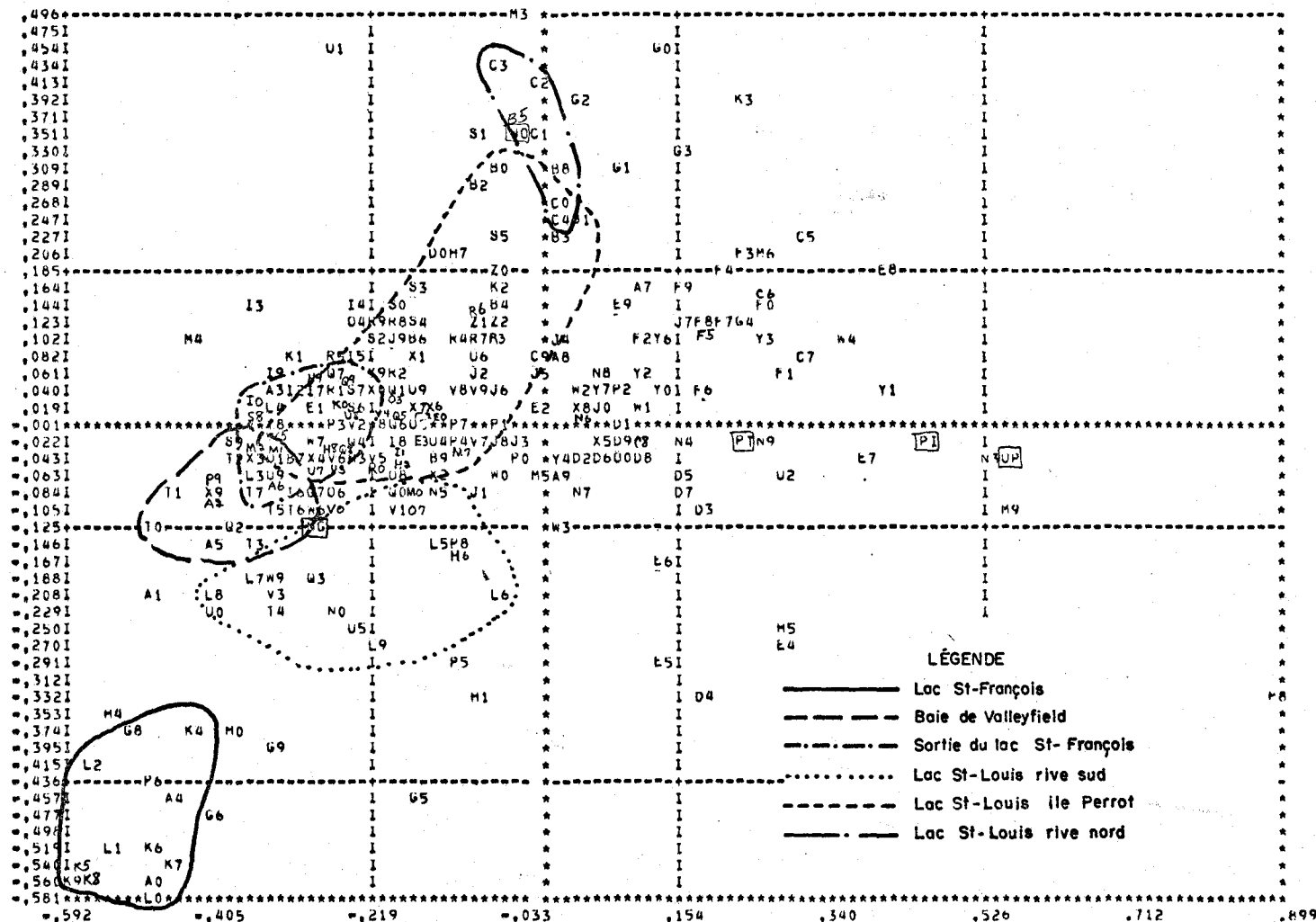


Fig. A.7.15. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-François et le lac Saint-Louis (octobre 1975).

AXE DES X # 1 (56,65X)

AXE DES Y # 2 (26,53X)

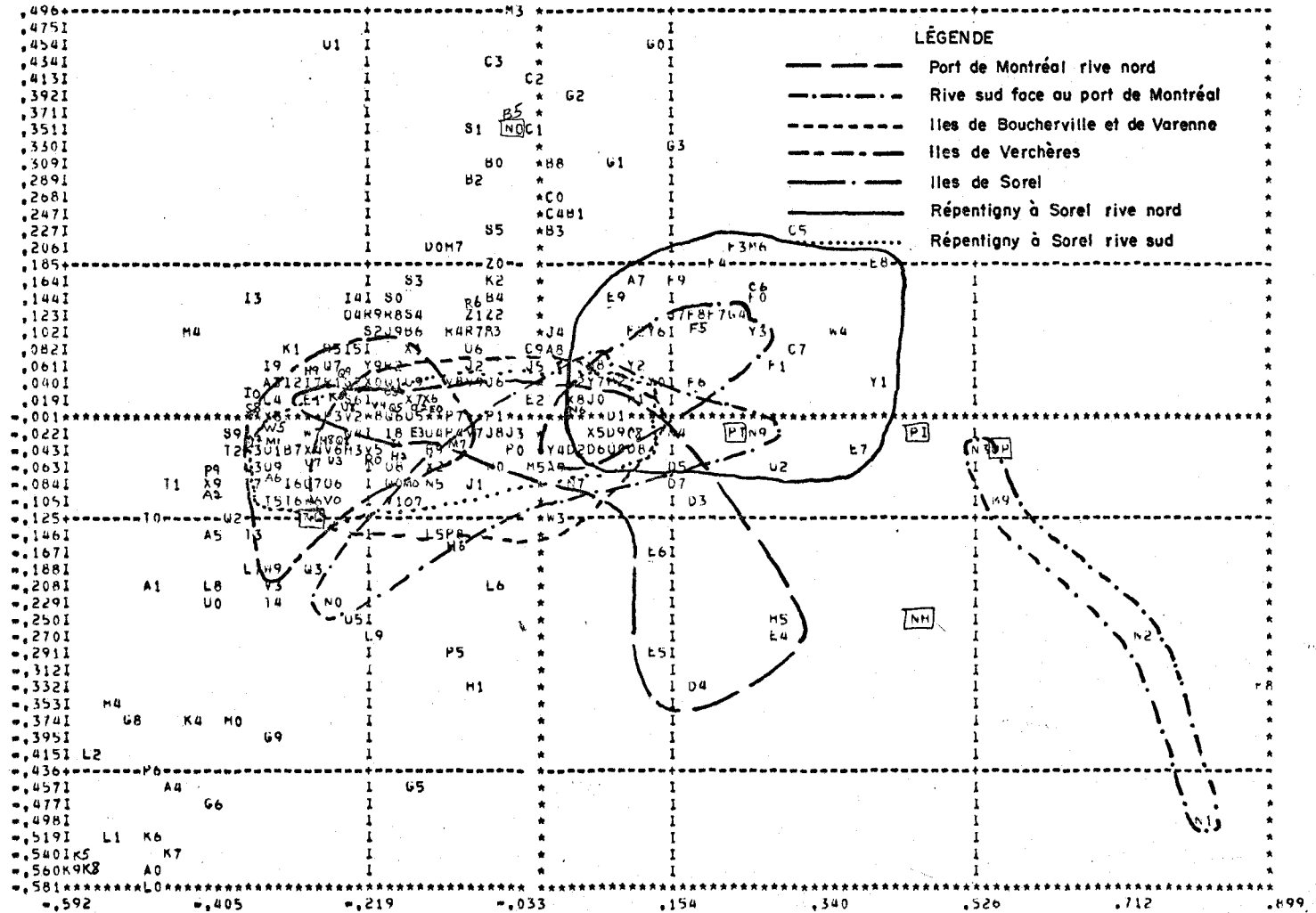


Fig. A.7.16. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le port de Montréal et les îles de Sorel (octobre 1975).

AXE DES X = 1 (56,65%)

AXE DES Y = 2 (26,53%)

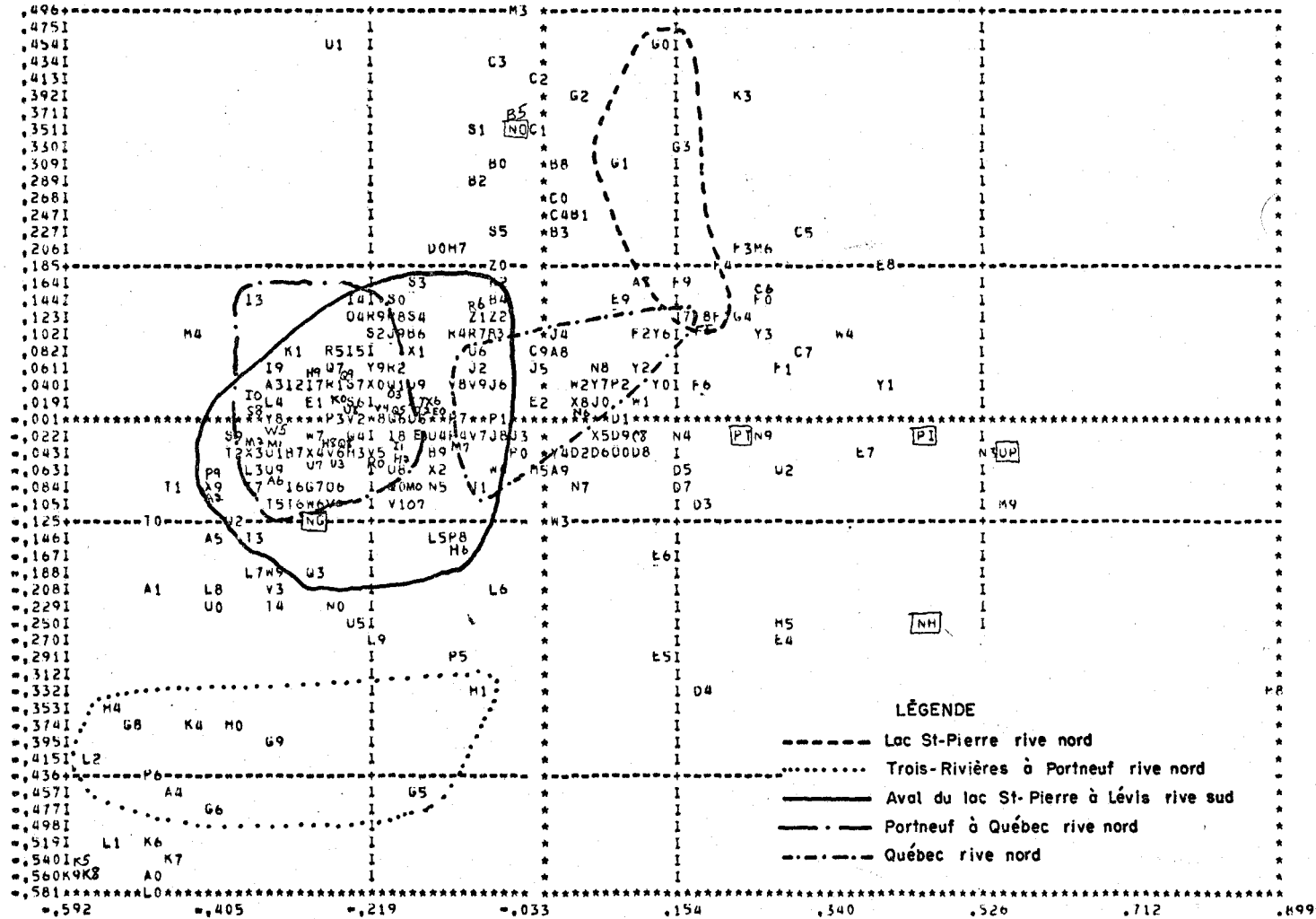


Fig. A.7.17. Représentation des stations sur les axes principaux d'inertie et délimitation de zones homogènes dans la région comprise entre le lac Saint-Pierre et Québec (octobre 1975).