

Record Number: 800
Author, Monographic: Lachance, M.//Morin, G.//Sasseville, J. L.
Author Role:
Title, Monographic: Approche rationnelle à l'étude de la qualité des précipitations sur un bassin
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1977
Original Publication Date:
Volume Identification:
Extent of Work: xi, 118
Packaging Method: pages et 4 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 80
Location/URL:
ISBN: 2-89146-078-2
Notes: Rapport annuel 1977-1978
Abstract: Rapport rédigé pour Environnement Canada
30.00\$
Call Number: R000080
Keywords: rapport/ ok/ dl

INRS-Eau
UNIVERSITE DU QUEBEC
C.P. 7500, Sainte-Foy
Québec G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 80
1977

Rapport rédigé pour
Environnement Canada

Approche rationnelle à l'étude de la qualité
des précipitations sur un bassin

par

M. Lachance, G. Morin, J.L. Sasseville

Approche rationnelle à l'étude de la qualité
des précipitations sur un bassin

par

M. Lachance, G. Morin, J.L. Sasseyville

INRS-Eau
UNIVERSITE DU QUEBEC
C.P. 7500, Sainte-Foy
Québec G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 80
1977

Rapport rédigé pour
Environnement Canada

ISBN 2-89146-078-2
DEPOT LEGAL 1977

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

© 1977 - Institut national de la recherche scientifique

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Environnement Canada pour avoir subventionné cette étude.

Des remerciements sont faits également au Service de la qualité des eaux du ministère des Richesses naturelles pour leur collaboration à l'acquisition des données utilisées.

Enfin, on remercie le service d'édition de l'INRS-Eau spécialement, Messieurs Magella Cantin et André Parent et Mademoiselle Ginette Hudon.

Approche rationnelle à l'étude de la qualité
des précipitations sur un bassin

Résumé

En vue d'évaluer les apports en provenance des précipitations, sur un bassin, un réseau de 20 stations a été installé sur le bassin versant de la rivière Yamaska (4912 km²), et des échantillons mensuels (pluie et neige) ont été recueillis et analysés sur une période de 15 mois entre le 1er août 1974 et le 1er octobre 1975. On a mesuré sur ces échantillons les concentrations en ions majeurs (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄ et H) et en substances nutritives (N-NO₃, N-NH₄, N-organique, P-PO₄, P-hydrolysable, P-total et C-organique). L'étude poursuivie vise à évaluer et à exploiter l'information fournie par ce réseau en vue de transposer ou d'étendre ce réseau à d'autres régions. L'étude de la variabilité temporelle de l'ensemble des paramètres au moyen des composantes principales a fait ressortir l'importance des influences régionales (poussières, contamination) dans les concentrations en sodium et en chlorures durant la période hivernale, et en potassium, azote organique et phosphore (P-PO₄, P-hydrolysable et P-total) durant la période estivale. Les sulfates, les nitrates et le pH sont les paramètres considérés dans l'étude de la variabilité spatiale en raison de l'intérêt et de la qualité de l'information fournie par ces paramètres. L'étude de la variabilité spatiale de ces trois paramètres a permis de délimiter sur le bassin des régions correspondant à des groupes de stations de variation identique. La configuration spatiale observée sur le

bassin avec les sulfates et le pH a fait ressortir, à proximité des centres urbains, une influence des émanations urbaines sur l'augmentation du pH des précipitations. On a observé également au moyen de la technique d'interpolation optimum des erreurs d'estimation des concentrations moyennes en sulfates et en nitrates (20 à 30%) ainsi qu'en ions hydrogène (50-100%).

Mots-clé:

précipitation, chimie, réseau, composantes principales, interpolation optimum, rationalisation, pH, sulfates, nitrates

Référence:

Lachance, M., Morin, G. et Sasseville, J.L. (1977).

"Approche rationnelle à l'étude de la qualité des précipitations sur un bassin". INRS-Eau, *rapport scientifique* no 80, 118 p., 4 annexes. (Rapport soumis à Environnement Canada).

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
REMERCIEMENTS.....	i
RESUME.....	iii
TABLE DES MATIERES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 - PROBLEMATIQUE DE LA RATIONALISATION.....	7
1.1 Une approche rationnelle à l'étude des eaux atmosphé- riques.....	10
1.2 Informations préalables au traitement des données.....	14
1.2.1 Nitrates.....	16
1.2.2 Sulfates.....	20
1.2.3 pH.....	23
CHAPITRE 2 - SOMMAIRE DES DONNEES UTILISEES.....	29
2.1 Moyenne des paramètres physico-chimiques à chaque sta- tion.....	31
2.2 Précision des valeurs moyennes des paramètres physico- chimiques à chaque station.....	36
CHAPITRE 3 - ANALYSE DE L'EVOLUTION DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE DE LA QUALITE DES PRECIPITATIONS.....	43
3.1 Interrelations des paramètres.....	45

3.2	Variabilité temporelle de l'ensemble des paramètres....	50
3.3	Etude du comportement des nitrates, des sulfates et des ions hydrogène.....	53
3.3.1	Nitrates.....	54
3.3.2	Sulfates.....	67
3.3.3	Ions hydrogène.....	77
CHAPITRE 4 - EXEMPLE D'UTILISATION DE L'INTERPOLATION OPTIMUM POUR REPRESENTER LA VARIABILITE SPATIALE ET LES ERREURS D'ESTIMATION.....		89
4.1	Sulfates.....	91
4.2	Nitrates.....	95
4.3	Ions hydrogène.....	99
CONCLUSION GENERALE.....		105
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		115
ANNEXE A - LE PROCESSUS DE GENESE DES APPORTS PAR PRECIPITATIONS HUMIDES OU SECHES.....		A-1
ANNEXE B - DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE PRECIPITATIONS.....		B-1
ANNEXE C - METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES.....		C-1
ANNEXE D - METHODE DE L'INTERPOLATION OPTIMUM.....		D-1

LISTE DES TABLEAUX

		<u>PAGE</u>
Tableau 2.1 :	Concentrations moyennes à chaque station (mg/litre).....	33
Tableau 2.2 :	Valeurs moyennes aux stations exprimées par rap- port à la valeur moyenne la plus faible sur le bassin.....	35
Tableau 2.3 :	Précisions (pourcentages) sur les moyennes calcu- lées à chaque station.....	38
Tableau 2.4 :	Classification des paramètres physico-chimiques en fonction des précisions calculées sur les moyen- nes.....	41
Tableau 3.1 :	Composition des groupes de stations de variation semblable (nitrates).....	58
Tableau 3.2 :	Composition des groupes de stations de comporte- ment semblable dans le temps (nitrates).....	63
Tableau 3.3 :	Composition des groupes de stations de variation semblable (sulfates).....	70
Tableau 3.4 :	Composition des groupes de stations de comporte- ment semblable (sulfates).....	75
Tableau 3.5 :	Composition des groupes de stations de variation semblable (ions hydrogène).....	81
Tableau 3.6 :	Composition des groupes de stations de comporte- ment semblable dans le temps (ions hydrogène)....	85

LISTE DES FIGURES

		<u>PAGE</u>
Figure 1.1.	Evolution dans le temps des concentrations moyennes mensuelles de SO ₄ sur l'ensemble du bassin de la rivière Yamaska au cours de la période 1974-1975 d'après les données de l'annexe B).....	21
Figure 1.2.	Illustration du mécanisme de formation du H ₂ SO ₄ formé à partir du SO ₂ en provenance d'émanations urbaines (selon Brosset, 1973).....	24
Figure 2.1.	Distribution dans l'espace des stations du réseau de collecte des eaux de précipitation.....	32
Figure 3.1.	Représentation des paramètres physico-chimiques sur les trois premiers axes principaux et groupement des paramètres de variation semblable.....	48
Figure 3.2.	Représentation des paramètres (□) et des mois (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des paramètres de variation semblable et des mois de comportement semblable.....	52
Figure 3.3.	Représentation des stations sur les trois premiers axes principaux et groupement des stations de variation semblable (nitrates).....	56
Figure 3.4.	Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de variation semblable (nitrates).	59
Figure 3.5.	Représentation des mois (□) et des stations (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des stations de comportement semblable dans le temps (nitrates).....	62

Figure 3.6.	Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de station de comportement semblable dans le temps (nitrates) et moyennes calculées aux stations (mg N/l).....	65
Figure 3.7.	Représentation des stations sur les trois premiers axes principaux et groupement des stations de variation semblable (sulfates).....	68
Figure 3.8.	Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de variation semblable (sulfates).....	71
Figure 3.9.	Représentation des mois (□) et des stations (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des stations de comportement semblable dans le temps (sulfates).....	74
Figure 3.10.	Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de comportement semblable dans le temps (sulfates) et moyennes calculées aux stations (mg SO ₄ /l).....	78
Figure 3.11.	Représentation des stations sur les trois premiers axes principaux et groupement des stations de variation semblable (ions hydrogène).....	80
Figure 3.12.	Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de variation semblable (ions hydrogène).....	83
Figure 3.13.	Représentation des mois (□) et des stations (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des stations de comportement semblable dans le temps (ions hydrogène).....	84

Figure 3.14.	Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations qui ont un comportement semblable dans le temps (ions hydrogène) et moyennes calculées aux stations (unités de pH).....	87
Figure 4.1.	Fonction de structure dans l'espace pour les sulfates dans les précipitations.....	93
Figure 4.2.	Concentrations moyennes en sulfates (mg SO ₄ /l) observées et calculées par interpolation optimum dans les précipitations sur le bassin de la rivière Yamaska.....	94
Figure 4.3.	Ecart type d'estimation des concentrations moyennes en sulfates (mg SO ₄ /l) déterminé par interpolation optimum sur le bassin de la rivière Yamaska.....	96
Figure 4.4.	Fonction de structure dans l'espace pour les nitrates dans les précipitations.....	97
Figure 4.5.	Concentrations moyennes en nitrates (mg NO ₃ /l), mesurées et calculées par interpolation optimum dans les précipitations sur le bassin de la rivière Yamaska.....	98
Figure 4.6.	Ecart type d'estimation des concentrations moyennes en nitrates (mg NO ₃ /l) déterminé par interpolation optimum sur le bassin de la rivière Yamaska.....	100
Figure 4.7.	Fonction de structure dans l'espace pour les ions hydrogène dans les précipitations.....	101
Figure 4.8.	Concentrations moyennes en ions hydrogènes (µg H/l) mesurées et calculées par interpolation optimum dans les précipitations sur le bassin de la rivière Yamaska.....	102

Figure 4.9. Ecart type d'estimation des concentrations moyennes en ions hydrogène ($\mu\text{g H/l}$) déterminé par interpolation optimum sur le bassin de la rivière Yamaska.....

103

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les diverses substances d'origine naturelle ou en provenance d'activités humaines qui se retrouvent dans les précipitations humides ou sèches jouent un rôle prépondérant, naguère fortement sous-estimé, dans les différents processus bio-géochimiques (minéralisation des eaux lacustres, acidification des sols, enrichissement nutritif des sols, acidification des eaux superficielles, etc...). Les substances entraînées au sol par les précipitations sous forme de pluie ou de neige, sont très diversifiées dans leur structure chimique; on y rencontre des sels dissous, des sels précipités se présentant sous la forme de particules dont les diamètres varient d'une centaine à quelques dix milles angströms, de la matière organique soluble dans l'eau, de la matière organique hydrophobe formant des micromicelles ou adsorbée à des particules d'argiles, des poussières (structure complexe ou simple très faiblement soluble), et, évidemment, des gaz dissous dont certains, tels le CO_2 , le NH_3 et le H_2S , peuvent avoir un effet déterminant sur les réactions chimiques et sur les concentrations de solutés à l'équilibre. La majorité de ces substances sont présentes à l'état de trace dans les eaux atmosphériques; cependant, plusieurs d'entre elles sont présentes à des concentrations aussi et parfois même plus élevées que les concentrations rencontrées en général dans les eaux lacustres ou fluviales.

De nombreuses études sur la composition chimique des précipitations, sur leur rôle dans les processus écologiques ou bio-géologiques

ou encore sur l'effet de certaines de leurs composantes sur la production biologique en milieu aquatique et même sur l'activation de la toxicité de certaines substances ont été réalisées récemment; mentionnons, à titre d'exemple, les importants travaux de Junge (1958; 1963) et de Gorham (1961) sur la chimie des précipitations et sur les apports ioniques qui leur sont associées, ceux de Likens *et al.* (1971; 1972), de Schindler *et al.* (1976) et de Vitousek et Reiners (1975) qui ont porté sur les cycles de substances minérales ou nutritives en forêt, dans le sol et en milieu lacustre, ceux de Wright et Jessing (1976) traitant de l'effet des précipitations acides sur la composition chimique des lacs, ceux de Beamish et Harvey (1972), de Likens *et al.* (1976) et de Schofield (1976) qui ont discuté de l'effet des précipitations acides sur la croissance de poissons dans des lacs suédois ou canadiens, et finalement, ceux de Brouzes *et al.* (1977) qui font ressortir le rôle possible des précipitations acides sur l'accumulation du mercure dans les poissons.

L'étude de la qualité des eaux atmosphériques apparaît donc comme une étape normale dans la recherche de l'amélioration des connaissances sur les processus importants de régulation de la qualité des eaux superficielles et de l'évolution biotique du milieu. C'est dans ce contexte qu'on a vu apparaître de nombreux réseaux d'acquisition de données de la qualité des précipitations, dont celui du ministère des Richesses naturelles, maintenu en opération du mois de juillet 1974 au mois d'octobre 1975 sur le bassin de la rivière Yamaska (Lachance et Sasseville, 1976).

La présente étude vise justement à jeter les bases de la rationalisation nécessaire, soit dans le choix du type de réseau, soit dans l'utilisation des données; pour ce faire, on esquissera d'une part la problématique de la rationalisation et, d'autre part, on recherchera les interrelations entre les valeurs des différents paramètres physico-chimiques obtenus aux stations du réseau d'échantillonnage par l'étude de leur évolution dans le temps et par la détermination de la structure statistique de leur distribution dans l'espace.

CHAPITRE 1

PROBLEMATIQUE DE LA RATIONALISATION

1. PROBLEMATIQUE DE LA RATIONALISATION

Si dans le passé, l'acquisition de connaissances générales sur les attributs des ressources pouvait à elle seule justifier l'élaboration de systèmes complexes d'acquisition de données, il n'est plus possible aujourd'hui d'admettre à priori, que l'ignorance des caractères physiques, chimiques et biologiques d'un système doit nécessairement déboucher sur l'inventaire de ses caractéristiques. En effet, d'une part, les besoins sociaux, en se diversifiant, diminuent considérablement le niveau des ressources humaines et financières immobilisables pendant de longues périodes pour l'étude de problèmes précis et, d'autre part, les phénomènes jouant un rôle important dans l'évolution de l'équilibre géo-biosphérique, nombreux et encore malconnus, nécessitent pour les circonscrire adéquatement un appareillage technique et une logistique de plus en plus sophistiqués et coûteux. Ainsi à chaque jour, le gestionnaire est confronté avec des problèmes de choix au sein d'une multitude de phénomènes qui lui semblent importants d'étudier et de comprendre. Lorsque l'étude de certains de ces phénomènes apparaît avantageuse au gestionnaire à cause des retombées importantes à court terme, celui-ci n'hésitera pas à l'entreprendre au détriment d'efforts de perception plus globale et ceci malgré son importance pour la société toute entière. Une telle situation pourrait se présenter si, par exemple, à cause des moyens limités mis à sa disposition, le gestionnaire devait choisir entre, d'un côté, l'étude des dérèglements climatiques observés depuis 1971 (Schneider, 1976) et qui présagent de modifications profondes dans le climat pouvant

avoir des répercussions considérables sur le mode de vie des canadiens, et de l'autre côté, l'étude des causes et des conséquences de l'acidification croissante des eaux atmosphériques qui, on le reconnaît maintenant, entraînent des perturbations importantes dans le métabolisme des sols acides et des eaux faiblement minéralisées.

Le problème de la rationalisation de l'acquisition des données ne se pose donc pas uniquement dans l'opérationnalisation d'un réseau permettant l'acquisition des connaissances; il se manifeste d'abord au niveau du choix des systèmes à étudier puis, par la suite, il se pose en termes de compatibilité entre le système d'acquisition de données et le système dont on veut comprendre la dynamique.

1.1 Une approche rationnelle à l'étude des eaux atmosphériques

Bien que l'établissement et l'opérationnalisation d'un réseau d'acquisition de données de qualité des eaux fluviales et lacustres soient actuellement considérés comme une nécessité absolue¹ dans la gestion des activités de l'homme, l'utilisation actuelle et envisagée des données obtenues ne semble pas confirmer l'importance de telles opérations.

Contrairement à ce qui avait été pressenti, les usagers des données sont peu nombreux et parmi ceux-ci, rares sont ceux en mesure

¹ "nécessité absolue" est utilisée ici dans le sens d'un besoin pressenti tellement évident qu'il n'est pas nécessaire de l'analyser et de le pondérer par rapport à d'autres types d'activités de gestion.

d'exploiter à fond l'information apportée par l'ensemble des données. C'est en partie dû à cette situation que le principe de l'opération en continu de réseaux d'acquisition de données de qualité est remis en question dans certains milieux scientifiques et technocratiques. D'une part, en effet, il n'est pas possible économiquement de maintenir en opération, dans un territoire vaste et peu peuplé, un réseau axé sur l'acquisition de connaissances générales qui soit suffisamment sophistiqué pour améliorer la compréhension actuelle des processus physiques, chimiques et biologiques se déroulant dans les rivières et dans les lacs; d'autre part, les connaissances de type "inventaire de la qualité de la ressource" acquises par de tels réseaux sont tellement fragmentaires que, généralement, on a recours à des interventions particulières pour des décisions importantes concernant l'usage du territoire ou l'exploitation des ressources.

La faible rentabilité réelle des réseaux d'acquisition de données opérés en continu et les coûts énormes rattachés à leur exploitation remettent en question la rationalité du choix de consolider pour l'avenir des réseaux d'acquisition de données qui n'ont d'autre fin que celle de déterminer certains grands caractères du comportement physico-chimique des eaux naturelles et de tenir à jour un système d'évaluation sommaire de la qualité générale des eaux.

Les réseaux d'acquisition de données à objectifs précis

La faillite relative de la philosophie des réseaux d'acquisition

de connaissances générales non intégrables en processus (connaissance de type inventaire de la qualité), difficilement exploitables et mal adaptées aux nécessités réelles de la gestion du milieu est surtout due à la tendance généralisée de minimiser les délais dans les décisions relatives à la gestion du territoire. C'est ainsi que le gestionnaire espérait, par la connaissance élargie des caractéristiques de la ressource, être en mesure de répondre rapidement aux exigences techniques et scientifiques soulevées par l'augmentation croissante des activités urbaines, industrielles, agricoles ou récréatives; les réseaux d'acquisition de données élaborés alors, dont certains ont été consolidés depuis, n'ont certes pas contribué à diminuer les délais dans l'acquisition des connaissances pertinentes aux problèmes qu'il fallait résoudre.

Progressivement, on en est venu à introduire de nombreux réseaux d'acquisition de données, généralement, de taille réduite, et opérant de façon limitée dans le temps; ces réseaux élaborés dans le cadre d'études spéciales sur le territoire, étaient beaucoup mieux adaptés aux situations et suffisaient aux exigences des problématiques que l'on tentait de circonscrire. Dans plusieurs cas, on a constaté que les connaissances acquises sur les processus étaient transposables d'un bassin à un autre et qu'il suffisait de quelques données supplémentaires pour affiner la perception du phénomène et pour l'adapter aux conditions environnementales différentes rencontrées quand on passe d'une région bio-géographique à une autre.

Ainsi, l'établissement et l'opération d'un réseau d'acquisition de données de la qualité de l'eau, devraient être subordonnés à un ensemble d'objectifs spécifiques qui détermineront la densité des stations d'observation (ou de prises d'information), le mode et la fréquence de l'échantillonnage, les attributs de la ressource à caractériser, la durée dans le temps et l'étendue dans l'espace du réseau d'acquisition, le type d'interprétation des données et, finalement, l'intégration de tout ce processus à une problématique plus globale de gestion des ressources.

Un réseau d'acquisition de données en vue d'étudier la qualité des précipitations

Un réseau d'acquisition de données de qualité constitue en soi un "système d'acquisition" dont l'ensemble des éléments sont organisés dans le temps et dans l'espace en vue d'intégrer les données acquises de façon à comprendre un ou plusieurs phénomènes interdépendants. Dans un tel contexte, un réseau d'acquisition de données de la qualité des eaux atmosphériques est un sous-système d'un plus vaste réseau (hypothétique ou réel) dont la finalité est l'analyse et la compréhension des mécanismes de l'évolution de la qualité de l'eau dans le cycle hydrologique. Ainsi, par exemple, viser à caractériser la qualité des précipitations en plusieurs points sur un bassin et suivre dans le temps son évolution n'ont qu'une portée limitée et le développement d'un réseau limité à ces seuls objectifs relève d'une philosophie caduque.

Dans ce contexte, un réseau d'acquisition de données de qualité

des précipitations, pour être en mesure d'évaluer le rôle des eaux atmosphériques dans les processus de régulation de la qualité des eaux de surface, devrait normalement se raccrocher à un réseau de stations d'échantillonnage des eaux de surface et des eaux souterraines. La rationalisation du réseau d'observations devient donc subordonnée à une rationalisation plus globale qui touchera les aspects multiples de la problématique hydrologique d'un bassin. Cet effort de rationalisation déborde largement le cadre de la présente étude; elle se limite en effet à l'analyse de certains caractères du comportement de la qualité des eaux de précipitations dans le temps et dans l'espace. Il demeure néanmoins que ces connaissances partielles des processus seront à la base de l'effort de rationalisation plus globale; c'est précisément de cet aspect de la problématique que nous allons traiter dans les pages qui suivent.

1.2 Informations préalables au traitement des données

Le traitement de l'information obtenue d'un réseau d'acquisition de données de qualité des eaux de précipitation devrait normalement se réaliser dans un cadre bien défini et ceci sous l'éclairage des connaissances déjà établies sur l'évolution du chimisme des précipitations. Ainsi, une toute première étape du processus global de la rationalisation d'un tel réseau réside dans l'analyse de l'évolution dans le temps et dans l'espace de la valeur des paramètres physico-chimiques

caractéristiques. Cependant, les paramètres physico-chimiques déterminés sont nombreux (22 dans le cas du réseau du bassin de la Yamaska) et les techniques d'analyses diversifiées.

On comprend aisément qu'un traitement sans discernement de l'information serait fastidieux et certes sans grande résolution phénoménologique; il convient donc de réduire au maximum le nombre de paramètres qui seront retenus de façon à qu'il soit possible de les analyser un à un et d'en dégager certaines caractéristiques de leur évolution dans l'espace et dans le temps. Le choix des paramètres, bien que quelque peu arbitraire à ce stade de l'étude, peut s'appuyer sur les caractéristiques suivantes:

- les paramètres retenus auront un rôle important dans le chimisme des eaux de précipitation ou dans les processus de régulation bio-géo-chimique;
- la valeur des paramètres retenus aura été significativement évaluée au cours de la période durant laquelle auront été obtenues les données;
- les paramètres retenus manifesteront des tendances particulières dans le temps, dans l'espace ou les deux à la fois au cours de la période d'observation.

Quant aux techniques d'analyse, elles devront permettre de dégager une perception globale (haute perspective - basse résolution) en plus de détecter des tendances structurelles dans le temps et

l'espace ainsi que les similarités de comportement entre différentes stations sur le bassin.

Dans ce contexte et en guise d'approche préliminaire au développement d'un cadre de rationalisation, on a considéré de façon sommaire l'ensemble des paramètres physico-chimiques mesurés et on a étudié d'un façon plus détaillée les concentrations de nitrate (N-NO₃) de sulfate (SO₄) et d'ions hydrogène (pH). C'est pourquoi on tentera dans le sous-chapitre suivant, de faire le point sur les connaissances actuelles du comportement de ces paramètres qui apparaissent comme un préambule au traitement statistique des données. A l'annexe A, on brosse un tableau du processus de genèse de l'ensemble des apports par les précipitations.

1.2.1 Nitrates

L'azote dans les précipitations humides est analysée depuis plus d'une centaine d'années: Eriksson (1952) rapporte des concentrations de nitrate déterminées entre 1864 et 1877 dans plusieurs pays tels l'Allemagne, l'Autriche, la France, la Grande-Bretagne et la Suisse, s'étalant de 0.16 à 1.76 mg N/l pour des charges équivalentes de 0.6 à 8 kg N/ha-an. Ce domaine de concentrations se compare bien avec celui rapporté par Lachance et Sasseville (1976) pour plusieurs régions aux

Etats-Unis et au Canada; au cours des 25 dernières années, on situe les concentrations représentatives extrêmes à 0.08 et à 1.53 mg N/l respectivement. Pour l'ensemble du territoire américain, Junge (1958) rapporte des concentrations variant entre 0.04 et 1.8 mg N/l¹, avec des fluctuations considérables dans le temps et dans l'espace quelque peu similaires à celles qui ont été observées pour l'azote ammoniacal (N-NH₄). Plus récemment, Uttomark *et al.* (1974), ont colligé via les précipitations humides calculées à partir de données obtenues pour différentes régions réparties sur le territoire des Etats-Unis depuis 1920; les charges en nitrate tabulées sont très variables d'un site à l'autre et d'un auteur à l'autre: les auteurs rapportent au Kentucky des charges de 0.8 kg N/ha-an qui peuvent atteindre 20 kg N/ha-an en Ohio, tandis que pour le bassin de la Yamaska, Lachance et Sasseville (1976) situent la charge à environ 5.9 kg N/ha-an.

Les variations dans le temps et dans l'espace des concentrations de nitrate sont généralement importantes, et ceci même au sein d'une même région. Shiomi et Kuntz (1973) ont observé de grandes variations dans la région du lac Ontario, confirmant ainsi les travaux de Fisher *et al.* (1968) qui ont mesuré un écart de 0.7 à 1.4 mg N/l sur une année pour un groupe de stations situées dans le New-Hampshire; Shiomi et Kuntz (1973) ont en outre constaté que les concentrations les plus élevées en nitrate étaient associées aux activités humaines tout comme

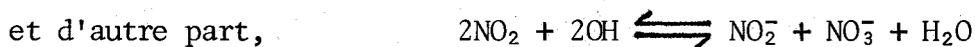
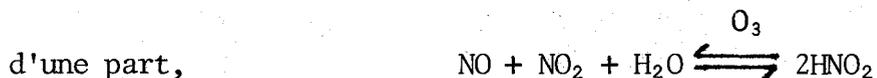
¹ Ces concentrations ont été déterminées sur des échantillons en provenance d'un réseau de collecte de précipitations, comportant 60 stations réparties sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis, et opérées sur une période s'étalant de juillet 1955 à juillet 1956.

l'avait déjà fait remarquer Vollenweider (1968).

Lachance et Sasseville (1976) ont observé sur le bassin de la Yamaska des fluctuations encore plus grandes de la concentration moyenne mensuelle évaluée sur l'ensemble du bassin: elle varie en effet de 0.31 mg N/l pour le mois de septembre 1975 à 1.14 mg N/l pour le mois de janvier 1974. Les concentrations moyennes calculées à chaque station pour une durée d'observation mensuelle de 15 mois à 19 stations différentes sur le bassin sont, de leur côté, beaucoup moins variables: elles varient de 0.42 à 0.66 mg N/l sans tendance particulière apparente, les concentrations les plus élevées n'étant pas nécessairement associées aux densités de populations les plus grandes sur le bassin. Lachance et Sasseville (1976) ne confirmaient pas ainsi les propos de Shiomi et Kuntz (1973), du moins pour le bassin de la Yamaska et pour une période d'observation de 15 mois.

Cependant, pour ces 15 mois d'observation, les concentrations de nitrate dans les retombées humides et sèches (collecteurs de précipitations ouverts en continu) semblent beaucoup plus élevées aux mois de décembre, janvier (concentration maximale), février, mars, avril qu'aux mois de mai, juin, juillet, août et septembre (concentration minimale); les concentrations de nitrate étant plus élevées en hiver qu'en été, il apparaît que, globalement sur le bassin, la combustion d'huile à chauffage puisse être une source importante d'azote dans les

précipitations. Ces résultats n'ont rien de surprenant si l'on considère qu'aux Etats-Unis seulement, on estime à environ 20 millions de tonnes métriques les émissions annuelles d'oxyde d'azote en provenance de la combustion (exprimées en NO_2); Reiter et Reiter (1961), dans une étude sur les relations entre les contenus en NO_3 et NO_2 des précipitations faites dans le cadre du débat fameux sur l'origine du nitrate dans l'atmosphère (Viemeister, 1960; Junge, 1963), ont proposé, à titre d'hypothèse, le système d'équations suivant:



formant des acides nitreux qui se décomposent facilement en présence de chaleur: $3 \text{HNO}_2 \rightleftharpoons \text{HNO}_3 + 2\text{NO} + \text{H}_2\text{O}$. Si ces réactions sont possibles, on doit s'attendre à ce qu'éventuellement une partie des oxydes d'azote produits lors de la combustion, se retrouve sous forme de NO_3^- dans les précipitations humides et sous forme d'un sel soluble dans les retombées sèches.

D'une façon générale, d'après les travaux d'Uttomark, *et al.* (1974), les activités agricoles, urbaines et industrielles auraient une importante contribution à la charge d'azote des précipitations.

1.2.2 Sulfates

Si les apports en nitrate dans les précipitations prennent une importance particulière à cause de leur rôle dans la production biologique terrestre (Vitousek et Reiners, 1975) et aquatique (Likens, *et al.*, 1971; Shiomi et Kuntz, 1973; Vollenweider, 1968), les apports en sulfate sont généralement étudiés parce qu'ils témoignent de l'intensité de l'utilisation de l'énergie fossile ou de la production de SO₂¹ et que ces activités semblent jouer un rôle important dans le phénomène d'acidification des eaux atmosphériques.

Les concentrations de sulfate dans les précipitations humides varient de 1 à 10 mg/l tandis qu'elles se situeraient à environ 1 ou 2 mg/l au-dessus de l'océan (Junge, 1964). La concentration moyenne de sulfate observée sur le bassin de la Yamaska (la moyenne sur 15 mois des moyennes calculées pour l'ensemble du bassin) est de 4.6 mg/l (calculée avec les données de l'annexe B). La plus faible moyenne observée sur 15 mois, à une station, est de 3.5 mg/l tandis que la plus élevée est de 6.2 mg/l; la plus faible moyenne a été observée dans une région où l'activité humaine est faible tandis que la plus élevée a été observée à une station urbaine. L'évolution dans le temps des moyennes mensuelles sur le bassin, représentée à la figure 1.1, ne semble pas suivre de tendance particulière au cours de la période d'observation de 15 mois, la concentration la plus élevée (7.4 mg/l) étant observée au mois d'octobre 1974 et la plus faible (2.1 mg/l) au mois de septembre 1975.

¹ Le SO₂ est aussi un gaz toxique dont l'effet se fait particulièrement sentir sur la végétation par l'inactivation de la photosynthèse; ainsi par exemple les lichens, très sensibles au SO₂, sont disparus des régions urbaines (Sundström et Hällgren, 1973).

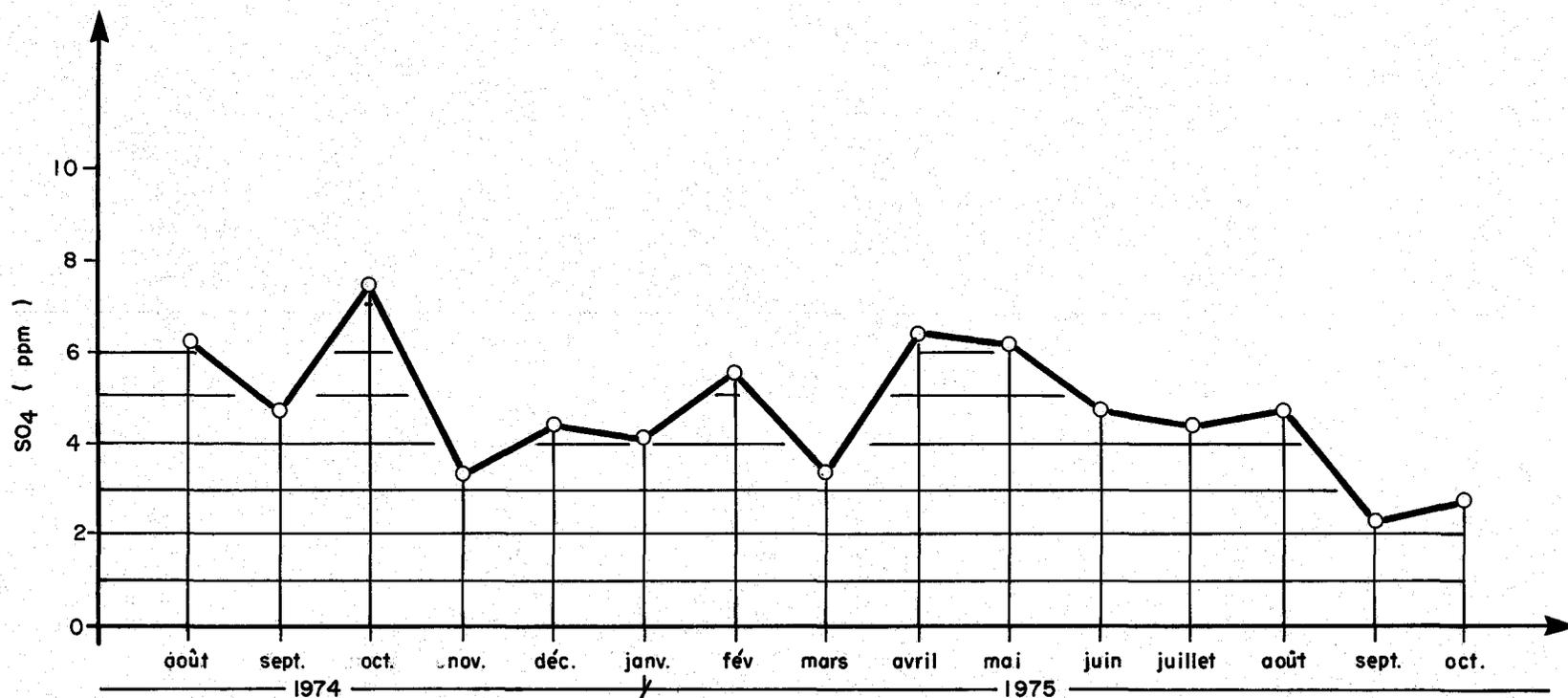


Figure 1.1. Evolution dans le temps des concentrations moyennes mensuelles de SO_4 sur l'ensemble du bassin de la rivière Yamaska au cours de la période 1974-1975 (d'après les données de l'annexe B).

On admet généralement que les sulfates présents dans les eaux atmosphériques au-dessus du continent proviennent en bonne partie de l'oxydation du SO_2 émis à proximité ou à longue distance selon les conditions météorologiques qui prévalent, tandis qu'une proportion variable selon le type de sol et la saison, proviendrait de poussière ou particules soulevés par le vent et qu'une proportion plus faible serait attribuable aux aérosols marins. L'évolution dans le temps des concentrations en sulfate (figure 1.1) pour l'ensemble du bassin de la Yamaska ne permet pas de trancher facilement entre ces contributions relatives; en effet, si la majorité des SO_4^- présents dans l'atmosphère était d'origine gazeuse (SO_2), on aurait dû observer des concentrations plus élevées sur le bassin au moment où la combustion d'énergie fossile était la plus intense. Comme ce n'est pas le cas, du moins à ce stade préliminaire de l'analyse des données de l'annexe B, il faut admettre que, d'une part, les contributions locales sont importantes et que d'autre part, les conditions météorologiques régionales et continentales peuvent jouer un rôle déterminant dans le transport à courte et à longue portée du SO_2 ou du SO_4^- engendré par l'oxydation du SO_2 et conséquemment sur les mécanismes de déposition au sol.

A ce sujet Högström (1973; 1974), rapportant les résultats d'une étude sur le temps de résidence du SO_2 dans l'atmosphère et sur la formation de SO_4 , conclut que les retombées humides (pluie ou neige) des polluants sulfurés (SO_2 en particulier) engendrés par des activités

urbaines¹ ont une portée de 50 à 100 km, ce qui correspond à un temps de résidence dans l'atmosphère de 1 à 2 hres environ; le SO₂ qui émane de la ville est rapidement oxydé de sorte que la majorité du soufre est déposé sous forme de sulfate (figure 1.2).

Toutefois, il est plausible, et plusieurs travaux le suggèrent (Anonyme, 1973; Ostergaard, 1974), que la portée du SO₂ et son effet sur l'acidification des eaux atmosphériques se fassent sentir sur des distances bien plus considérables. Récemment, on a mis en évidence que le pH des eaux atmosphériques de la péninsule scandinave, dont la trajectoire passait au-dessus de l'Europe centrale, était plus acide (pH ~ 5.1 - 6.6) que celui des eaux atmosphériques en provenance du nord ouest.

1.2.3 pH

Les premiers efforts systématiques pour étudier le pH des précipitations ont été réalisés en Suède au cours des années 1950; Barret et Brodin (1955), en interprétant des données obtenues à l'aide d'un réseau de 19 stations dispersées sur le territoire suédois, ont pu identifier plusieurs zones dont certaines situées à l'extrémité sud de la péninsule étaient caractérisées par des précipitations acides (pH moyen annuel ≈ 4.6 - 4.7) tandis que dans la région nord-est, le pH des précipitations était nettement plus élevé (pH ≈ 5.6 - 5.7). A cette époque, on soupçonnait déjà l'implication des activités urbaines et industrielles de l'Europe centrale dans le phénomène de l'acidification des eaux atmosphériques

¹ La ville d'Upsala en Suède qui a servi à l'étude a une population de 100,000 habitants.

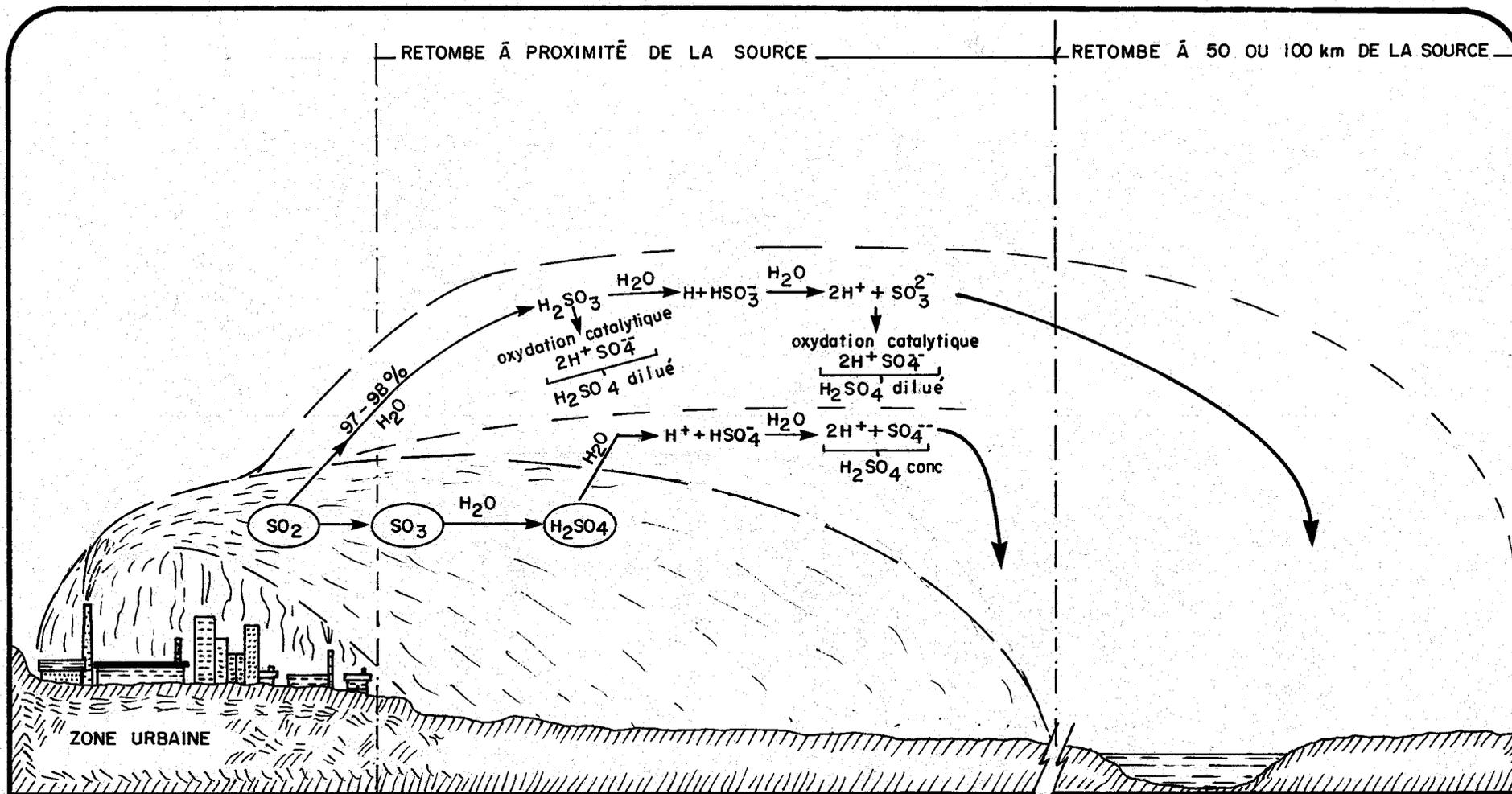


Figure 1.2. Illustration du mécanisme de formation du H₂SO₄ à partir du SO₂ en provenance d'émanations urbaines (selon Brosset, 1973).

et, depuis, le problème n'a cessé de s'accroître en Europe et probablement aussi en Amérique (Likens *et al.*, 1972; Likens, 1976).

Les préoccupations croissantes concernant l'acidification des eaux atmosphériques sont certes justifiées. Wood et Bormann (1974) ont observé un effet marqué sur la croissance et la reproduction de bouleaux jeunes soumis à des vaporisations d'eau contenant de l'acide sulfurique; bien que ces effets aient été obtenus avec des vaporisations d'eau d'un pH \approx 2.3, des dommages apparents aux feuilles observés à un pH \approx 3 laissent entrevoir que pour des expositions longues, la croissance de ces arbres pourrait être ralentie sinon compromise. De même, Abrahamson (1976) a montré que des pluies simulées à pH \approx 3 augmentaient considérablement dans le sol la dissolution du magnésium, du calcium et du manganèse, réduisant ainsi la quantité d'ions disponibles pour le métabolisme végétal et acidifiant le sol à des niveaux qui pourraient compromettre la germination de l'épinette.

On attribue à la décroissance soutenue du pH des eaux atmosphériques, l'acidification des eaux lacustres observée depuis quelques années en Suède (Likens, 1976, Wright et Jessing, 1976; Schofield, 1976; Beamish et Harvey, 1972). Likens (1976) rapporte qu'on estime à environ 10,000 le nombre de lacs suédois qui ont été acidifiés à des pH au-dessous de 6, et 5,000 le nombre dont les eaux ont un pH inférieur à 5; sur la côte-ouest, 50% des lacs ont des pH inférieurs à 6 et on estime que la diminution du pH au cours des 40 dernières années est de l'ordre de

1.8 unités en Ontario, dans la région de la "La Cloche Mountains", Beamish et Harvey (1972) estiment que les émanations de SO₂ des fondries de Sudbury, par leur effet sur les précipitations humides régionales, sont responsables de l'acidification de la majorité des lacs: les eaux de 33 des 150 lacs étudiés, situés à 65 km environ au sud-ouest de Sudbury, présentaient des pH inférieurs à 4.5 et les eaux de 37 lacs étaient d'un pH compris entre 4.5 et 5.5.

L'acidification des eaux fluviales ou lacustres compromet gravement le développement harmonieux des écosystèmes aquatiques; l'acidité de l'eau (pH \approx 4.5), en agissant sur l'équilibre chimique acido-basique des poissons, diminue la capacité osmorégulatrice de l'organisme, entraînant ainsi des conditions physiologiques misérables qui amènent souvent la mort chez les jeunes. Un taux d'extinction rapide des populations piscicoles est observé dans les lacs de Scandinavie et d'Amérique; on associe la disparition complète de certaines populations piscicoles à l'acidification croissante des eaux atmosphériques qui abaisse considérablement le pH des eaux fluviales et lacustres faiblement tamponnées.

Les eaux atmosphériques ont un caractère nettement acide; dans le Nord-est américain on évalue le pH actuel des précipitations à environ 4.0 - 4.2 (Likens, 1976). Selon Whelpdale et Summers (1975), dans une analyse détaillée des valeurs du pH des précipitations qui leur étaient accessibles, une vaste région, formée par le sud de l'Ontario, le sud

du Québec et les provinces de l'Atlantique, reçoit des précipitations modérément acides d'après leur analyse, il appert que dans cette région, les nitrates et sulfates joueraient un rôle significatif dans l'équilibre chimique responsable de l'acidité de l'eau atmosphérique. Sur le bassin de la rivière Yamaska (données à l'annexe B), les précipitations étaient caractérisées par des pH variant entre 3.8 et 7.0 à 19 stations pendant 15 mois d'observation; le pH moyen calculé pour l'ensemble du bassin a varié dans le temps entre 4.16 et 4.83 tandis que la moyenne dans le temps, pour chacune des stations, se situait entre 4.22 et 5.56 indiquant ainsi une forte hétérogénéité spatiale et une homogénéité relative dans le temps. Le pH moyen pour l'ensemble du réseau sur la période de 15 mois d'observation est estimé à 4.5

Récemment, un débat vigoureux s'est engagé sur l'origine du phénomène de l'acidification des eaux atmosphériques (Cogbill et Likens, 1974; Frohlinger et Kane, 1975; Likens, Johnson *et al.* 1976; Galloway, Likens *et al.* 1976; Gatz, 1976; Newman, 1975); il existe de plus en plus d'indices permettant de croire que l'excès en NO_3 et en SO_4 dans les précipitations compensé dans plusieurs cas par l'ion hydrogène engendre une solution dont l'équilibre chimique est caractéristique d'un acide fort.

CHAPITRE 2

SOMMAIRE DES DONNEES UTILISEES

2. SOMMAIRE DES DONNEES UTILISEES

Les données utilisées dans cette ébauche de rationalisation de l'acquisition de données de qualité des précipitations ont été obtenues du Service de la qualité des eaux du ministère des Richesses naturelles du Québec; en effet, ce Service a maintenu en opération pendant 15 mois un réseau relativement dense de stations (1 station pour 260 km² environ) permettant l'échantillonnage de composites mensuels de pluie ou de neige qui, par la suite, ont été analysés pour déterminer une vingtaine de paramètres physico-chimiques. Les techniques d'échantillonnage, les méthodes d'analyse, leur précision et leur limite de sensibilité ont été présentées par Lachance et Sasseville (1976); les données obtenues sont rapportées à l'annexe B du présent rapport tandis que la distribution des stations d'échantillonnage est illustrée à la figure 2.1¹.

2.1 Moyennes des paramètres physico-chimiques à chaque station

Pour les fins de l'analyse, on a éliminé le manganèse, le fer et la silice parce que leurs concentrations dans les précipitations étaient généralement sous les limites de détection des méthodes analytiques utilisées et de ce fait, peu représentatives de l'étendue dans l'espace et dans le temps des phénomènes que l'on tente de circonscrire. Les données brutes (annexe B) ont été regroupées au tableau 2.1 sous la

¹ La station de Bromon a cessé d'être en opération le 1^{er} mai 1975. Les données provenant de cette station n'ont pas été considérées dans cette étude.

TABLEAU 2.1 : Concentrations moyennés à chaque station (mg/litre).

STATIONS	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	Cond. ¹	pH ²	N-NO ₃	N-NH ₄	N _{org.}	P-PO ₄	P _{hydr.}	P _{tot.}	C _{org.}
Bethanie	1.0	.06	.41	.08	4.5	.42	30.5	4.46	.70	.85	.08	.04	.05	.07	3.2
Bonsecours	1.0	.19	.55	.08	4.0	.83	34.0	4.36	.68	.73	.14	.03	.04	.08	3.5
Britt-Mills	1.1	.22	.24	.18	5.0	.52	29.7	4.68	.69	1.23	.28	.08	.09	.12	3.5
Brome	.5	.06	.38	.39	3.6	.42	31.7	4.24	.50	.68	.70	.43	.55	.74	5.0
Farnham	1.1	.06	.45	.18	5.2	.55	31.4	4.81	.72	1.57	.28	.14	.15	.21	5.9
Fleury	1.5	.12	.44	.28	5.6	.60	29.9	4.72	.68	1.02	.32	.22	.22	.29	4.6
Granby	1.9	.08	.35	.25	4.5	.53	31.2	4.55	.66	.57	.43	.22	.24	.27	4.6
Knowlton	2.1	.31	.68	.27	4.1	1.15	38.7	4.40	.56	.36	.07	.07	.05	.09	3.8
Rougemont	1.0	.07	.31	.11	4.3	.44	33.4	4.31	.68	.54	.05	.07	.08	.13	3.4
Roxton Falls	.6	.08	.41	.21	4.6	.48	30.8	4.46	.65	1.04	.18	.26	.28	.38	3.7
St-Guillaume	1.4	.19	.42	.24	4.8	.51	30.3	4.49	.61	.72	.30	.31	.34	.42	4.1
St-Hyacinthe	3.2	.15	.77	1.12	6.4	1.33	49.3	5.16	.62	1.31	1.54	1.06	1.21	1.39	10.2
St-Nazaire	1.4	.08	.22	.17	4.7	.45	30.5	4.45	.75	.75	.09	.10	.11	.17	3.7
St-Valérien	1.4	.13	.83	.39	6.0	1.06	35.7	4.89	.78	1.83	1.81	.45	.48	1.26	5.9
Ste-Rosalie	2.2	.09	.33	.24	4.9	.46	28.7	4.82	.70	.66	.10	.09	.08	.13	3.9
Sutton	.5	.09	.36	.76	4.1	.53	40.9	4.25	.53	1.10	1.52	.91	1.04	1.50	6.6
Upton	3.2	.12	.72	.36	5.9	.64	39.0	5.59	.78	1.25	.22	.25	.26	.37	5.4
Valcourt	.5	.05	.27	.16	3.8	.39	30.9	4.29	.59	.64	.42	.14	.17	.20	3.6
Warden	.6	.05	.57	.09	3.6	.85	32.4	4.25	.55	.54	.05	.03	.04	.08	3.4

¹umhos/cm

²unités de pH

forme des moyennes arithmétiques mensuelles¹ de chacun des paramètres physico-chimiques retenus et pour chacune des dix-neuf (19) stations du réseau d'échantillonnage.

L'importance relative des concentrations moyennes pour chaque paramètre à chacune des stations est présentée au tableau 2.2². Cette variante du tableau 2.1 permet d'évaluer rapidement l'importance des écarts dans les concentrations moyennes. Ainsi par exemple, pour l'azote organique, les concentrations à la station de Saint-Valérien sont 36 fois plus élevées qu'à la station de Rougemont et de Warden tandis qu'il y a 22 fois moins d'ions hydrogène (H⁺), 1.6 fois plus de SO₄ et 2.3 fois plus de NO₃ à la station d'Upton qu'à celle de Warden. Ces variations, dans les concentrations moyennes d'une station à une autre, loin d'être négligeables, témoignent de l'importance des contributions locales au chimisme des eaux de précipitations; en effet, les concentrations faibles en substances diverses et une acidité relativement forte semblent associées à des milieux peu influencés par les activités de l'homme tandis que des concentrations plus élevées sont souvent observées dans des milieux où l'activité urbaine, industrielle et agricole sont plus intenses.

Il est important de remarquer ici que ces tableaux ont été

¹ Théoriquement, il aurait été préférable d'utiliser les moyennes pondérées par les hauteurs de précipitation à chaque station; cependant, compte tenu de l'efficacité variable des capteurs de précipitation et de la complexité inutile dans le traitement statistique des données qu'une telle technique aurait entraîné, on a jugé plus pertinent pour cette étude, d'écarter ce type d'effort davantage académique que révélateur.

² Les valeurs de pH ont été transformées en concentrations d'ions hydrogène.

TABLEAU 2.2 : Valeurs moyennes aux stations exprimées par rapport à la valeur moyenne la plus faible sur le bassin.

STATIONS	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	Cond	H	N-NO ₃	N-NH ₄	N _{org}	P-PO ₄	P _{hydr}	P _{tot}	C _{org}
Béthanie	32	33	92	30	20	50	20	45	33	30	60	30	27	31	34
Bonsecours	50	94	94	32	17	75	19	44	29	32	83	39	53	75	28
Brit-Mills	39	129	93	70	28	63	26	50	28	49	112	81	85	93	26
Brome	38	45	100	94	22	50	25	40	27	47	104	105	111	129	54
Farnham	25	29	88	32	19	45	18	59	27	34	74	49	47	41	55
Fleury	41	37	76	57	25	37	20	47	26	19	132	64	64	57	35
Granby	44	27	68	74	16	52	21	49	28	51	118	134	130	123	43
Knowlton	123	144	106	53	35	91	49	38	27	31	38	74	56	52	36
Rougemont	38	26	83	45	26	55	23	28	25	28	51	68	64	57	46
Roxton-Falls	33	34	85	102	21	62	17	46	27	25	91	144	146	146	42
St-Guillaume	44	106	91	65	22	50	20	48	26	25	132	89	91	86	50
St-Hyacinthe	32	30	60	66	22	57	47	62	26	79	127	107	106	104	51
St-Nazaire	38	19	95	35	21	52	22	37	28	20	78	49	45	58	52
St-Valérien	27	44	90	48	24	71	25	55	25	31	164	66	69	128	44
Ste-Rosalie	26	23	107	57	23	47	18	53	23	21	97	57	67	64	45
Sutton	35	67	93	89	23	41	35	44	31	58	104	122	122	115	56
Upton	25	44	95	85	21	46	21	136	22	34	77	117	125	92	32
Valcourt	17	36	83	116	17	47	20	26	28	20	172	147	146	126	39
Warden	31	31	84	34	19	66	21	29	25	16	39	32	35	47	50

constitués à partir de l'ensemble des données; ainsi, puisqu'aucune présélection de paramètres n'a été effectuée, certaines concentrations moyennes ou rapports élevés pourraient être attribuables à des contaminations systématiques à la source et non représentatives de contributions locales (matières fécales d'oiseaux, mouches, engrais, déneigement, etc...) ou encore à des erreurs de manipulation au cours de l'expédition ou de l'analyse. Ces dernières auront cependant peu d'influence sur les rapports de concentrations moyennes calculés puisque les erreurs de manipulation systématiques auront surtout comme effet de diminuer les rapports et que, seules, des erreurs de manipulation isolées (contamination ou surévaluation) pourront accroître sensiblement les rapports des concentrations moyennes.

2.2 La précision sur les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques à chaque station

La détermination de la précision sur la moyenne des valeurs d'un paramètre physico-chimique à une station donnée est une opération fort simple qui revêt pourtant une importance capitale lorsque l'on veut estimer le niveau possible de perception d'un phénomène avec les données dont on dispose. L'estimé de la précision sur la moyenne permet de plus de situer la valeur relative des données au sein du processus d'interprétation; ainsi par exemple pour un pourcentage de précision sur la moyenne de l'ordre de 100%, il conviendra de minimiser la signification de la valeur moyenne du paramètre physico-chimique correspondant dans

l'interprétation des données. De plus, l'estimé des précisions sur les moyennes fournit des indications sur la durée et la fréquence requises des échantillonnages; il permet de détecter des erreurs non systématiques, soit dans la technique d'échantillonnage (contamination accidentelle, etc...), soit au niveau des analyses. Finalement les précisions sur les moyennes peuvent servir de guide dans le choix des méthodes de traitement des données. Ainsi par exemple, lorsque les précisions sur les moyennes d'un ensemble de paramètres sont suffisamment bonnes, il est possible d'utiliser des techniques statistiques multidimensionnelles particulièrement puissantes pour synthétiser l'information contenue dans la distribution des données. Pour des précisions moins bonnes, des techniques statistiques moins élaborées s'utiliseront couramment (écart-type, histogramme, etc...).

Sous la réserve de l'hypothèse que la distribution des valeurs mesurées suit une loi normale, on peut évaluer la précision sur la moyenne à l'aide de l'équation suivante:

$$P = \frac{t.s}{m.\sqrt{N}} \cdot 100$$

où:

- P : précision sur la moyenne exprimée en %;
- t : la valeur de Student estimée d'après les tables, pour N-1 degrés de liberté;

TABLEAU 2.3 : Précisions (pourcentages) sur les moyennes calculées
à chaque station

STATIONS	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	Cond	H	N-NO ₃	N-NH ₄	N _{org}	P-PO ₄	P _{hydr}	P _{tot}	C _{org}
Béthanie	32	33	92	30	20	50	20	45	33	30	60	30	27	31	34
Bonsecours	50	94	94	32	17	75	19	44	29	32	83	39	53	75	28
Brit-Mills	39	129	93	70	28	63	26	50	28	49	112	81	85	93	B 26
Brome	38	45	100	94	22	50	25	40	27	47	104	105	111	129	54
Farnham	25	29	88	32	19	45	18	59	27	34	74	49	47	41	55
Fleury	41	37	76	57	25	37	20	47	26	19	132	64	64	57	35
Granby	44	27	68	74	16	52	21	49	28	51	118	134	130	123	43
Knowlton	123	144	106	53	35	91	49	38	27	31	38	74	56	52	36
Rougemont	38	26	83	45	26	55	23	28	25	28	51	68	64	57	46
Roxton-Falls	33	34	85	102	21	62	17	46	27	25	91	144	146	146	42
St-Guillaume	44	106	91	65	22	50	20	48	26	25	132	89	91	86	50
St-Hyacinthe	32	30	60	66	22	57	47	62	26	79	127	107	106	104	51
St-Nazaire	38	19	95	35	21	52	22	37	28	20	78	49	45	58	52
St-Valérien	27	44	90	48	24	71	25	55	25	31	164	66	69	128	44
Ste-Rosalie	26	23	107	57	23	47	18	53	23	21	97	57	67	64	45
Sutton	35	67	93	89	23	41	35	44	31	58	104	122	122	115	56
Upton	25	44	95	85	21	46	21	136	22	34	77	117	125	92	32
Valcourt	17	36	83	116	17	47	20	26	28	20	172	147	146	126	39
Warden	31	31	84	34	19	66	21	29	25	16	39	32	35	47	50

N : le nombre d'observations

m : la valeur moyenne observée du paramètre

s : l'écart type observé

La précision sur la moyenne, calculée pour chaque paramètre à chacune des stations, est présentée au tableau 2.3. A l'examen de ce tableau, on constate une grande variation dans la précision sur la moyenne, d'une station à l'autre, et ceci pour l'ensemble des paramètres considérés. On voit, par exemple, la précision sur la valeur moyenne de la concentration en sulfate (SO_4) passer de 17% à la station de Bonsecours à 35% à Knowlton tandis qu'elle variera, dans le cas de l'azote organique, entre 39% et 164% pour l'ensemble du réseau.

Pour certains paramètres, les précisions sur les moyennes sont bonnes à toutes les stations du réseau tandis que pour d'autres, les précisions sont, dans l'ensemble, systématiquement mauvaises. Il apparaît donc souhaitable de classer les paramètres selon leur précision; arbitrairement, pour les besoins de l'analyse, on a établi trois catégories de paramètres selon que la médiane de la série des valeurs pour chacun d'entre eux se situait à l'intérieur d'un certain domaine de variation:

<u>Catégorie</u>	<u>Domaine des valeurs de la médiane M</u>
Précision bonne	$0 < M \leq 35\%$
Précision faible	$35\% < M \leq 50\%$
Précision mauvaise	$50\% < M$

Cette classification est présentée au tableau 2.4. Les paramètres physico-chimiques, dont la précision sur leur valeur moyenne est bonne, sont la conductivité, la concentration en sulfate, en nitrate et en azote ammoniacal. Les paramètres présentant les moyennes les plus incertaines sont les concentrations en Cl, K, $P_{\text{hydr.}}$, $P\text{-PO}_4$, P_{tot} , Na, N_{org} ; les précisions mauvaises pour ces paramètres indiquent que les valeurs observées sont fortement dispersées autour de la moyenne et que la période d'observation de 15 mois est nettement trop courte pour circonscrire adéquatement leur variabilité dans le temps et dans l'espace.

TABLEAU 2.4 : Classification des paramètres physico-chimiques en fonction des précisions calculées sur les moyennes.

CATEGORIE	PARAMETRE	MINIMUM, MAXIMUM ET MEDIANE DES PRECISIONS SUR LES MOYENNES (%)		
		minimum	médiane	maximum
Précision bonne	Cond	18	21	49
	SO ₄	17	22	35
	N-NO ₃	23	27	33
	N-NH ₄	16	31	58
Précision faible	Ca	17	35	¹ 123 (50)
	Mg	19	37	144
	C _{org}	26	43	56
	H	37	46	² 136 (59)
Précision mauvaise	Cl	37	52	91
	K	30	57	116
	P _{hydr}	27	69	146
	P-PO ₄	30	74	147
	P _{tot}	31	86	146
	Na	60	91	107
	N _{org}	38	97	172

¹ La valeur entre parenthèse est le maximum après avoir éliminé la station de Knowlton.

² La valeur entre parenthèse est le maximum après avoir éliminé la station d'Upton.



CHAPITRE 3

ANALYSE DE L'EVOLUTION DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE
DE LA QUALITE DES PRECIPITATIONS

3- ANALYSE DE L'EVOLUTION DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE DE LA QUALITE DES PRECIPITATIONS

L'analyse des précisions sur les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques indique des variations importantes au cours de la période d'étude; toutefois, alors que les valeurs de certains paramètres varient beaucoup, d'autres présentent des valeurs plus stables dans le temps. Il semble donc que l'on soit en mesure de caractériser de façon globale le comportement de certains paramètres au cours de la période d'étude; pour évaluer ce comportement, on a utilisé la méthode des composantes principales. Cette méthode décrite à l'annexe C peut s'appliquer sur l'ensemble des données brutes auxquelles on fait subir une transformation en valeurs centrées réduites.

3.1 Interrelations entre les paramètres

On a utilisé pour ce traitement les moyennes mensuelles calculées sur l'ensemble du bassin pour chacun des paramètres. On dispose donc d'un tableau de données dont les colonnes représentent les quinze paramètres physico-chimiques définis précédemment¹ et dont les lignes correspondent aux quinze moyennes mensuelles calculées sur l'ensemble des stations. La matrice utilisée pour le calcul des axes principaux est donc une matrice formée des coefficients de corrélation calculés entre chacun des paramètres pris deux à deux.

On ne disposait d'aucune mesure de phosphore hydrolysable en

¹ Les valeurs de pH ont été transformées en concentrations d'ions hydrogène afin de rendre les données plus homogènes.

septembre 1976, ni de mesures de carbone organique en août 1975 à cause de problèmes analytiques rencontrés. Malgré ces deux absences de valeur, ces paramètres n'ont pas été éliminés du traitement; les coefficients de corrélation ont été calculés dans ce cas sur un nombre d'observations réduit de un.

Pour utiliser la méthode des composantes principales, il faut s'assurer que les données sont homogènes pour chacun des paramètres et que la variabilité de chaque paramètre est du même ordre de grandeur. C'est pourquoi, on a utilisé de préférence à des valeurs brutes, des moyennes mensuelles calculées sur l'ensemble des stations afin d'amoinrir les écarts et rendre les données plus homogènes. De plus, il est important, pour pouvoir interpréter les résultats de l'analyse, que la variabilité spatiale à l'intérieur d'un mois donné ne masque pas la variabilité temporelle; dans le calcul des moyennes mensuelles, on a éliminé la station de Saint-Hyacinthe afin de combler partiellement cette exigence. En effet, les fortes valeurs mesurées à cette station risquaient d'influencer fortement les moyennes mensuelles.

Les premiers axes principaux calculés à partir de la matrice de corrélation permettent de représenter plus facilement dans un espace de dimension réduite les interrelations existant entre les variables. En effet, dans ce nouvel espace, les variables sont représentées par des points et la proximité entre deux points indique la présence de corrélation positive, tandis que l'éloignement signifie l'absence de

corrélation ou une valeur négative de corrélation. Les trois premiers axes principaux obtenus de l'analyse expliquent respectivement 38.7, 27.6 et 13.4% de la variabilité totale de telle sorte que la représentation des variables dans cet espace à trois dimensions explique environ 80% de toute la variabilité. Sur la figure 3.1, on représente les coordonnées des paramètres analysés sur les trois premiers axes principaux. Dans ce diagramme, les variables sont représentées par des vecteurs verticaux parallèles à l'axe 1 et dont l'origine est le plan horizontal couvert par les axes 2 et 3, mais les positions des points variables dans l'espace correspondent aux extrémités de ces vecteurs.

Sur le premier axe, on retrouve groupés d'un côté le phosphore hydrolysable, les orthophosphates, l'azote organique et le potassium tandis que de l'autre côté, on retrouve les nitrates et le groupe formé par le sodium et les chlorures. Du côté positif de l'axe 2, on retrouve principalement la conductivité, les sulfates, l'azote ammoniacal, les ions hydrogène, le calcium, le magnésium, ainsi que les nitrates.

On a souligné précédemment qu'une proximité entre deux points variables dans cet espace orthogonal implique l'existence d'une corrélation positive élevée entre ces deux variables et qu'un éloignement entre deux points dans ce plan signifie une absence de corrélation ou la présence d'une corrélation négative élevée. Par conséquent, les groupes de points représentés sur la figure 3.1 expriment des groupes de paramètres de variation semblable et la position des groupes dans le plan

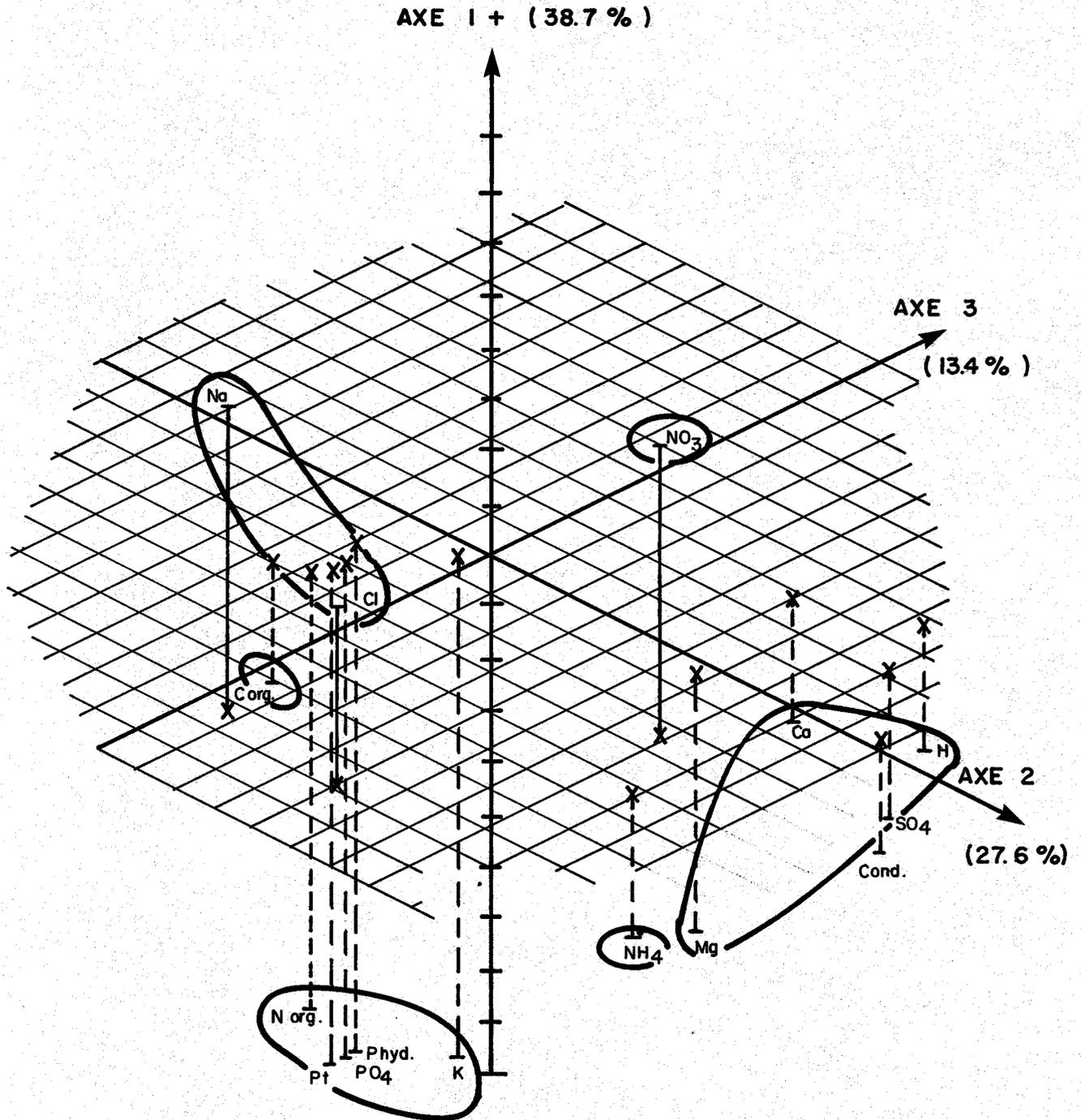


Figure 3.1. Représentation des paramètres physico-chimiques sur les trois premiers axes principaux et groupement des paramètres de variation semblable.

renseigne sur les interrelations possibles entre les groupes.

Le premier groupe qu'on peut former comprend le phosphore total, le phosphore hydrolysable, les orthophosphates, l'azote organique et le potassium. A cause de leur proximité entre eux, ces paramètres sont fortement interreliés. Leur position sur l'axe 1 indique qu'ils sont responsables d'une grande partie de la variance expliquée par ce premier axe principal et que par conséquent ils ont une variabilité temporelle très grande (voir le tableau 2.3).

Le deuxième groupe comprenant le sodium et les chlorures se retrouve opposé au premier groupe sur l'axe 1 signifiant que ces deux paramètres sont en partie corrélées négativement avec les paramètres du premier groupe. Leur variabilité temporelle est aussi très grande (tableau 2.3) et ces deux paramètres sont responsables d'une partie importante de la variance expliquée par l'axe 1. Les nitrates qu'on retrouve à une certaine distance de ce deuxième groupe dans le plan ont une certaine relation avec ces deux paramètres.

La conductivité, les sulfates, les ions hydrogènes, le calcium et le magnésium forment le troisième groupe de paramètres. Leur position sur l'axe 2 indique qu'ils ont une variation tout à fait indépendante de celle des paramètres du premier et du deuxième groupe. Leur variabilité tout en étant élevée est moins grande que celle des deux autres groupes. A l'intérieur de ce groupe, on remarque que le calcium et le magnésium sont légèrement différents des trois autres paramètres. La

proximité de la conductivité avec les sulfates et les ions hydrogène signifie que les ions principaux qui contribuent à la conductivité sont les sulfates et les ions hydrogène.

L'azote ammoniacal et le carbone organique varient différemment comme on peut le voir par leur position dans le plan. L'azote ammoniacal se trouve situé entre le premier et le troisième groupe indiquant deux influences possibles contribuant à sa présence. Quant au carbone organique, il pourrait à la rigueur être regroupé avec les variables du premier groupe.

3.2 Variabilité temporelle de l'ensemble des paramètres

En poursuivant l'analyse effectuée dans la section précédente, on peut estimer la variabilité temporelle de l'ensemble des paramètres considérés. Les observations qui correspondent aux moyennes mensuelles sur l'ensemble du bassin peuvent également être représentées dans l'espace des axes principaux. Les coordonnées des observations sur les axes principaux sont calculées à partir d'un produit matriciel des coordonnées des variables et des valeurs centrées réduites de chacun des paramètres (voir l'annexe C). Les observations représentées par des points dans cet espace peuvent être groupées s'ils sont rapprochés les uns des autres et signifier que certains mois ont un comportement semblable. Ce groupe de mois peut être caractérisé par un ou plusieurs paramètres selon la position du groupe de points observations par rapport aux points

variables. En effet, la proximité des points observations avec un ou plusieurs points variables signifie en général que ces observations ont des valeurs relativement élevées pour ces variables. On peut également déduire que les points observations qui sont opposés aux points variables dans le plan ont des valeurs plutôt faibles pour ces variables. Par cette analyse, on connaîtra donc les mois qui se sont comportés différemment au cours de la période d'étude et on pourra les caractériser par les paramètres responsables de ce comportement différent.

La figure 3.2 représente les mois de la période d'étude dans le plan des deux premiers axes principaux. On retrouve aussi sur cette figure les paramètres représentés précédemment dans l'espace des trois premiers axes (voir la figure 3.1).

Comme on le sait, on ne disposait pas de mesure de carbone organique en août 1975 et de phosphore hydrolysable en septembre 1976. Dans le calcul des coordonnées pour ces deux mois, on a utilisé la moyenne de ces paramètres pour remplacer ces valeurs manquantes.

Sur le premier axe, aux mois d'été s'opposent principalement les mois d'hiver tandis que sur le deuxième axe, ce sont les mois d'octobre 1974 et mai 1975 qui s'opposent aux mois de novembre 1974, septembre 1975 et octobre 1975. Sur le premier axe, on retrouve d'un côté le sodium et les chlorures et d'un autre côté, les trois formes de phosphore, le potassium et l'azote organique. On peut facilement en déduire que les mois de juin, juillet et août sont caractérisés par des

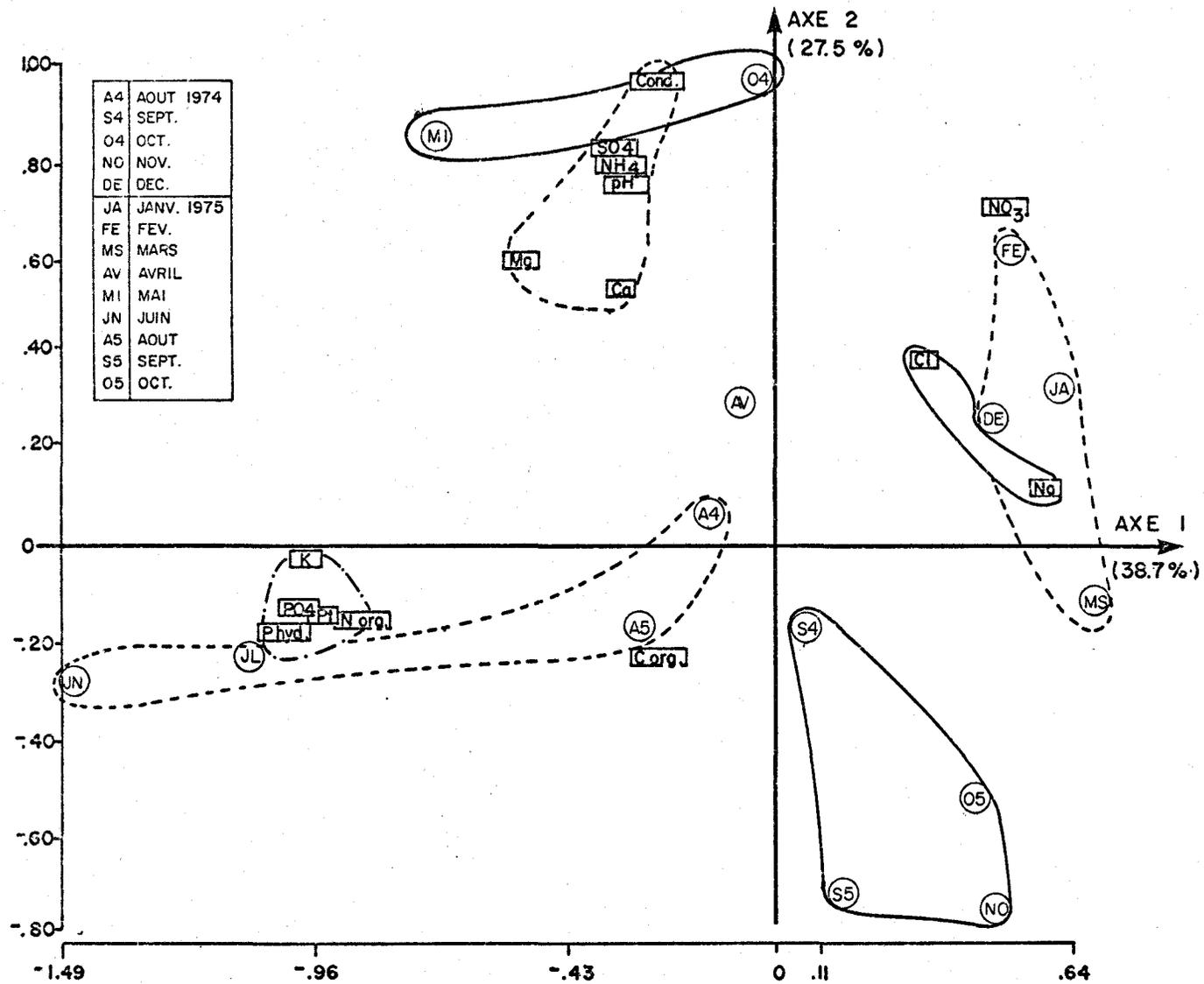


Figure 3.2. Représentation des paramètres (□) et des mois (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des paramètres de variation semblable et des mois de comportement semblable.

valeurs élevées pour ces paramètres. Il en est de même des mois de décembre, janvier, février et mars qui ont des valeurs élevées en sodium et en chlorure.

On peut grouper ensemble d'une part les mois de septembre 1974, novembre 1974, septembre 1975 et octobre 1975 et d'autre part les mois d'octobre 1974 et mai 1975. Ces deux groupes de mois peuvent être caractérisés ainsi: le premier groupe est influencé par des valeurs faibles en conductivité, sulfates, azote ammoniacal, ions hydrogène, calcium, magnésium et nitrates tandis que le second groupe résulte de valeurs élevées pour ces paramètres.

La période d'étude peut donc être caractérisée par des mois d'hiver où les stations sont influencées par les sels de déglacage utilisés sur les routes, des mois d'été, où les substances organiques ont beaucoup d'importance (débris organiques, détritiques, matières fécales d'oiseaux, etc...) et des mois de printemps et d'automne où les paramètres reliés à l'acidité, au soufre et aux émanations gazeuses prennent plus ou moins d'importance.

3.3 Etude du comportement des nitrates, des sulfates et des ions hydrogène

Dans les deux sections précédentes, on a vu que la variabilité temporelle était élevée pour les trois formes de phosphore, l'azote organique, le potassium, le sodium et les chlorures. A cause de la

courte période d'observation, il est probable que la variabilité spatiale de ces paramètres soit masquée et qu'elle soit seulement le reflet d'une courte période de temps telle que les mois d'hiver pour le sodium et les chlorures et les mois d'été pour les substances nutritives.

Les précisions sur les moyennes des paramètres physico-chimiques tels que les nitrates, les sulfates et les ions hydrogène étant généralement bonnes, la variabilité spatiale de ces derniers risque de déceler des tendances pouvant fournir des indications quant à leur origine. Rappelons de plus que les nitrates, les sulfates et l'ion hydrogène suscitent un intérêt croissant de la part des chercheurs à cause de l'impact que ces substances peuvent avoir sur l'équilibre écologique d'un bassin.

3.3.1 Nitrates

On dispose d'un tableau de données correspondant aux mesures de nitrates effectuées aux 19 stations pendant les quinze mois de la période d'étude. L'étude de la variabilité de ce paramètre au moyen des composantes principales peut se faire de deux façons: on peut d'abord considérer les stations comme des variables en disposant la matrice de données pour que les colonnes représentent les stations et que les lignes correspondent aux mois. Dans ce cas, les distances entre les points

stations dans le plan des axes principaux sont interprétables en termes de corrélation entre stations. On peut aussi transposer la matrice de données pour que les colonnes représentent les mois et que les lignes correspondent aux stations. Cette fois-ci, la position des points stations dans le plan des axes principaux est interprétable en termes de comportement global des stations dans le temps, c'est-à-dire que les stations de même comportement sont représentées par des groupes de points voisins. De plus, on peut caractériser les stations ou les groupes de stations par les mois responsables de leur comportement selon la proximité ou l'éloignement des points stations avec les points mois. Ces deux types d'analyse ont été réalisées et sont présentées dans les pages qui suivent.

Interrelations entre stations observées avec les nitrates

L'analyse effectuée en considérant les stations comme des variables a permis d'obtenir un nouveau système d'axe dont les trois premiers expliquent respectivement 69.7, 13.2 et 6.8% de la variance totale. Avec ces trois premiers axes d'inertie, environ 90% de la variance totale est expliquée.

Lorsque toutes les variables sont corrélées fortement entre elles comme c'est le cas ici (les coefficients de corrélation varient entre 0.25 et 0.98), le premier axe principal explique beaucoup de variabilité et les projections des variables sur ce premier axe sont toutes

NUMÉRO ET NOM DE LA STATION			
1	BĒTHANIE	11	ST-GUILLAUME
2	BONSECOURS	12	ST-HYACINTHE
3	BRITANNIA-MILLS	13	ST-NAZAIRE
4	BROME	14	ST-VALERIEN
5	FARNHAM	15	STE-ROSALIE
6	FLEURY	16	SUTTON
7	GRANBY	17	UPTON
8	KNOWLTON	18	VALCOURT
9	ROUGEMONT	19	WARDEN
10	ROXTON-FALLS		

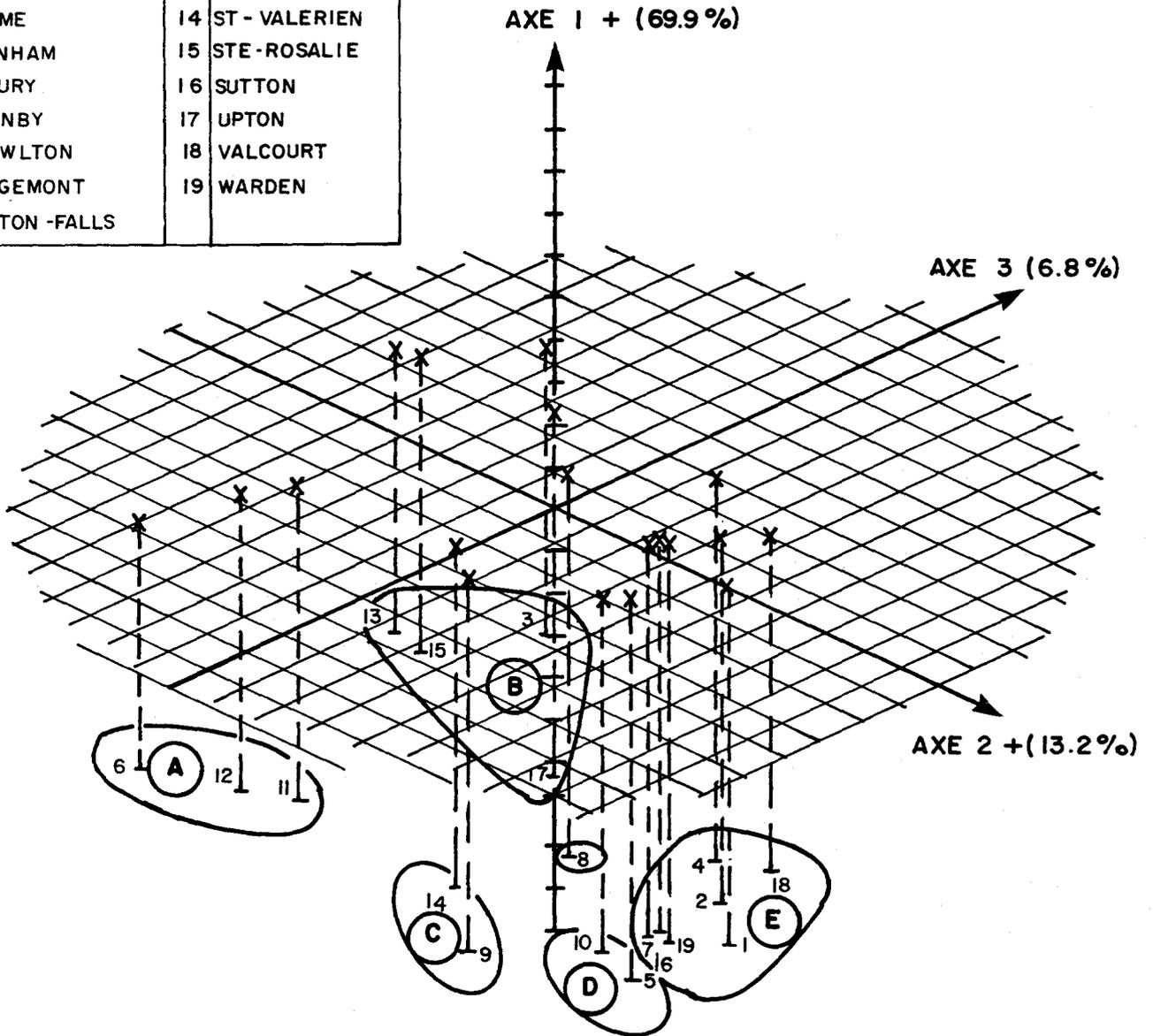


Figure 3.3. Représentation des stations sur les trois premiers axes principaux et groupement des stations de variation semblable (nitrates).

élevées (-0.53 à -0.95). Les variables se distinguent donc entre elles par leurs projections sur les axes 2 et 3. La figure 3.3 présente les points stations dans l'espace des trois premiers axes principaux. Comme sur la figure 3.1, les points sont représentés par des vecteurs verticaux parallèles à l'axe 1 et ayant comme origine le plan horizontal formé par les axes 2 et 3.

Comme tous les vecteurs ont environ la même longueur, c'est leur origine sur le plan formé par l'axe 2 et l'axe 3 qui permettra de déterminer les groupes de stations qui sont le plus fortement corrélées entre elles. Un examen de ces proximités permet de déterminer quatre groupes de stations plus ou moins distincts et une station qui varie différemment: Knowlton. Les groupes identifiés et les stations composant ces groupes sont présentés dans le tableau 3.1.

Le groupe le plus important est le groupe E qui comprend sept stations. A proximité de ce groupe, on retrouve la station de Knowlton ainsi que les groupes C et D (figure 3.3). Les groupes A et B sont des groupes distincts des autres groupes indiquant que les stations composant ces groupes ont une variation particulière.

Sur la figure 3.4, on a délimité les zones formées par les groupes identifiés. Le fait que les zones soient bien délimitées géographiquement indique que la formation de ces groupes n'est pas aléatoire, mais provient d'influences régionales qui ont agi à l'échelle du bassin. Par l'opposition sur le deuxième axe des groupes C, D et E aux

TABLEAU 3.1 : Composition des groupes de stations de variation semblable (nitrates).

GROUPE	IDENTIFICATEURS	STATIONS
A	6 11 12	Fleury St-Guillaume St-Hyacinthe
B	3 13 15 17	Britannia-Mills St-Nazaire Ste-Rosalie Upton
C	9 14	Rougemont St-Valérien
D	5 10	Farnham Roxton-Falls
E	1 2 4 7 16 18 19	Béthanie Bonsecours Brome Granby Sutton Valcourt Warden
-	8	Knowlton

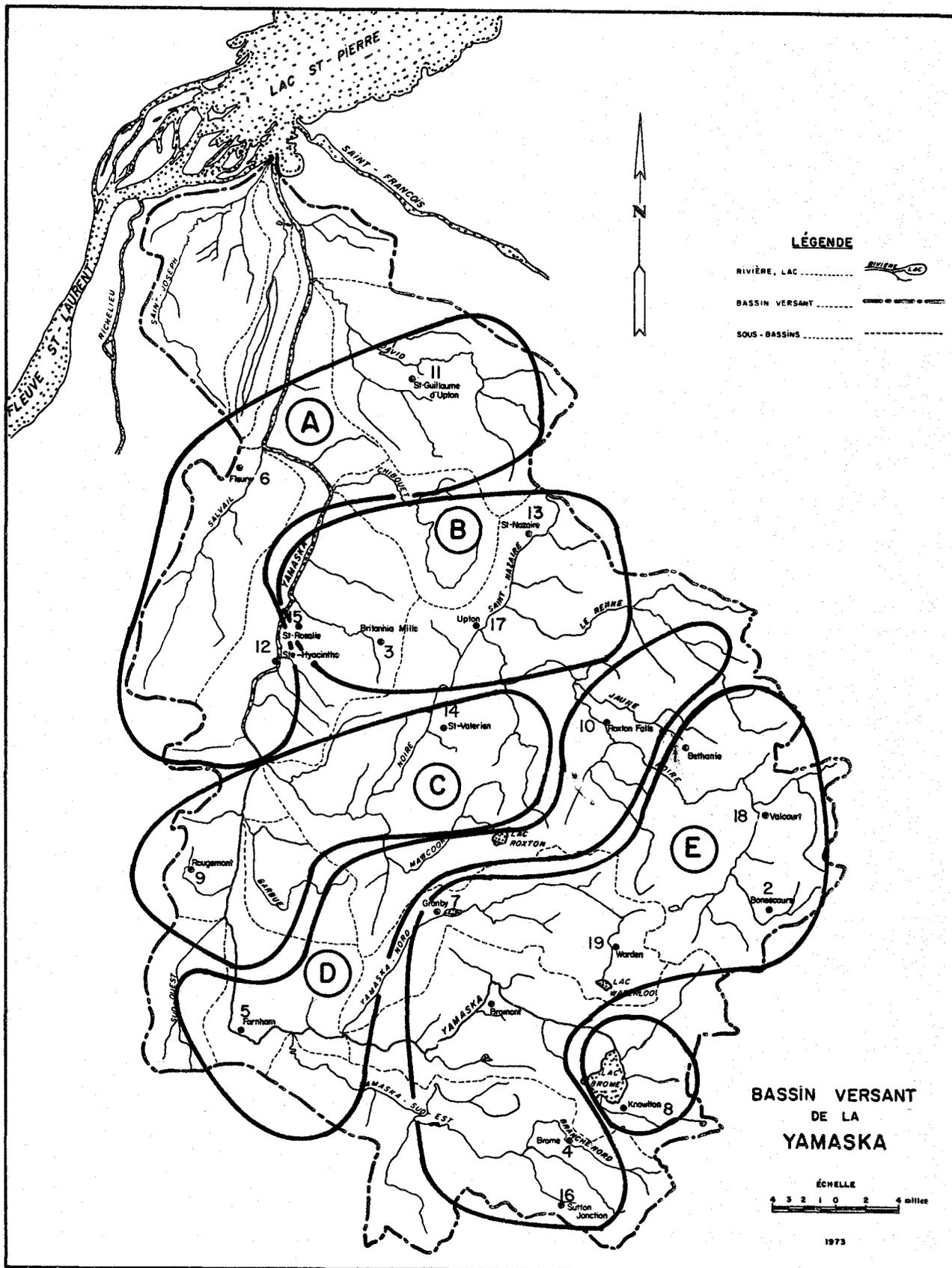


Figure 3.4. Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de variation semblable (nitrates).

groupes A et B, on déduit que la région amont du bassin varie à l'inverse de la région aval. Le groupe D qu'on retrouvait situé entre le groupe C et le groupe E dans le plan factoriel représente une zone délimitée par les deux zones formées par ces deux groupes. Le fait que le groupe A et le groupe B soient opposés sur le troisième axe indique que ces deux zones ont subi des influences légèrement différentes au cours de la période d'étude.

Comportement dans le temps des stations constaté pour le cas des nitrates

Si l'on transpose maintenant la matrice des données pour que les colonnes représentent les mois et que les lignes correspondent aux stations, on peut calculer la matrice de corrélation entre les mois à partir de laquelle on calcule les axes principaux. On représente les stations dans le plan des axes principaux 1 et 2 et on regroupe ensemble les points situés à proximité l'un de l'autre pour identifier les stations de comportement semblable. Si l'on représente simultanément les mois et les stations, on peut caractériser les groupes de stations par les mois qui ont beaucoup ou peu d'importance selon la proximité ou l'éloignement plus ou moins grand entre les mois et les groupes de stations.

Les trois premiers axes obtenus dans cette analyse expliquent 33.8, 20.1 et 14.2% de la variance pour faire un total de 68%. La figure

3.5 représente simultanément les mois et les stations dans le plan des deux premiers axes principaux.

Sur le premier axe, on retrouve d'un côté les mois de décembre 1974, septembre 1975 et octobre 1975 et d'un autre côté, on retrouve tous les autres mois à l'exception de janvier et mars 1975 qui sont situés au centre. Sur l'axe 2, on retrouve sur un côté les mois de septembre 1975, décembre 1974, janvier, février et mars 1975 ainsi que juillet 1975, et de l'autre côté, les mois d'août 1974, septembre 1974 et avril 1975. On peut considérer que l'axe 1 est un axe qui exprime un gradient de concentration pour les stations à cause de la présence de la majorité des mois sur un côté de l'axe. L'axe 2 peut être considéré comme expliquant l'influence des mois d'hiver à cause de la présence des mois de décembre, janvier, février et mars sur un côté de l'axe. Le mois de septembre 1975 et juillet 1975 font exception cependant et leur position rend plus difficile l'attribution d'un sens réel à l'axe 2.

On a délimité cinq groupes de stations de comportement semblable. L'identification des stations composant ces groupes est présentée dans le tableau 3.2.

Le groupe A qui apparaît à une extrémité de l'axe 2 dans le plan (figure 3.5) peut être caractérisé par des valeurs faibles en nitrates pour les mois d'hiver et pour le mois de septembre 1975, et par des valeurs intermédiaires pour l'ensemble des autres mois.

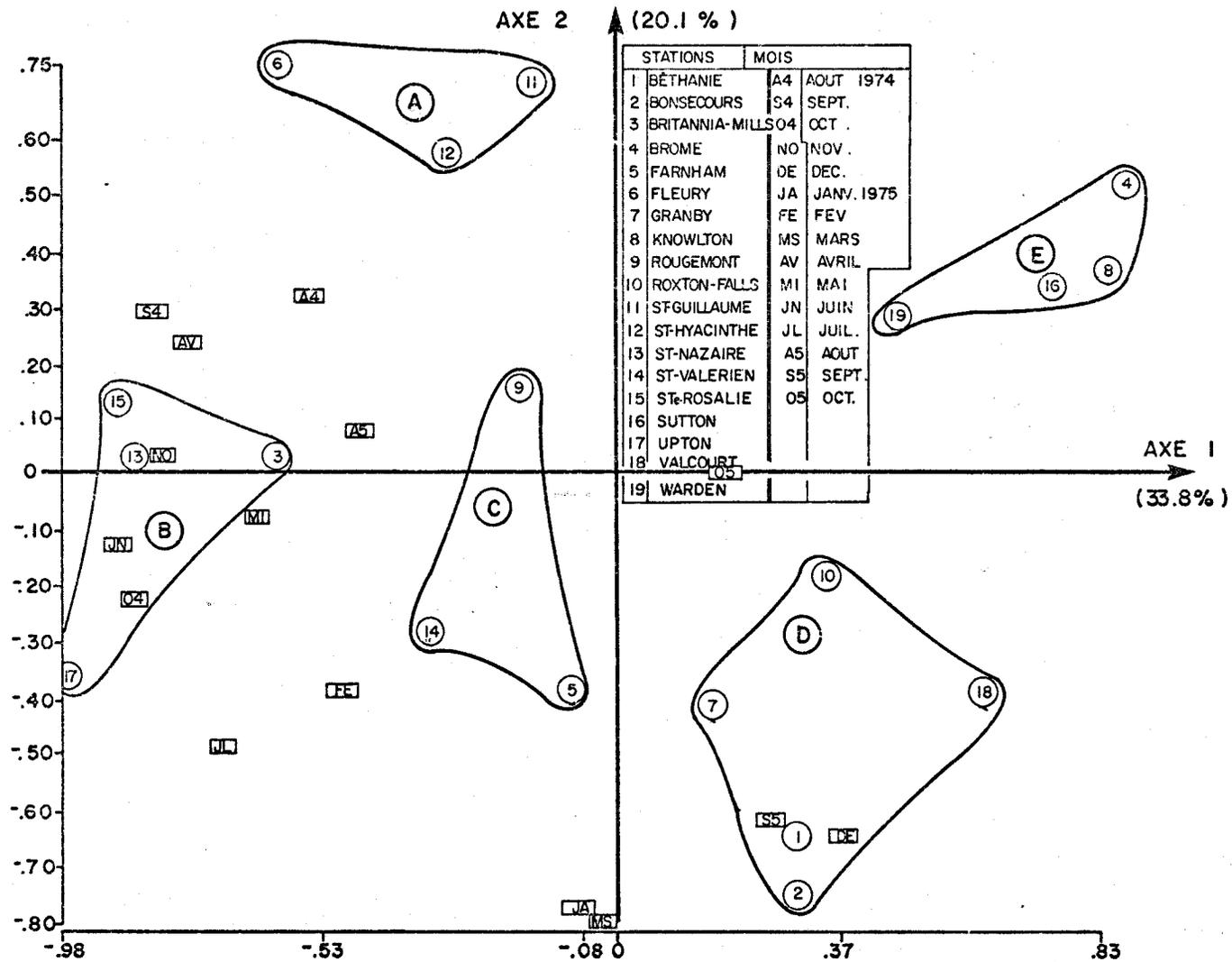


Figure 3.5. Représentation des mois (□) et des stations (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des stations de comportement semblable dans le temps (nitrates).

TABLEAU 3.2 : Composition des groupes de stations de comportement semblable dans le temps (nitrates).

GROUPE	IDENTIFICATEURS	STATIONS
A	6 11 12	Fleury St-Guillaume St-Hyacinthe
B	3 13 15 17	Britannia-Mills St-Nazaire Ste-Rosalie Upton
C	5 9 14	Farnham Rougemont St-Valérien
D	1 2 7 10 18	Béthanie Bonsecours Granby Roxton-Falls Valcourt
E	4 8 16 19	Brome Knowlton Sutton Warden

Le groupe B qu'on retrouve sur une extrémité de l'axe 1 est caractérisé par des valeurs élevées pour l'ensemble des mois à cause de la proximité qui existe entre ce groupe et l'ensemble des mois. Le groupe C peut être considéré comme un groupe dont les concentrations sont intermédiaires sur l'ensemble des mois à cause de sa position centrale sur l'axe 1 qui exprime un gradient de concentration. Par la position de ce groupe sur l'axe 3 (non représenté), on constate que les stations le composant sont influencées par des valeurs élevées en août et en septembre. Les groupes D et E sont caractérisés par des valeurs faibles. Cependant, le groupe D, par sa position sur l'axe 2 à proximité des mois d'hiver et du mois de septembre 1975, est caractérisé par des valeurs fortes pour ces mois. Le groupe E apparaît ainsi comme le groupe caractérisé par les plus faibles concentrations à cause de l'éloignement de ce groupe de l'ensemble des mois sur les deux axes.

Sur la figure 3.6, qui montre la carte de la région étudiée, on a délimité les zones correspondant aux groupes de stations obtenus. Afin de rendre plus complète l'interprétation de ces zones de variabilité, on a indiqué les concentrations moyennes à chaque station (voir le tableau 2.1).

Les zones correspondant aux groupes sont encore bien délimitées sur le bassin. Par rapport aux groupes qui ont des variations semblables, on constate que les zones correspondant aux groupes A et B qui avaient des variations distinctes sont demeurées les mêmes. Par contre,

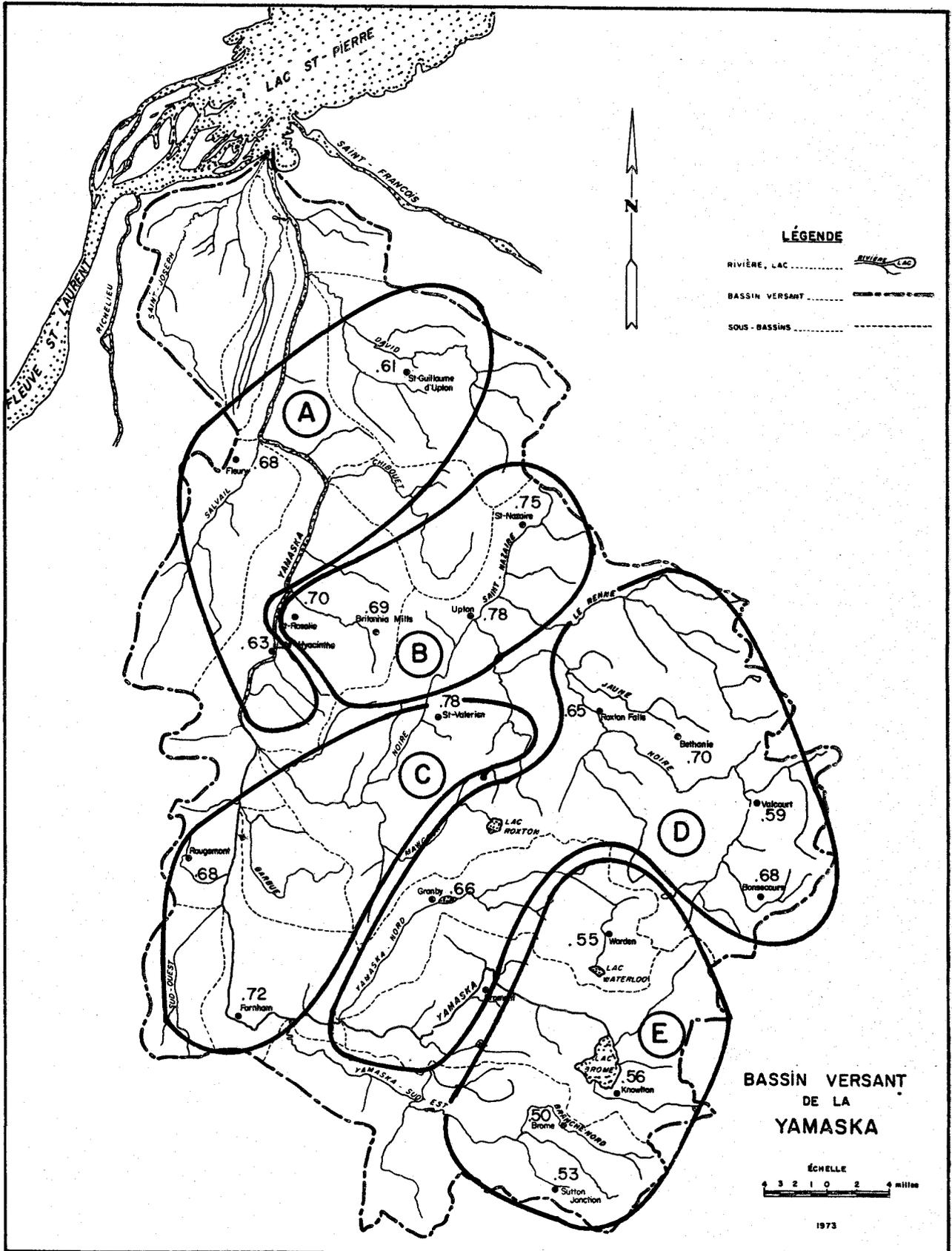


Figure 3.6. Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de comportement semblable dans le temps (nitrates) et moyennes calculées aux stations (mg N/l).

la répartition des stations à l'intérieur des trois autres zones a changé quelque peu. Entre autres, la station de Knowlton qui avait une variation particulière fait maintenant partie du groupe E et la station de Farnham est passée du groupe D au groupe E. Ce changement de configuration n'entraîne pas de difficultés d'interprétation, car on s'intéresse maintenant au comportement global des stations. Il est possible en effet que des stations qui ont une variation identique ne soient pas classées dans le même groupe à cause du niveau de concentration mesurée différent à ces stations. Cette façon d'étudier la variabilité spatiale est complémentaire à l'étude précédente, car elle permet, en plus, de caractériser les groupes de stations en fonction de leur concentration moyenne et des mois qui ont influencé particulièrement dans son calcul.

Il est intéressant de constater que la zone B qui avait une variation particulière est caractérisée par des valeurs élevées de concentrations sur l'ensemble des mois. Les valeurs les plus faibles se retrouvent dans la partie la plus en amont du bassin. Entre ces deux zones on retrouve deux zones de transition, C et D qui ont subi des influences un peu différentes. A l'autre extrémité du bassin, on retrouve la zone A avec une variation particulière et des concentrations intermédiaires en général, mais faibles à certains mois comme septembre 1975 et les mois d'hiver.

3.3.2 Sulfates

L'étude de la variabilité des concentrations en sulfates effectuée dans cette section est similaire à celle qui a été faite sur les nitrates. On a observé à la section 3.1 que ce paramètre varie différemment des nitrates (voir la figure 3.1).

Interrelation entre les stations observées pour le cas des sulfates

Les trois premiers axes principaux calculés à partir de la matrice de corrélation expliquent respectivement 61.3, 13.1 et 7.5% de la variance. La variance expliquée par ces trois premiers axes pour les sulfates est un peu plus faible que celle expliquée pour les nitrates (82% par rapport à 90%) indiquant que les stations sont un peu moins corrélées entre elles. Cette différence provient d'une corrélation plus faible calculée entre les concentrations en sulfates observées à la station de Saint-Valérien et les concentrations aux autres stations. En effet, les coefficients de corrélation entre stations varient de 0.24 à 0.93 sauf pour la station de Saint-Valérien dont les valeurs se situent entre -0.10 et 0.80.

La figure 3.7 présente les stations dans l'espace des trois premiers axes principaux. A l'examen de cette figure, on se rend compte que toutes les projections sur l'axe 1 sont du même ordre de grandeur (-0.68 à -0.90), sauf pour la station de Saint-Valérien avec une valeur

NUMÉRO ET NOM DE LA STATION			
1	BÉTHANIE	11	ST-GUILLAUME
2	BONSECOURS	12	ST-HYACINTHE
3	BRITANNIA-MILLS	13	ST-NAZAIRE
4	BROME	14	ST-VALERIEN
5	FARNHAM	15	STE-ROSALIE
6	FLEURY	16	SUTTON
7	GRANBY	17	UPTON
8	KNOWLTON	18	VALCOURT
9	ROUGEMONT	19	WARDEN
10	ROXTON-FALLS		

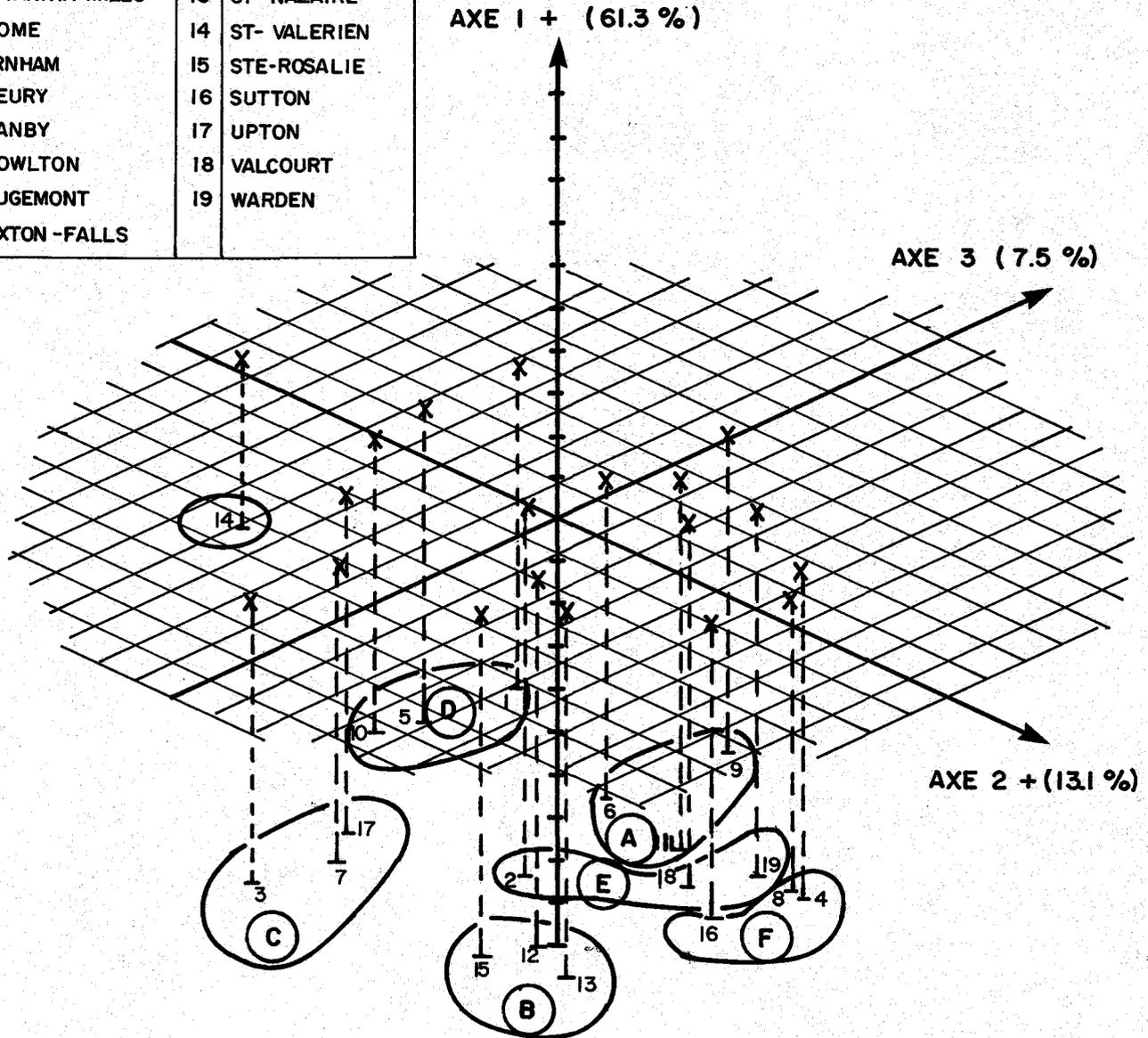


Figure 3.7. Représentation des stations sur les trois premiers axes principaux et groupement des stations de variation semblable (sulfates).

égale à -0.41. Le premier axe principal explique donc la tendance générale sur le bassin. Pour voir les différences des variations d'une station à une autre, il faut encore considérer les projections sur le deuxième et le troisième axe principal.

En comparant la position des vecteurs dans le plan formé par l'axe 2 et l'axe 3, il est possible de former 6 groupes de stations qui sont interreliées tout en faisant ressortir la station de Saint-Valérien qui a une variation nettement particulière. L'identification et la composition de ces groupes apparaissent dans le tableau 3.3. Les groupes B, C, D et F apparaissent distincts dans le plan tandis que les groupes E et A sont plutôt rapprochés l'un de l'autre (figure 3.7). Si l'on représentait le quatrième axe principal, on verrait que les groupes E et A s'opposent sur cet axe indiquant qu'ils ont quand même une variation légèrement différente.

Le troisième axe explique principalement la variation des groupes A, B et C. Sur cet axe, les groupes B et C s'opposent au groupe A indiquant que ces deux groupes sont reliés inversement à l'autre groupe. Le deuxième axe explique surtout la variation des groupes D, E et F. En effet, les groupes D et F sont situés aux extrémités de cet axe tandis que le groupe E apparaît au centre. Le groupe E constitue donc un groupe de transition entre ces deux groupes reliés inversement.

Les zones délimitées par les groupes sont représentées sur la figure 3.8. Il est intéressant de constater encore que les groupes

TABLEAU 3.3 : Composition des groupes de stations de variation semblable (sulfates).

GROUPE	IDENTIFICATEURS	STATIONS
A	6 9 11	Fleury Rougemont St-Guillaume
B	12 13 15	St-Hyacinthe St-Nazaire Ste-Rosalie
C	3 7 17	Britannia-Mills Granby Upton
D	1 5 10	Béthanie Farnham Roxton-Falls
E	2 18 19	Bonsecours Valcourt Warden
F	4 8 16	Brome Knowlton Sutton
-	14	St-Valérien

correspondent sur le bassin à des zones bien définies qui ont subi des influences régionales différentes, en faisant exception de la station de Saint-Valérien. Les groupes D, E et F qui se distinguent sur l'axe 2 sont situés à la partie amont du bassin, tandis que les groupes A, B et C responsables de l'axe 3 se retrouvent à la partie aval. On voit donc que ces deux grandes zones ont une variation indépendante l'une de l'autre.

La zone définie par le groupe A se retrouve à la partie située la plus en aval du bassin et s'étend jusqu'à la station de Rougemont. Plus en amont, on retrouve les stations des groupes B et C qui avaient une variation un peu identique et qui réagissaient à l'inverse des stations du groupe A.

Dans la partie la plus en amont, on retrouve les stations du groupe F. La zone formée par le groupe E qu'on retrouve plus au nord correspond bien à une zone de transition entre celle du groupe F et celle du groupe D.

La structure spatiale qu'on distingue avec les sulfates ressemble un peu à celle obtenue avec les nitrates. Il existe des zones de variation semblable selon qu'on se déplace sur un axe NO-SE.

Comportement dans le temps des stations constaté pour le cas des sulfates

Les trois premiers axes principaux obtenus de cette analyse

expliquent chacun 39.2, 16.8 et 12.0% de la variance totale avec un cumulatif de 68% pour les trois premiers axes. La variance expliquée pour ces trois axes avec les sulfates est égale à celle obtenue avec les nitrates dans le même type d'analyse.

La figure 3.9 représente simultanément les mois et les stations dans le plan des deux premiers axes principaux. Sur l'axe 1, on retrouve d'un côté l'ensemble des mois à l'exception du mois de septembre 1975, de telle sorte que cet axe exprime encore un gradient de concentration pour les stations. Par rapport à l'analyse effectuée avec les nitrates, on retrouve encore sur un côté de l'axe 2 les mois d'hiver et le mois de septembre 1975. Cet axe exprime encore le comportement des stations par rapport aux mois d'hiver. Le troisième axe (non représenté sur cette figure) oppose les mois d'août 1974, août 1975 et septembre 1974 à l'ensemble des autres mois indiquant un autre comportement particulier des stations par rapport à cette période de temps.

Sur la figure 3.9, on a délimité cinq groupes de stations de comportement semblable et deux stations particulières, Saint-Hyacinthe et Saint-Valérien. Le tableau 3.4 présente la composition de chacun de ces groupes. Les groupes A et B n'apparaissent pas tellement distincts sur le plan des deux premiers axes, mais ils se différencient par leur opposition sur le troisième axe. Il en est de même pour la distinction entre le groupe C et le groupe E.

Les groupes A et B, par leur proximité avec l'ensemble des mois,

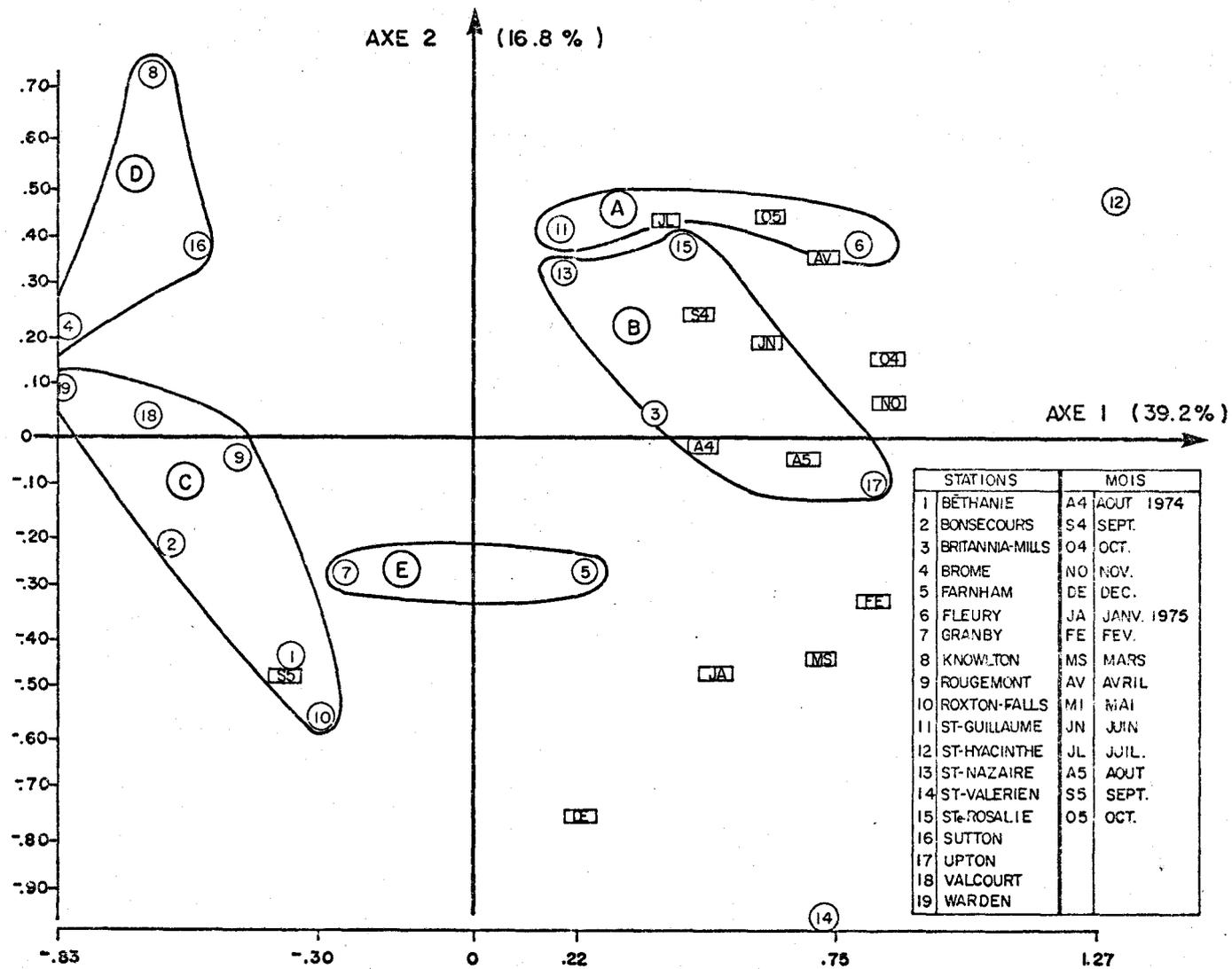


Figure 3.9. Représentation des mois (□) et des stations (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des stations de comportement semblable dans le temps (sulfates).

TABLEAU 3.4 : Composition des groupes de stations de comportement semblable (sulfates).

GRUPE	IDENTIFICATEURS	STATIONS
A	6 11	Fleury St-Guillaume
B	3 13 15 17	Britannia-Mills St-Nazaire Ste-Rosalie Upton
C	1 2 9 10 18 19	Béthanie Bonsecours Rougemont Roxton-Falls Valcourt Warden
D	4 8 16	Brome Knowlton Sutton
E	5 7	Farnham Granby
-	12	St-Hyacinthe
-	14	St-Valérien

sont caractérisés par des valeurs élevées, tandis que les groupes C et D ont des valeurs faibles. Le groupe E, par sa position centrale sur l'axe 1, a des valeurs intermédiaires. Le groupe A se différencie du groupe B par des valeurs élevées en août et en septembre à cause de la proximité de ce groupe avec ces mois. Par sa position sur l'axe 2, le groupe D se distingue du groupe E. Il est caractérisé par des valeurs très faibles en hiver à cause de l'opposition de ce groupe avec ces mois.

La station de Saint-Hyacinthe pourrait être regroupée avec les stations du groupe A malgré sa forte valeur sur l'axe 1. Par contre, la station de Saint-Valérien se comporte de façon toute particulière par ses valeurs élevées en hiver.

La délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes apparaît sur la figure 3.10. Les zones formées apparaissent encore bien définies et varient encore d'amont en aval. Par rapport à la configuration obtenue à partir des zones de variation semblable (voir la figure 3.8), on constate certaines différences. Seul le groupe comprenant les stations de Brome, Sutton et Knowlton est demeuré intact. Les zones de la partie aval du bassin qui avaient une variation différente sont caractérisées par des valeurs élevées tandis que les zones de la partie amont ont des valeurs plutôt faibles. La station de Saint-Valérien, située au centre du bassin a une variation particulière à cause de valeurs élevées en hiver.

Si l'on compare maintenant le groupement des stations obtenues avec les sulfates (figure 3.10) avec celui obtenu avec les nitrates (figure 3.6), on observe certaines similitudes. Les stations du groupe B situées au nord-est de la ville de Saint-Hyacinthe qui étaient caractérisées par des valeurs élevées en nitrates ont également des valeurs élevées en sulfates. On observe aussi que la partie amont du bassin qui a des valeurs plus faibles en nitrates a aussi des valeurs faibles en sulfates sauf pour les stations de Granby et Farnham qui ont des valeurs élevées en sulfates.

La structure spatiale obtenue à partir des sulfates apparaît influencée localement. Par exemple, on voit que les émanations urbaines augmentent de façon marquée les niveaux de concentration à la station située à Saint-Hyacinthe. Également, on voit que certaines stations comme Granby, Farnham et Saint-Valérien semblent subir des influences locales importantes.

3.3.3 Ions hydrogène¹

Une autre analyse similaire aux précédentes a été réalisée sur les concentrations en ions hydrogène et ceci, malgré une variabilité temporelle élevée (section 3.2). Le pH joue un rôle prépondérant dans la chimie des précipitations et cristallise de plus en plus l'opinion des scientifiques quant aux dangers que peut représenter l'acidification croissante des eaux atmosphériques; ce paramètre méritait donc une attention particulière.

¹ On considère encore, comme dans les sections 3.1 et 3.2, les concentrations en ions hydrogène plutôt que le pH qui est une transformation logarithmique des concentrations.

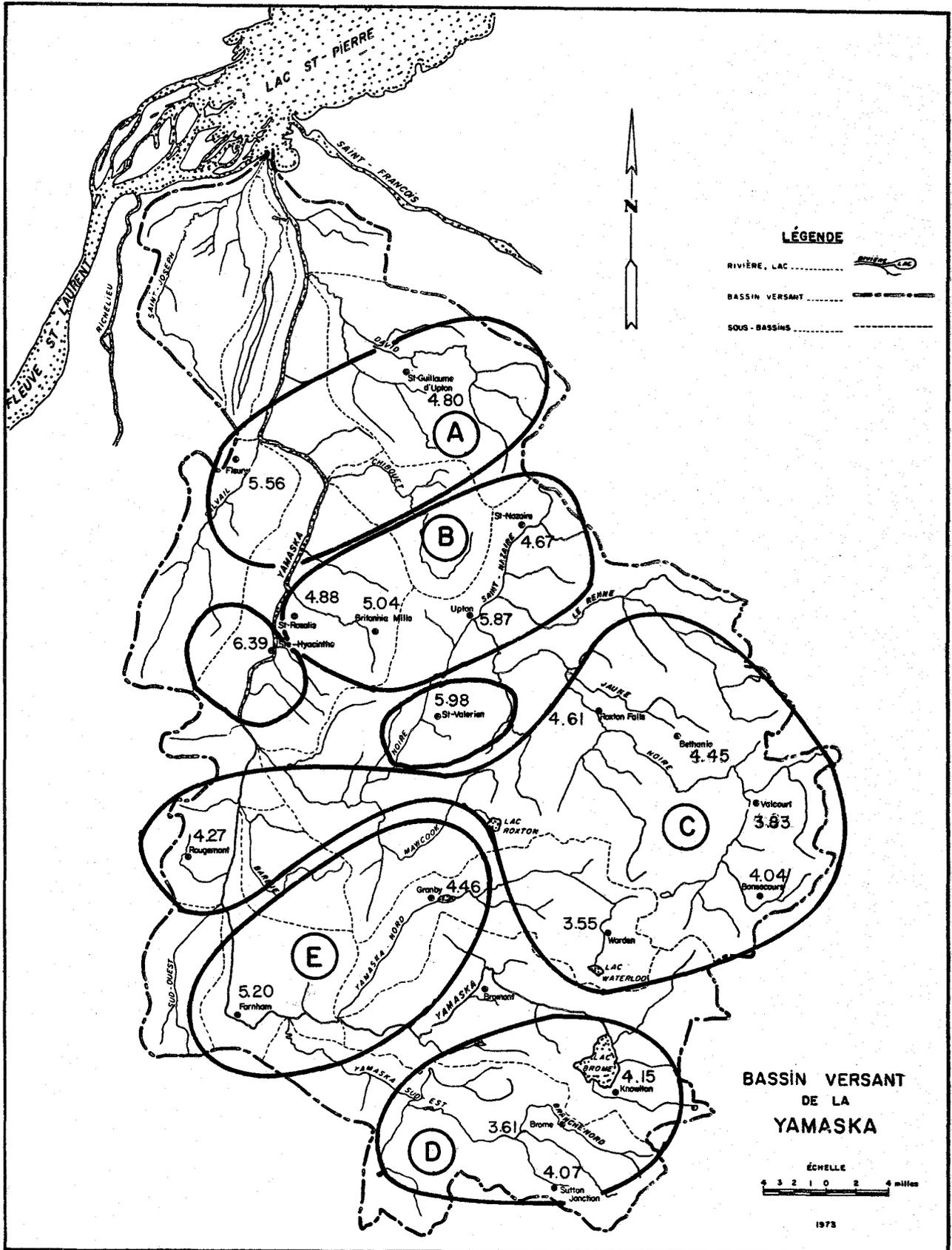


Figure 3.10. Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations de comportement semblable dans le temps (sulfates) et moyennes calculées aux stations (mg SO₄/l).

Interrelations entre les stations observé pour le cas des ions hydrogène

L'analyse effectuée à partir de la matrice de corrélation entre stations a permis de calculer un nouveau système d'axe dont les trois premiers axes expliquent respectivement 40.6, 16.8 et 13.2% de la variance avec un cumulatif de 70.5% pour ces trois axes. On explique moins de variance qu'avec les sulfates et les nitrates indiquant que les stations sont faiblement corrélées entre elles en considérant ce paramètre. La matrice de corrélation comporte un certain nombre de valeurs négatives provenant en partie de la variation différente de la station de Knowlton avec les autres stations.

En examinant la figure 3.11, on retrouve sur un côté du premier axe la station de Knowlton avec une valeur égale à 0.1 et de l'autre côté toutes les stations avec des valeurs variant entre -0.13 et -0.92. Le premier axe exprime encore la tendance générale sur le bassin. En examinant, en plus, les projections des points sur les axes 2 et 3, on peut former, à partir des proximités entre les points, quatre groupes de stations. La composition de ces groupes apparaît au tableau 3.5. Encore une fois, on voit que la station de Knowlton a une variation tout à fait particulière.

Les quatre groupes de stations formés sont distincts dans le plan des axes 2 et 3. Les groupes A et D, s'opposent l'un à l'autre dans le plan de ces deux axes, signifiant qu'ils varient inversement. Il en est de même des groupes B et C.

NUMÉRO ET NOM DE LA STATION			
1	BÉTHANIE	11	ST - GUILLAUME
2	BONSECOURS	12	ST - HYACINTHE
3	BRITANNIA-MILLS	13	ST- NAZAIRE
4	BROME	14	ST-VALERIEEN
5	FARNHAM	15	STE-ROSALIE
6	FLEURY	16	SUTTON
7	GRANBY	17	UPTON
8	KNOWLTON	18	VALCOURT
9	ROUGEMONT	19	WARDEN
10	ROXTON-FALLS		

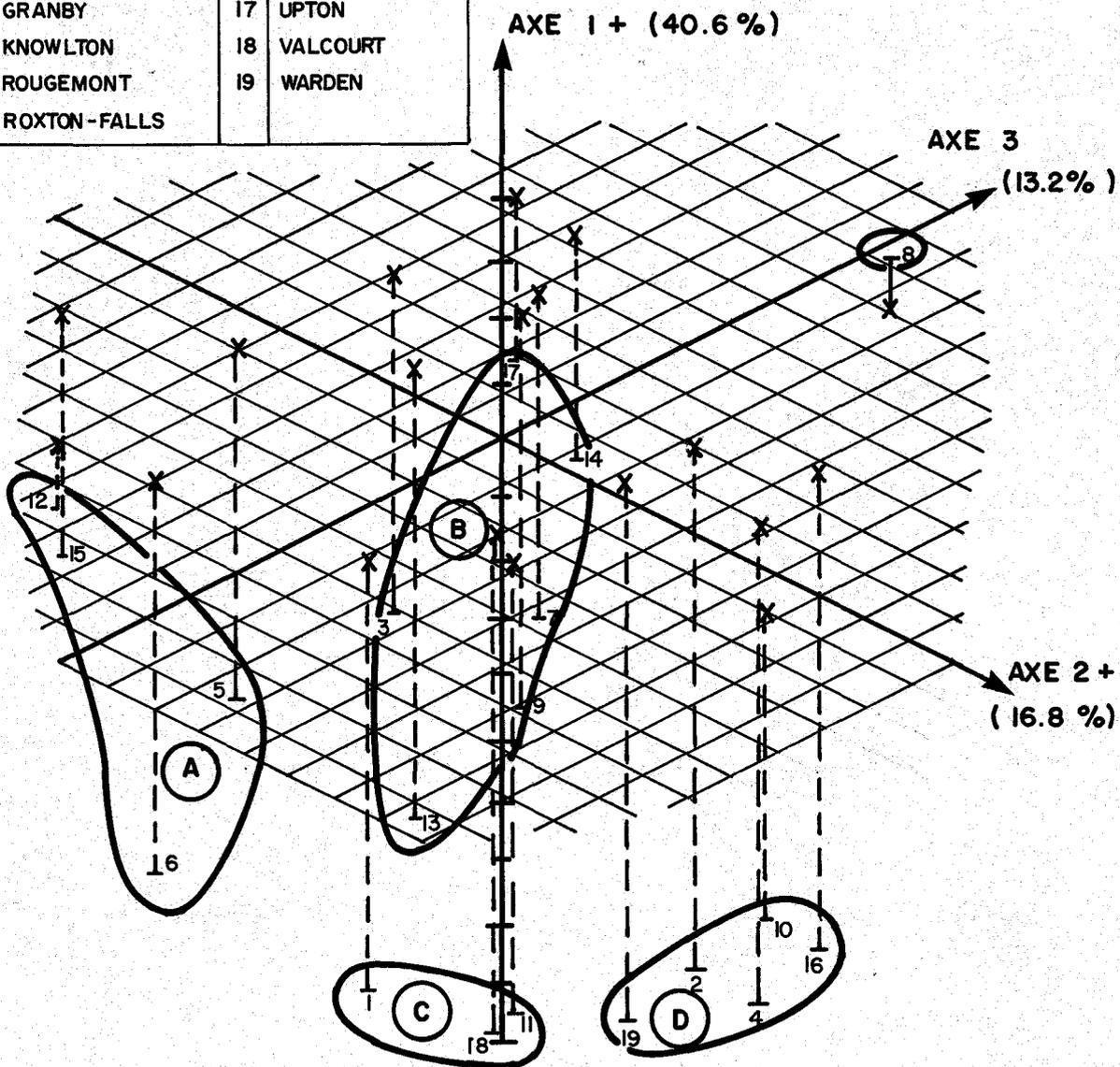


Figure 3.11. Représentation des stations sur les trois premiers axes principaux et groupement des stations de variation semblable (ions hydrogène).

TABLEAU 3.5 : Composition des groupes de stations de variation semblable (ions hydrogène).

GROUPE	IDENTIFICATEURS	STATIONS
A	5 6 12 15	Farnham Fleury St-Hyacinthe Ste-Rosalie
B	3 7 9 13 14 17	Britannia-Mills Granby Rougemont St-Nazaire St-Valérien Upton
C	1 11 18	Béthanie St-Guillaume Valcourt
D	2 4 10 16 19	Bonsecours Brome Roxton-Falls Sutton Warden
-	8	Knowlton

Sur la figure 3.12 qui montre la carte du bassin, on a délimité les zones formées par les groupes de stations. On peut remarquer que la variation spatiale d'amont en aval existe encore, mais elle est moins apparente à cause de la présence de la station de Farnham dans le groupe A et de la station de Saint-Guillaume dans le groupe C. Cependant, la structure spatiale a changé considérablement par rapport à celle observée pour les nitrates et pour les sulfates.

Comportement dans le temps des stations constaté dans le cas des ions hydrogène

Les trois premiers axes principaux tirés de cette analyse expliquent 48.4, 14.3 et 9.1% de la variance totale avec un cumulatif de 63% pour ces trois axes. Sur la figure 3.13, on représente les projections des mois et des stations dans le plan des deux premiers axes.

L'axe 1 exprime encore un gradient de concentration pour les stations à cause de la position de tous les mois sur un côté de l'axe. Sur l'axe 2, on remarque que les mois de juillet, août et septembre 1975 s'opposent aux mois d'hiver indiquant que cet axe exprime l'influence de l'été et de l'hiver sur le comportement des stations.

On a délimité sur cette figure quatre groupes de stations qui sont définies dans le tableau 3.6. Le groupe A est caractérisé par des concentrations faibles en ions hydrogène et conséquemment par des valeurs

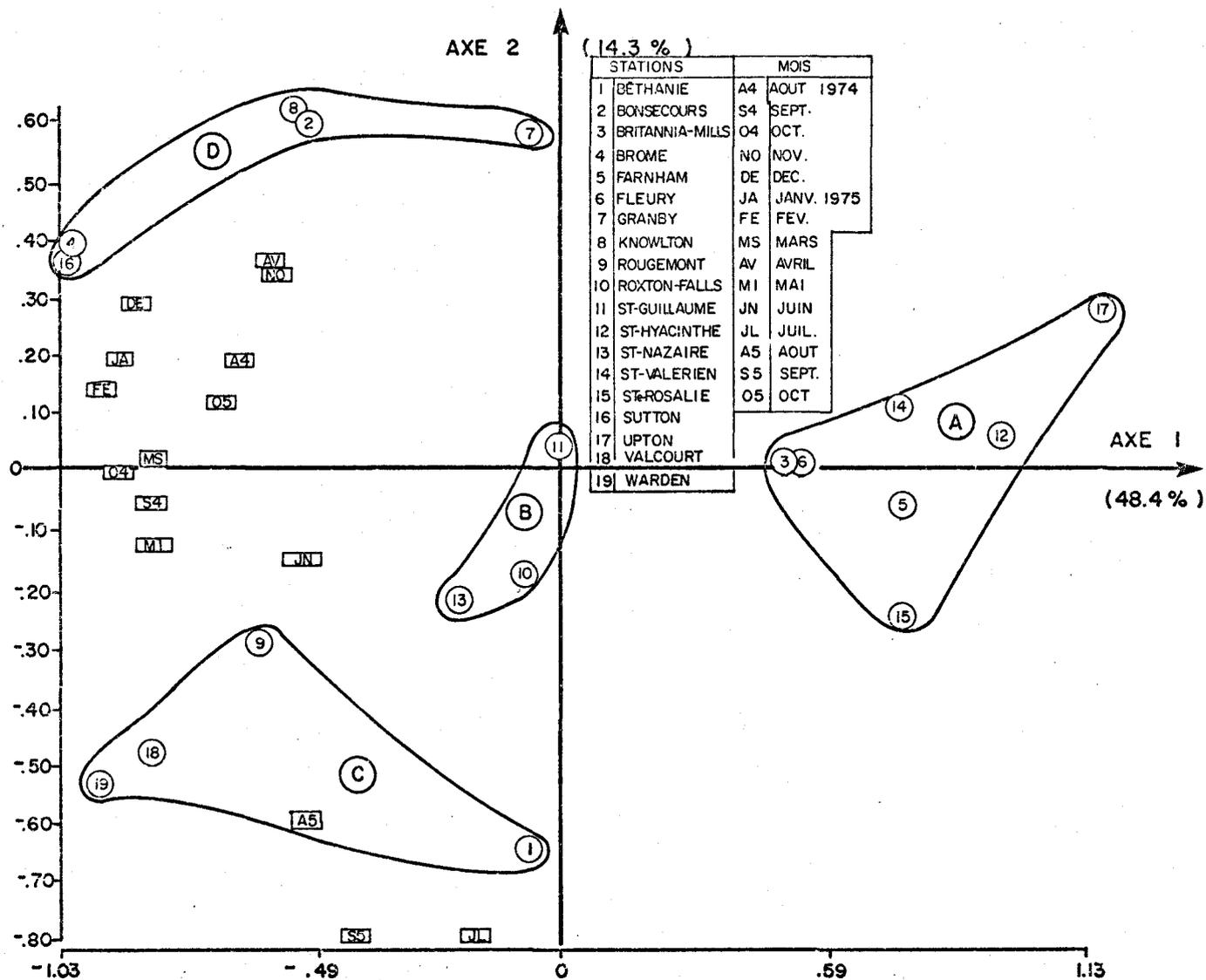


Figure 3.13. Représentation des mois (□) et des stations (○) dans le plan des deux premiers axes principaux et groupement des stations de comportement semblable dans le temps (ions hydrogène).

TABLEAU 3.6 : Composition des groupes de stations de comportement semblable dans le temps (ions hydrogène).

GROUPE	IDENTIFICATEURS	STATIONS
A	3 5 6 12 14 15 17	Britannia-Mills Farnham Fleury St-Hyacinthe St-Valérien Ste-Rosalie Upton
B	10 11 13	Roxton-Falls St-Guillaume St-Nazaire
C	1 9 18 19	Béthanie Rougemont Valcourt Warden
D	2 4 7 8 16	Bonsecours Brome Granby Knowlton Sutton

élevées de pH à cause de l'opposition de ce groupe de stations au groupe de mois sur l'axe 1. Le groupe B est un groupe de transition avec des valeurs intermédiaires de concentration à cause de sa position centrale sur les deux axes. Les groupes C et D qui s'opposent sur l'axe 2 sont caractérisés l'un par des concentrations fortes en été, et faibles en hiver et l'autre, par des concentrations faibles en été et fortes en hiver.

Sur la figure 3.14, on représente les zones délimitées par les groupes. Les moyennes qui y sont présentées ont été transformées en unités de pH. Le groupe A caractérisé par des valeurs faibles en concentration (pH élevé) forme une zone située au nord-ouest du bassin autour de Saint-Hyacinthe. Le groupe B, classé comme un groupe de transition, délimite une zone qui est située plus à l'est de celle du groupe A. Les zones délimitées par les stations des groupes C et D comprennent la partie inférieure du bassin. Ces groupes sont caractérisés par des concentrations élevées (pH faible). Ces deux groupes se distinguent par un comportement différent en été et en hiver.

En comparant la configuration spatiale obtenue ici avec celle obtenue à partir des groupes de station de variation semblable (figure 3.12), on observe encore que la partie aval du bassin caractérisée par des concentrations faibles (pH élevé) varie différemment de la partie amont qui est caractérisée par des concentrations plus fortes (pH faible).

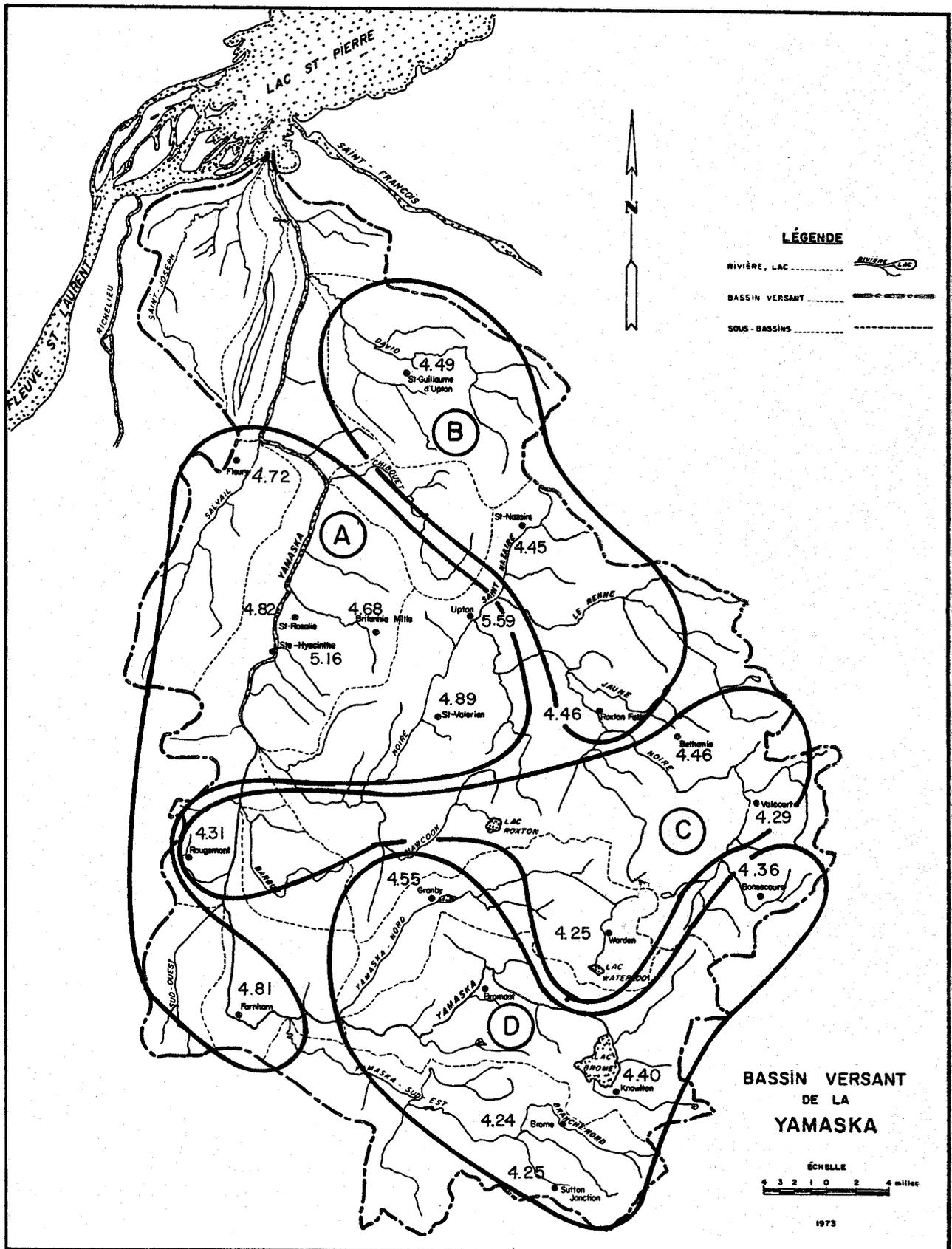


Figure 3.14. Délimitation sur le bassin des zones formées par les groupes de stations qui ont un comportement semblable dans le temps (ions hydrogène) et moyennes calculées aux stations (unité de pH).

La comparaison du comportement des stations en ce qui concerne les ions hydrogène par rapport à celui obtenu avec les sulfates et les nitrates démontre que la structure spatiale est différente. On observe maintenant des concentrations plus faibles dans la partie aval et des concentrations plus fortes dans la partie amont.

CHAPITRE 4

EXEMPLE D'UTILISATION DE L'INTERPOLATION OPTIMUM POUR
REPRESENTER LA VARIABILITE SPATIALE
ET LES ERREURS D'ESTIMATION

4- EXEMPLE D'UTILISATION DE L'INTERPOLATION OPTIMUM POUR REPRÉSENTER LA VARIABILITE SPATIALE ET LES ERREURS D'ESTIMATION

Une des premières méthodes utilisée pour représenter un phénomène dans l'espace à partir d'une série de points de mesure a été de cartographier ce phénomène en traçant des lignes d'iso-valeurs. Cette méthode qui est en somme une interpolation linéaire ne tient pas compte à la fois des particularités des points de mesure, et de la structure spatiale du phénomène. De plus, cette méthode, ne permet pas de déterminer la précision sur l'estimation des iso-valeurs.

Pour pallier à ces faiblesses, Gandin (1963; 1970) a développé une méthode d'analyse, "Interpolation optimum", qui tient compte à la fois de la structure spatiale du phénomène et des particularités dans le comportement des paramètres aux stations; elle permet en outre de minimiser la variance d'estimation et de calculer cette variance.

Cette méthode dont l'utilisation semble efficace pour la planification d'un réseau est décrite brièvement en annexe D. Pour en démontrer les avantages nous l'avons utilisé pour analyser le comportement dans l'espace des sulfates, des nitrates et des ions hydrogène.

4.1 Sulfates

Pour obtenir la fonction de structure dans l'espace, on a utilisé les valeurs mesurées à 16 stations pendant les 15 mois d'observation; les

stations Saint-Hyacinthe, Saint-Valérien et Upton ont été éliminées, car des essais préliminaires avaient montré que ces trois stations sont hétérogènes par rapport à l'ensemble¹. La figure 4.1 nous montre les points calculés de la fonction de structure et la courbe exponentielle ajustée à ces points.

L'étude de cette courbe révèle que l'ordonnée à l'origine a une valeur relativement élevée. Théoriquement, ceci peut être expliqué soit par des erreurs de mesures importantes, soit par des micro-variations que le réseau actuel ne peut mesurer.

Connaissant la fonction de structure dans l'espace pour les concentrations de sulfate mesurées dans les précipitations, on peut à l'aide de l'interpolation optimum déterminer la carte d'iso-valeur des concentrations moyennes et la carte d'iso-erreur d'estimation de cette moyenne.

Pour calculer les courbes d'iso-concentration moyennes de sulfate (figure 4.2) on a utilisé les 19 stations. Sur cette figure sont également portées les valeurs moyennes calculées aux stations. La partie sud-est du bassin présente des concentrations plus faibles tandis que le maximum se situe au nord-ouest du bassin dans la région de Saint-Hyacinthe.

Ce tracé de courbes par la méthode d'interpolation optimum diffère beaucoup d'un tracé à la main. On voit par exemple que dans la région

¹ L'analyse en composantes principales faites à la section 3.3.2 avait fait ressortir des particularités aux stations Saint-Hyacinthe et Saint-Valérien. Dans cette analyse la station Upton aurait pu à la rigueur être considérée comme hétérogène (figure 3.9).

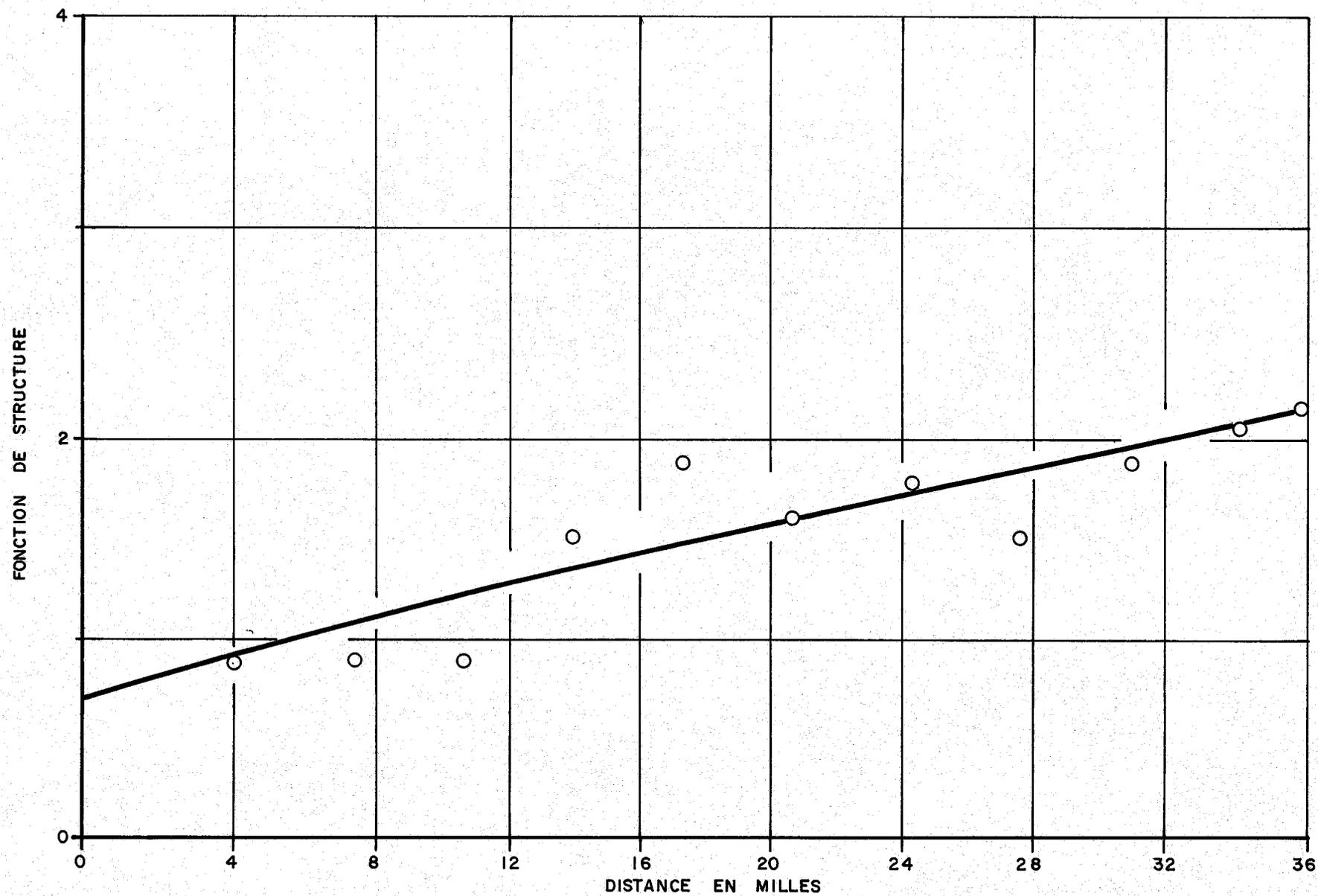


Figure 4.1. Fonction de structure dans l'espace pour les sulfates dans les précipitations.

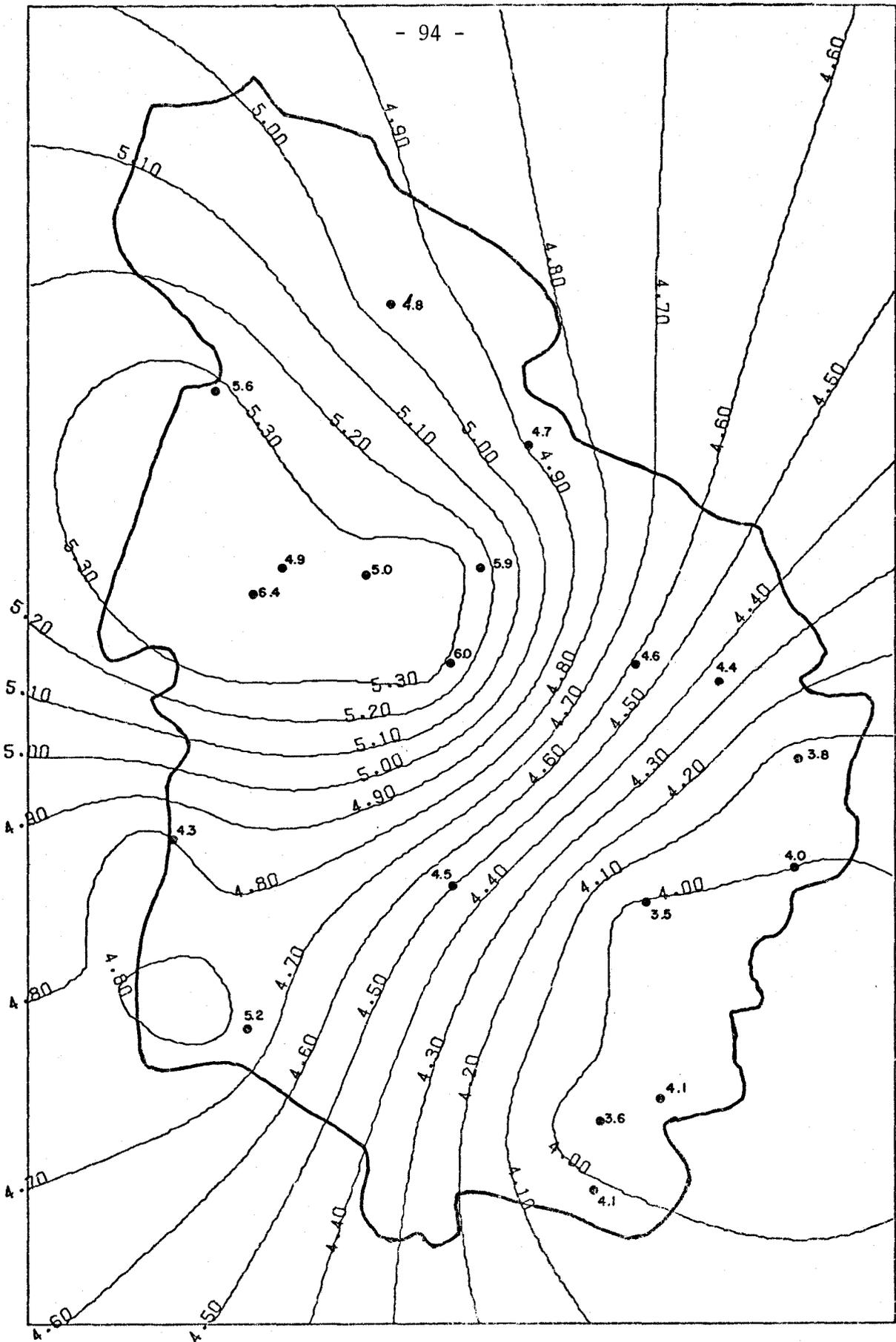


Figure 4.2. Concentrations moyennes en sulfates (mg SO₄/l) observées et calculées par interpolation optimum dans les précipitations sur le bassin de la rivière Yamaska.

de Saint-Valérien l'iso-maximum est de 5.3 alors que la valeur moyenne observée pour Saint-Hyacinthe est de 6.4. Dans la région de Warden, l'iso-valeur calculé est d'environ 4 alors qu'à la station on observe 3.5. Ces écarts sont normaux si l'on considère que la fonction de structure a donné une erreur de mesure assez importante. Si l'on fait les calculs avec une fonction de structure dont l'ordonnée à l'origine (erreur de mesure) est zéro, on obtient un interpolateur exact et les iso-valeurs obtenues s'approchent des valeurs observées.

La figure 4.3 donnant l'écart type d'estimation montre que l'erreur est maximum dans la partie nord du bassin et minimum dans la partie centrale. Dans cette partie, on voit peu de variation de l'écart type d'estimation à cause de la résolution choisie pour tracer les courbes. Pour cette partie, l'écart type d'estimation se situe entre 1.0 et 1.1.

Pour la planification d'un réseau, cette dernière représentation est importante car elle renseigne sur les régions dans lesquelles l'estimation du phénomène est le plus entaché d'erreur. De plus, il est possible de recalculer l'écart type d'estimation après implantation, soustraction ou déplacement des stations afin d'analyser l'influence des modifications du réseau.

4.2 Nitrates

La fonction de structure des nitrates (figure 4.4) a été calculée avec les 19 stations. L'ordonnée à l'origine dans ce cas a également une valeur assez élevée.

La figure 4.5 montre les courbes d'iso-concentration de nitrates

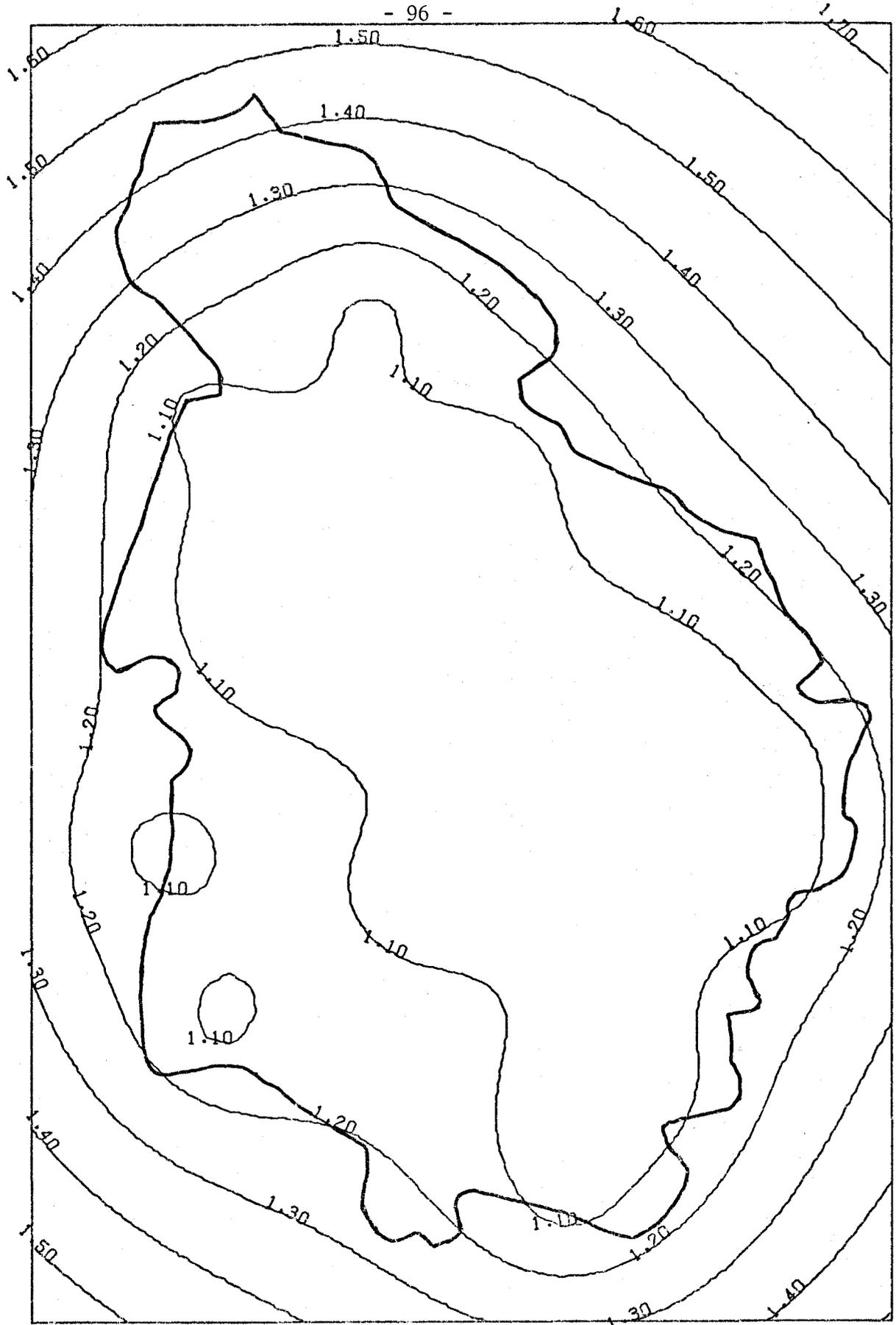


Figure 4.3. Ecart type d'estimation des concentrations moyennes en sulfates (mg SO₄/l) déterminé par interpolation optimum sur le bassin de la rivière Yamaska.

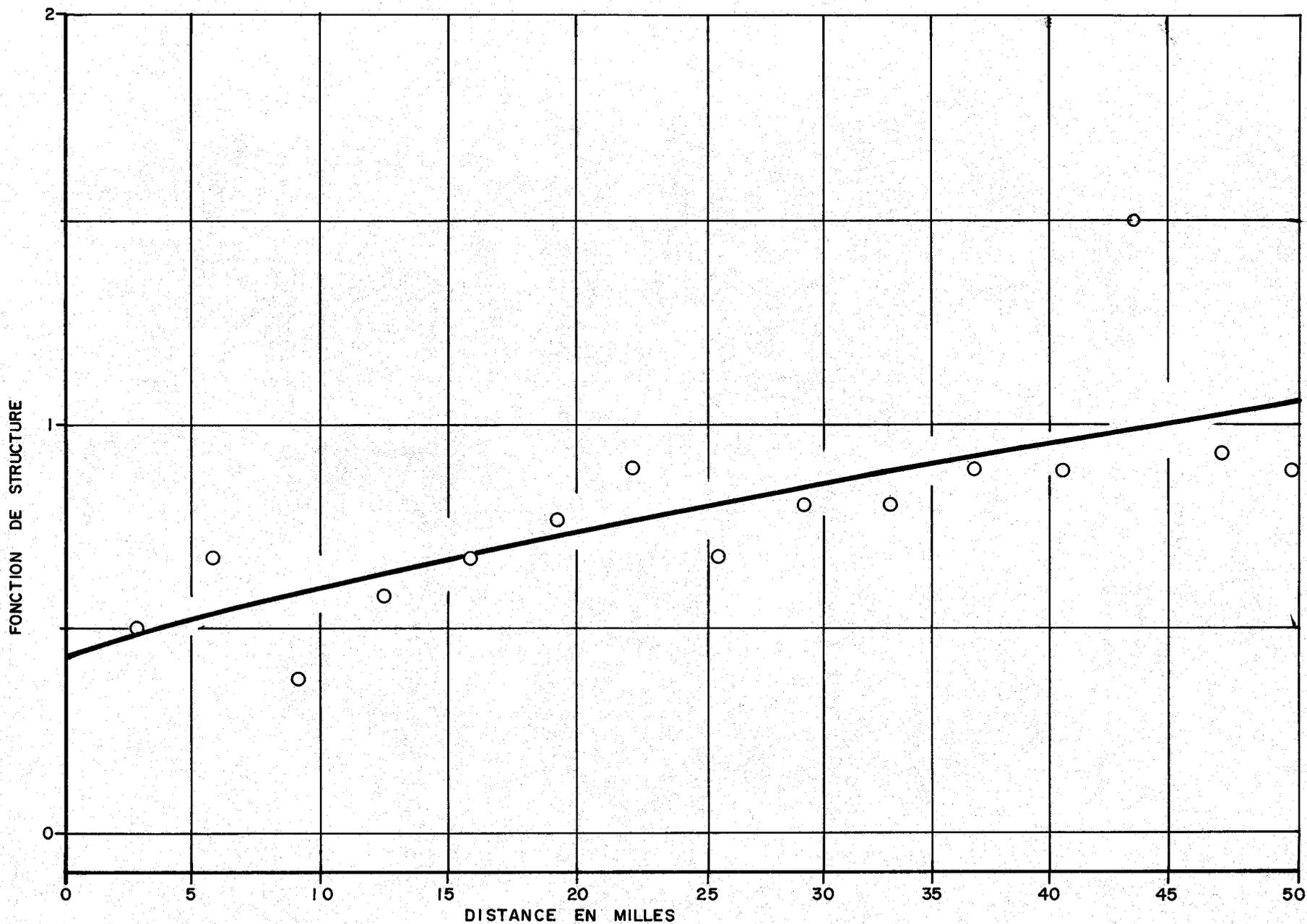


Figure 4.4. Fonction de structure dans l'espace pour les nitrates dans les précipitations.

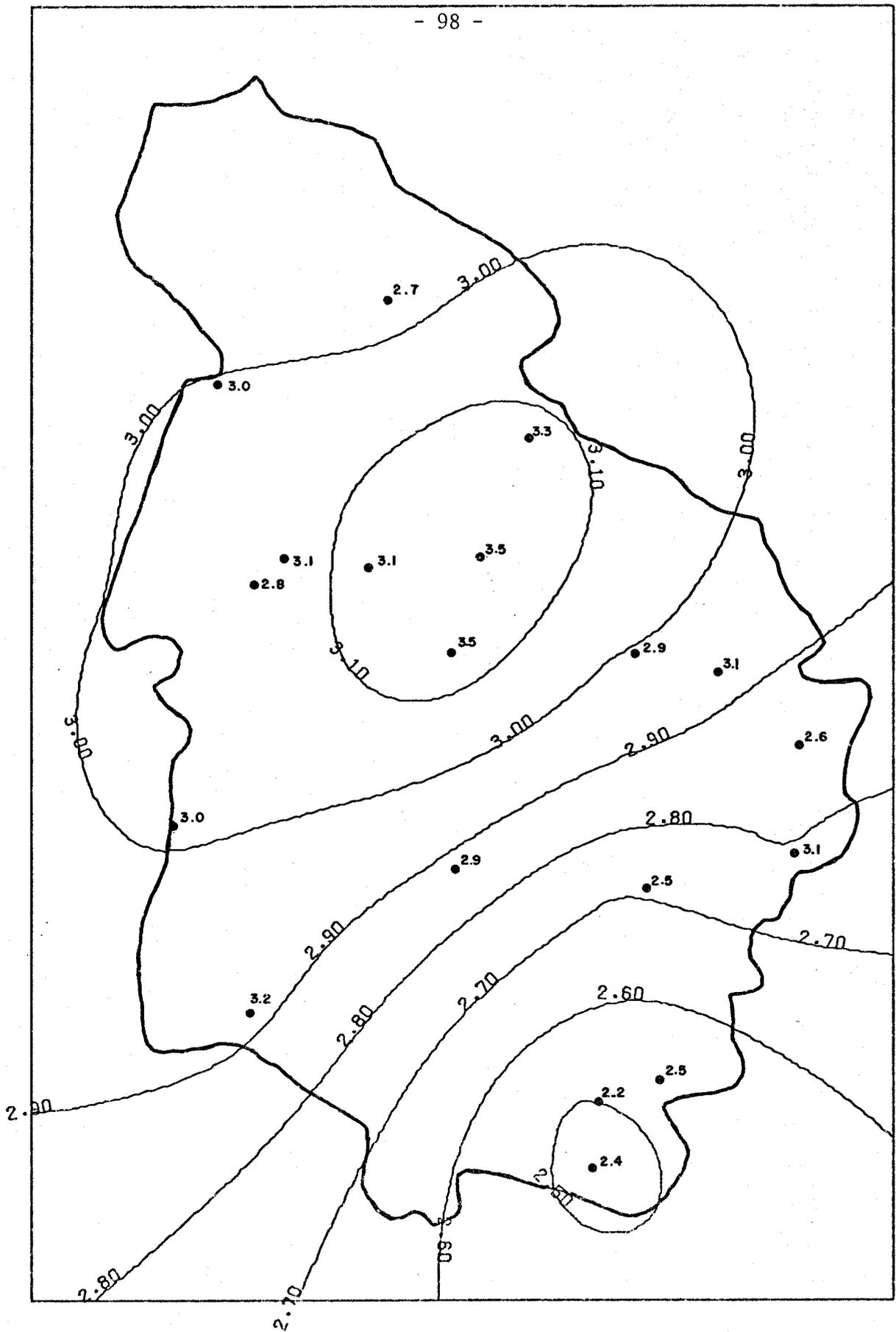


Figure 4.5. Concentrations moyennes en nitrates (mg NO₃/l), mesurées et calculées par interpolation optimum dans les précipitations sur le bassin de la rivière Yamaska.

sur le bassin versant et les valeurs observées à chacune des stations. La configuration des lignes est semblable à celles obtenues avec les sulfates. Les concentrations les plus faibles apparaissent au sud du bassin versant tandis que les plus fortes se situent légèrement au nord de la partie centrale du bassin versant correspondant à la région la plus habitée.

Les écarts types de l'estimation qui sont donnés à la figure 4.6, montrent encore que les erreurs sont les plus faibles dans la partie centrale du bassin versant.

4.3 Ions hydrogène

Pour le calcul de la fonction de structure des ions hydrogène (figure 4.7) les stations Knowlton, Saint-Hyacinthe et Upton ont été éliminées à cause de l'hétérogénéité de leurs moyennes observées. Si l'on étudie cette fonction de structure, on voit une grande dispersion des points pour les distances supérieures à 35 milles; cette absence de structure peut être prise en compte en limitant à 35 milles l'influence des stations dans l'interpolation.

La figure 4.9 montre les courbes de concentration moyenne en ions hydrogène sur le bassin versant. La partie sud du bassin, la partie la moins habitée, montre de fortes valeurs tandis que la partie centrale du bassin est caractérisée par des valeurs plus faibles.

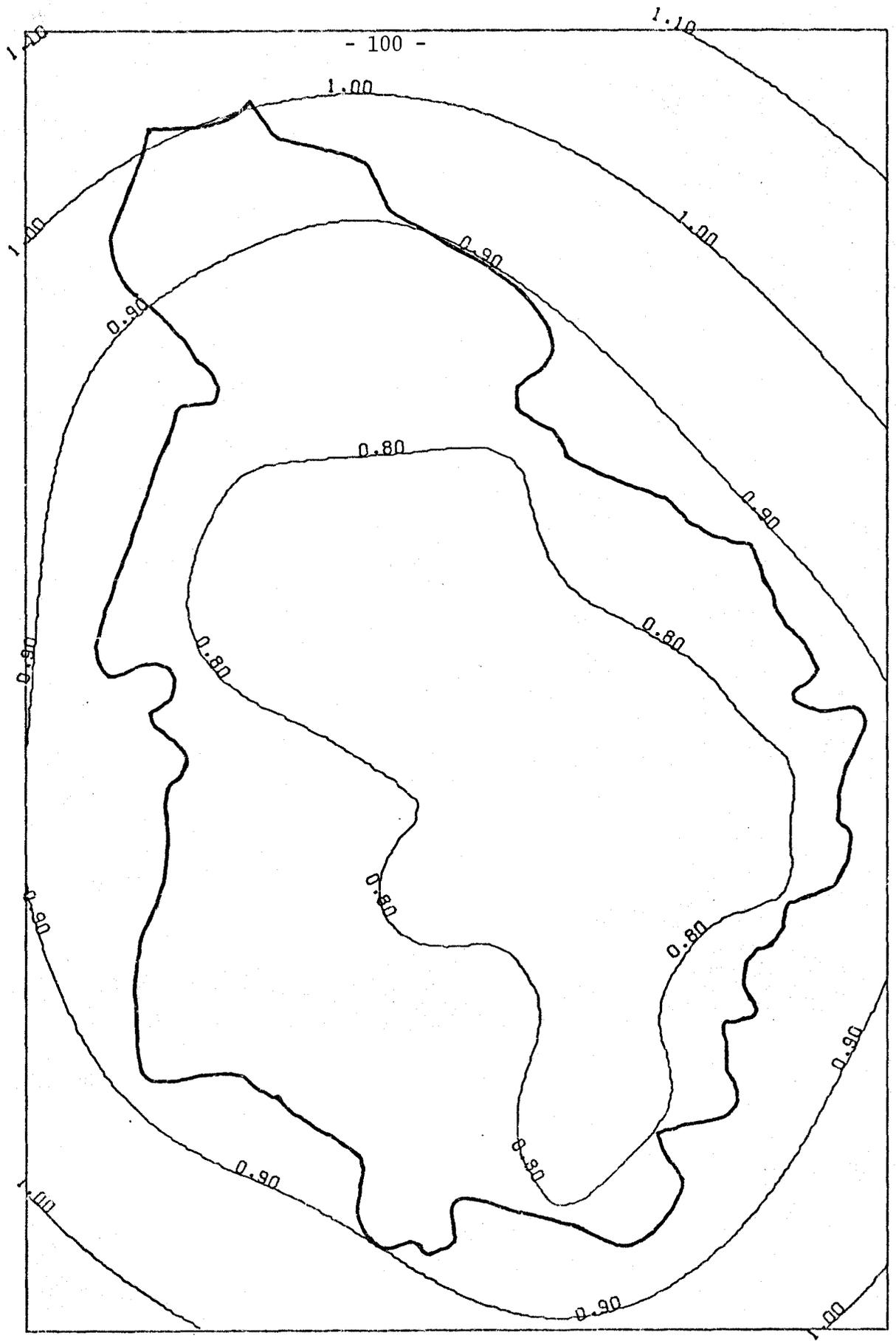


Figure 4.6. Ecart type d'estimation des concentrations moyennes en nitrates ($\text{mg NO}_3/\text{l}$) déterminé par interpolation optimum sur le bassin de la rivière Yamaska.

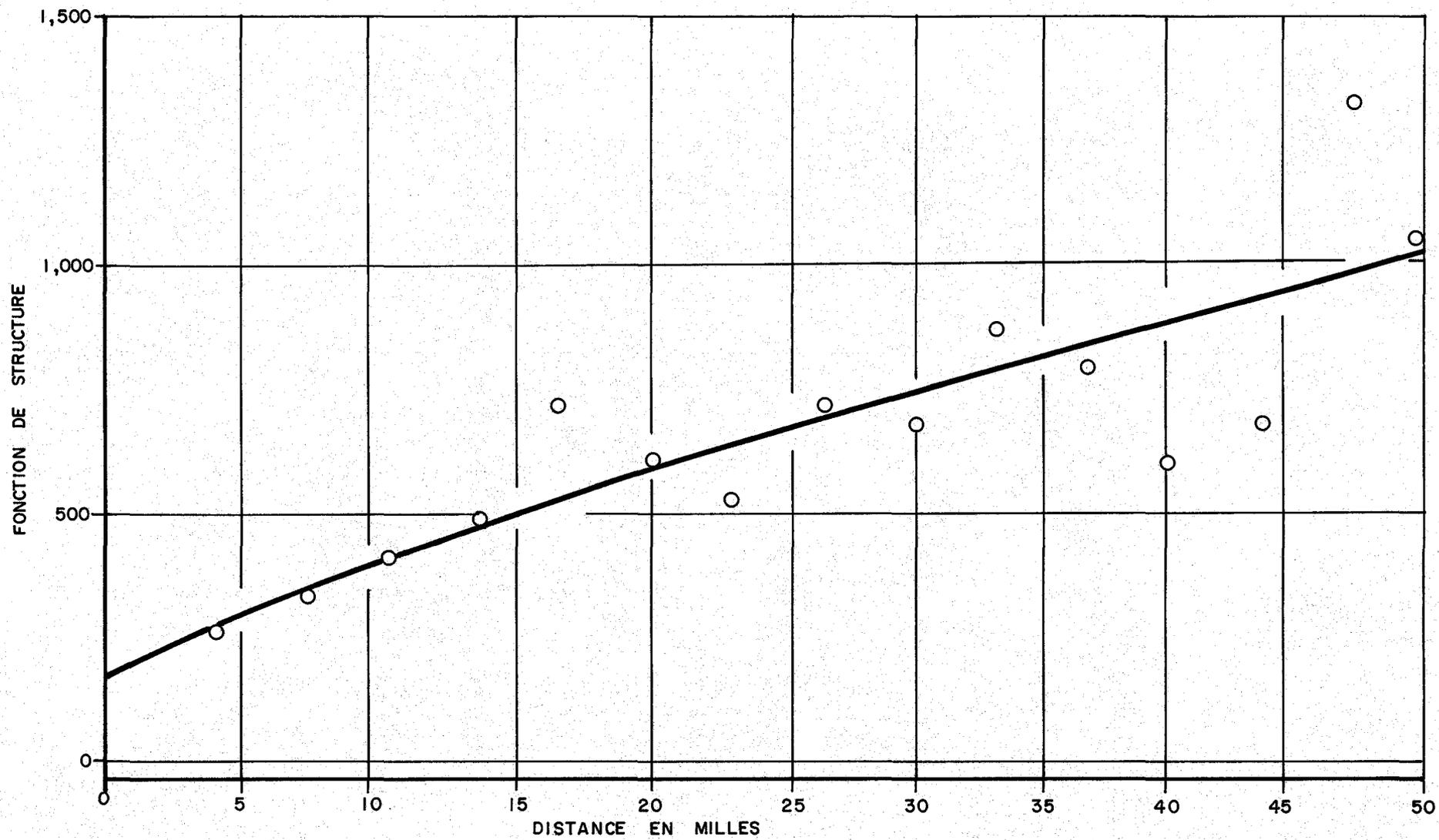


Figure 4.7. Fonction de structure dans l'espace pour les ions hydrogène dans les précipitations.

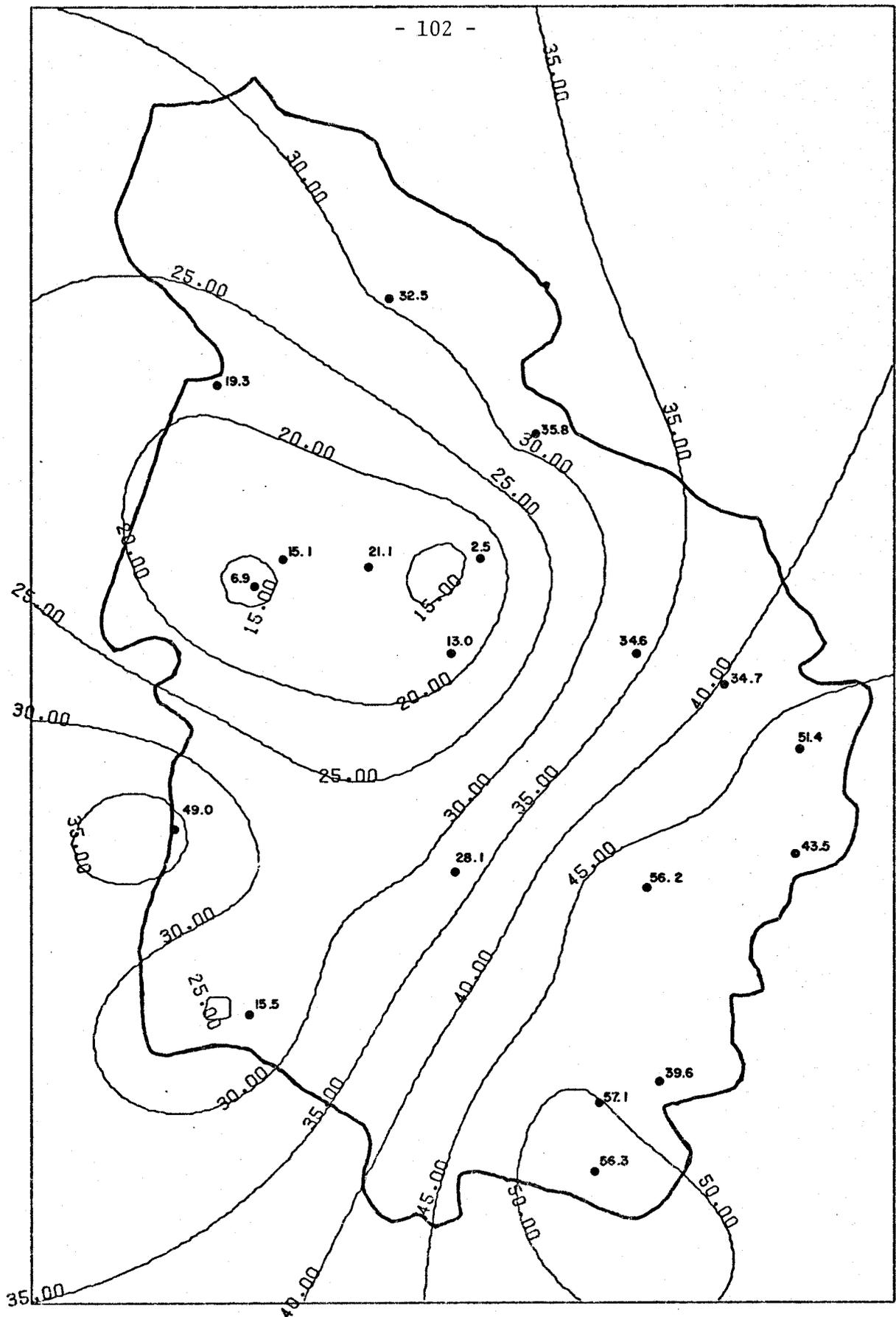


Figure 4.8. Concentrations moyennes en ions hydrogène ($\mu\text{g H/l}$) mesurées et calculées par interpolation optimum dans les précipitations sur le bassin de la rivière Yamaska.

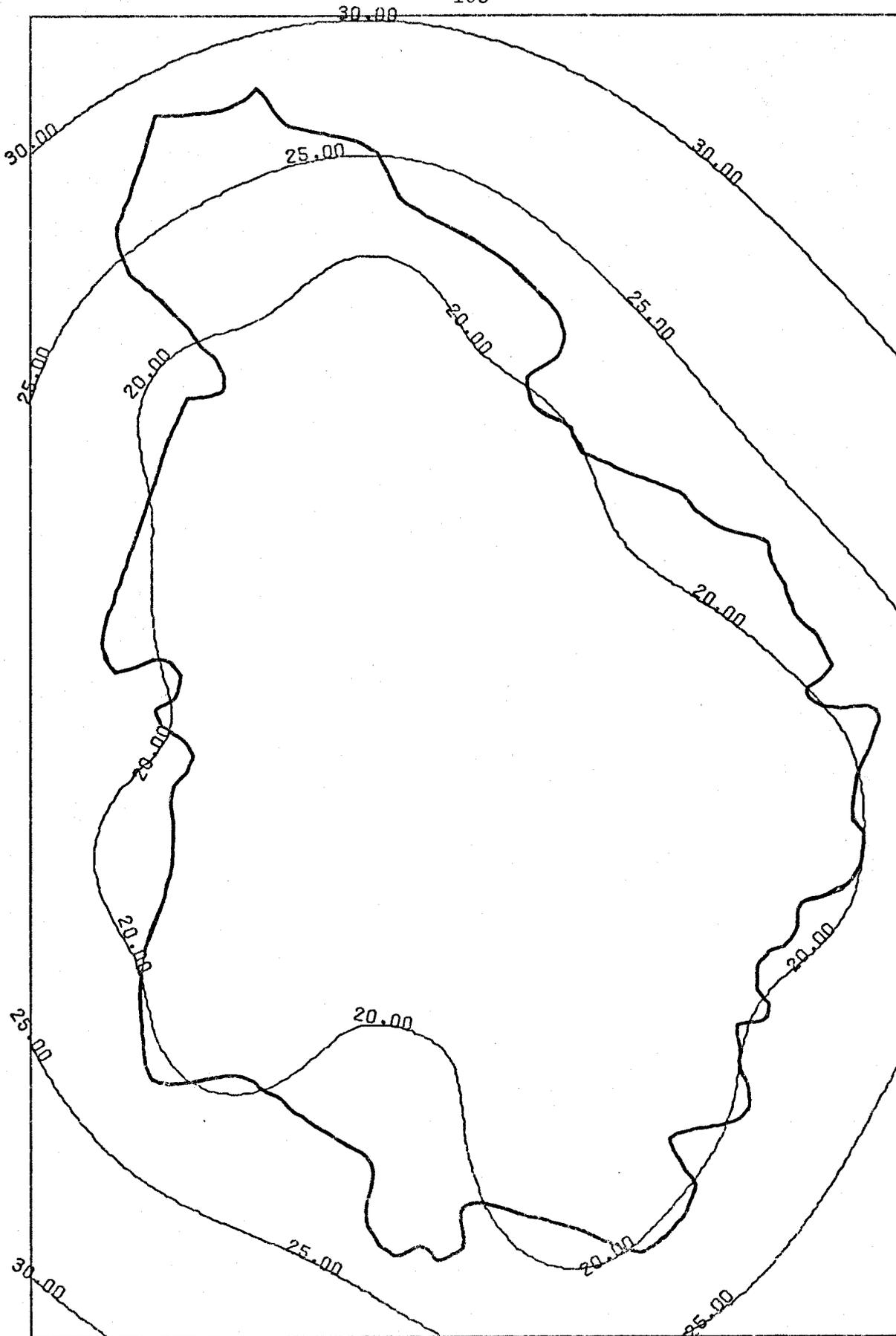


Figure 4.9. Ecart type d'estimation des concentrations moyennes en ions hydrogène ($\mu\text{g H/l}$) déterminé par interpolation optimum sur le bassin de la rivière Yamaska.

Bien que les valeurs moyennes observées aux stations Saint-Hyacinthe et Upton soient respectivement de 6.9 et 2.5 $\mu\text{g H/l}$, les courbes minimums obtenues sont de 15 $\mu\text{g H/l}$.

La figure 4.9 qui donne l'écart type de l'estimé montre peu de variation sur tout le bassin. Ceci provient de l'erreur importante aux points observations démontrée par la forte valeur de l'ordonnée à l'origine de la fonction de structure.

CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

L'établissement sur un bassin d'un nouveau réseau d'acquisition de données sur la qualité chimique des précipitations (solides ou liquides), la réduction d'un réseau existant pour des fins spécifiques ou son extension à une échelle plus grande ne peuvent se concevoir sans l'exploitation au maximum des données acquises. Les informations obtenues de l'examen et du traitement de ces données permettant d'une part, de détecter certains problèmes de détérioration de la qualité des précipitations et d'autre part, de tirer profit de la méthodologie d'acquisition élaborée, sont indispensables à la définition des objectifs nécessaires à l'établissement de tels réseaux. Avant de traiter des critères servant de guide à l'élaboration d'un nouveau réseau ou à la consolidation d'un réseau existant, il est nécessaire d'évaluer la qualité de l'information obtenue dans cette étude, en particulier la méthodologie d'échantillonnage utilisée et l'efficacité d'un réseau de cette densité pour évaluer la variabilité spatio-temporelle de la qualité des précipitation.

L'échantillonnage

La technique d'échantillonnage utilisée dans cette étude et rapportée par Lachance et Sasseville (1976) consistait en la cueillette d'échantillons de pluie ou de neige intégrant les retombées globales

mensuelles sans discrimination entre les retombées sèches ou humides. Durant la période de température moyenne supérieure à 0°C, des observateurs météorologiques recueillaient l'eau des précipitations lors d'observations météorologiques et la congelaient pour la préserver. L'évaluation de ce protocole d'échantillonnage n'a pas fait l'objet d'études spécifiques poussées; il est cependant important d'en considérer les faiblesses avant de tirer des conclusions sur la qualité de l'information acquise. A la lumière du traitement statistique effectué sur les données et des connaissances obtenues de travaux récents (Galloway et Likens, 1976; Wiebe, 1975), on peut faire une évaluation sommaire du protocole d'échantillonnage et en particulier du fait de recueillir les retombées sèches ou humides.

L'effet des retombées sèches

L'utilisation de collecteurs continuellement ouverts entraîne des risques de contamination causées principalement par les poussières locales soulevées à proximité et par les matières fécales d'oiseaux qui viennent se poser sur les collecteurs. Il était habituellement facile de détecter les échantillons contaminés par les oiseaux en se basant sur les renseignements fournis par les observateurs et sur les concentrations anormalement élevées en N_{org} , K et P. Par ailleurs, les contaminations, provenant des poussières locales peuvent affecter les concentrations des

autres substances à des degrés divers. D'après les travaux de Gallo-way et Likens (1976), les concentrations de calcium, de magnésium et de phosphates sont les paramètres physico-chimiques les plus affectés par ce genre de contamination. Les concentrations de sulfate, de nitrate et d'azote ammoniacal sont peu affectées, tandis que le pH a tendance à s'élever, indiquant que les concentrations en ions hydrogène mesurées au cours de cette étude seraient un peu sous-estimées.

Au cours de notre étude, on a constaté des concentrations relativement élevées en potassium, phosphore et azote organique durant la saison estivale, ainsi qu'en sodium et chlorure durant les mois d'hiver (voir la figure 3.2). On peut facielement conclure que les poussières locales soulevées par les diverses opérations agricoles sont en grande partie responsables des niveaux de concentration obtenus en été, la majorité des stations étant situées en milieu rural. On peut déduire également que les concentrations élevées en sodium et chlorure sont dues aux sels de déglacage utilisés sur les routes en hiver. De leur côté les concentrations de calcium, de magnésium, d'azote ammoniacal et de carbone organique ont toutes été influencées, mais à un degré moindre. Ces paramètres ne présentent pas de configuration spatiale apparente. Les concentrations de sulfate et de nitrate ainsi que le pH sont les seuls paramètres présentant une distribution spatiale bien définie, confirmant ainsi qu'ils sont moins affectés que les autres

paramètres par les contaminations provenant des retombées sèches.

L'efficacité du réseau

L'étude de l'évolution spatiale des nitrates, des sulfates et de l'acidité a permis d'évaluer jusqu'à un certain point l'efficacité d'un réseau dense (une station par 260 km² environ). Malgré la courte période d'observation (15 mois), il a été possible d'étudier les interrelations entre stations et de grouper les stations de comportement semblable; ces groupes de stations correspondent à des régions bien délimitées sur le bassin. En effet, l'analyse des interrelations a permis de faire ressortir des variations différentes pour les stations situées dans la région sud du bassin et celles situées dans la partie centrale nord. Ainsi, dans l'hypothèse où ce réseau continuerait à fonctionner, il serait facile de réduire le nombre de stations sur ce bassin tout en conservant le maximum d'informations possibles sur les variations spatiales de ces paramètres.

Malgré une densité de stations élevées, on a observé que l'erreur d'estimation pour les nitrates, les sulfates et les ions hydrogène était appréciable. L'écart type d'estimation, par interpolation optimum, des concentrations moyennes se situait autour de 20 à 30% pour les sulfates et variait de 50 à 100% pour les concentrations en ions hydrogène (voir les figures 4.3, 4.6 et 4.9). Cette grande erreur

d'estimation peut s'expliquer par la courte période d'observation et par une erreur de mesure relativement élevée.

L'évolution spatiale des paramètres

L'examen de la configuration spatiale établie à partir des variations des concentrations de sulfate et de pH (figures 3.10 et 3.14) fournit des indications importantes sur les mécanismes contribuant à l'acidification des précipitations. Les régions où la densité de population est élevée et l'industrie très active affichent des concentrations plus élevées en sulfates et plus faibles en ions hydrogène. Par contre dans la région moins habitée située au sud du bassin, on observe le phénomène inverse. L'évolution différente de ces deux paramètres selon la situation géographique des stations d'échantillonnage indique que les retombées de substances sulfureuses peuvent avoir une influence différente selon la distance franchie dans leur transport aérien. Ces résultats obtenus sont conformes à ceux obtenus par Moss (1975).

Critères pour la planification d'un réseau

L'expérience acquise au cours de ces travaux peut s'avérer un atout précieux pour le gestionnaire désireux de planifier des études spécifiques sur la qualité chimique des précipitations ou des études plus générales sur l'évolution de la qualité de l'eau dans le cycle hydrologique.

Ainsi le gestionnaire doit donc d'abord s'interroger sur la rentabilité d'un réseau de cette nature, étendu à un territoire plus vaste, comme celui du Québec, même avec une densité de stations d'échantillonnage trois à quatre fois moins élevée; cette étape est indispensable à toute approche rationnelle du problème à cause des contraintes logistiques imposées au protocole d'échantillonnage, du coût énorme rattaché au fonctionnement d'un tel réseau et de la faible rentabilité réelle obtenue avec les réseaux d'acquisition de données à objectifs trop généraux.

La méthodologie d'étude développée et utilisée sur le bassin de la rivière Yamaska peut aisément être transposée sur un autre bassin dans le cadre d'études plus spécifiques avec des modifications tenant compte des contraintes environnementales différentes et des améliorations techniques dans le protocole d'échantillonnage. Rappelons cependant que la réussite de ce genre d'étude est intimement liée à la définition d'objectifs précis. La densité des stations et le genre de paramètres à mesurer dépendent directement de la nature des objectifs poursuivis; le niveau de perception des phénomènes et la précision désirée dans la mesure des paramètres sont conditionnées par la durée et la fréquence d'échantillonnage. A leur tour, la durée et la fréquence d'échantillonnage doivent tenir compte des sommes investies dans l'étude qui dépendent de l'importance des objectifs poursuivis. De plus, il faut considérer le type de traitement statistique des données désirées, élément de l'analyse trop souvent négligé; les méthodes statistiques utilisées imposent souvent des

contraintes importantes au plan d'échantillonnage.

La détermination de la densité des stations d'échantillonnage dans le cadre d'études spéciales doit être faite selon la nature des objectifs poursuivis et doit tenir compte de certaines contraintes reliées à la difficulté d'obtenir une mesure suffisamment précise des phénomènes. Karol et Myatch (1972), utilisant une technique statistique analogue à l'interpolation optimum pour évaluer les erreurs d'estimation sur les apports en substances chimiques provenant des précipitations, ont calculé que la distance moyenne entre chaque paire de stations voisines doit être de l'ordre de 100 km pour que l'erreur aléatoire d'observation ne dépasse pas en valeur absolue la concentration totale interpolée en un point. Ils ont conclu qu'un réseau opéré avec des stations situées à 1000 km l'une de l'autre serait trop peu dense pour évaluer suffisamment la composition chimique des précipitations à partir de mesures obtenues sur des échantillons mensuels des précipitations. A cet égard, la densité du réseau actuel aux Etats-Unis, rapportée par Miller (1974) (17 stations réparties à la grandeur du pays) est nettement insuffisante.

Les méthodes statistiques sommaires (moyennes, écarts type, histogrammes, etc...), utilisées couramment pour caractériser la qualité des précipitations, ne suffisent plus, dans le contexte actuel, à améliorer les connaissances sur les processus; en ce sens ces études ne peuvent

justifier les montants d'argent investis. Les méthodes statistiques multidimensionnelles, comme l'analyse en composantes principales, l'analyse factorielle des correspondances, l'interpolation optimum sont une alternative intéressante, mais porteuse de ses propres exigences: il faut d'abord que les données recueillies à chaque station soient prises simultanément, que les valeurs manquantes soient réduites au minimum et enfin que la durée et la fréquence d'échantillonnage permettent d'obtenir un nombre d'observations suffisamment élevées pour que l'échantillonnage soit représentatif du phénomène. D'autres méthodes statistiques peuvent être envisagées pour analyser des tendances à long terme ou pour prédire des valeurs extrêmes; toutes ces méthodes, en général, sont assujetties à la fiabilité des mesures et à la représentativité de l'échantillonnage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAHAMSEN, G. (1976).
Acid precipitation - effects on forest ecosystems. *Ecol. Bull.*
(Stockholm). 21: 79-86.
- ANONYME. (1972).
Sulphur pollution accros national boundaries. *Ambio*. 1(1): 15-20.
- BARRET, E. et G. BRODIN. (1955).
The acidity of Sandinavian precipitation. *Tellus* 7(2): 251-257.
- BEAMISH, R.J. et H.H. HARVEY. (1972).
Acidification of the La Cloche Mountain Lakes, Ontario, and resul-
ting fish mortalities. *Fish. Res. Board of Can.* 29(8): 1131-1143.
- BROSSET, C. (1973).
Air-borne acid. *Ambio* 2(1-2): 2-9.
- BROUZES, R.J.P., R.A.N. McLEAN et G.H. TOMLINSON. (1977).
Mercury-the link between pH of natural waters and the mercury content
of fish. Meeting of the U.S. National Academy of Sciences. National
Research Council Pamelon mercury. Washington, 3th May.
- COGBILL, C.Y. et G.E. LIKENS. (1974).
Acid precipitation in the Northeastern United States. *Water Resources
Res.* 10(6): 1133-1137.
- ERIKSSON, E. (1952).
Composition of atmospheric precipitation I. Nitrogen compounds. *Tellus*
4: 215-232.
- FISHER, D.W., A.W. GAMBELL, G.E. LIKENS et F.H. BORMANN. (1968).
Atmospheric contributions to the water quality of streams in the Hub-
bard Brook Experimental Forest New Hampshire. *Water Resources Res.*
4: 1115-1126.
- FROHLIGER, J.O. et R. KANE. (1975).
Precipitation: its acidic nature. *Science* 189: 455-457.
- GALLOWAY, J.N., G.E. LIKENS et E.S. EDGERTON. (1976).
Acid precipitation in Northeastern United States: pH and acidity.
Science 194: 722-724.
- GALLOWAY, J.N. et G.E. LIKENS. (1976).
Calibration of collection procedures for the determination of precipi-
tation chemistry. *Water, air and soil pollution*. 6: 241-258.

- GANDIN, L.S. (1963).
Objective analyses of meteorological fields. Leningrad. Translate from russian by "Israel Program for Scientific translations", Jerusalem, 1965.
- GANDIN, L.S. (1970).
The planning of meteorological station networks. WMO Technical Note No 111.
- GATZ, D.F. (1976).
Comment on "Acid Precipitation in the Northeastern United States" by C.V. Cogbill and G.E. Likens. Water Resources Res. 12(3): 569-570.
- GORHAM, E. (1961).
Factors influencing supply of major ions to Inland Waters, with special reference to the atmosphere. Geological Survey of American Bulletin 72: 795-840.
- HALL, A.D. et N.H.J. MILLER. (1911).
On the absorption of ammonia from the atmosphere. J. Agr. Sci. 4: 56-68.
- HOGSTROM, U. (1973).
Residence time of Sulfurous pollutants from a local source during precipitation. AMBIO 2(1-2): 37-41.
- HOGSTROM, U. (1974).
Wet fallont of sulfurous pollutants emitted from a city during rain or snow. Atmospheric Environment 8: 1291-1303.
- JUNGE, C.E. (1958).
The distribution of ammonia and nitrate in rain water over the United States. Trans. Am. Geophys. Union 39: 241-248.
- JUNGE, C.E. (1963).
Air chemistry and radioactivity. Academic Press. New York and London.
- KAROL, I.L. et L.T. MYATCH. (1972).
Contribution to the planning of the station networks for measuring the chemical composition of precipitation. Tellus 24(5): 421-427.
- LACHANCE, M. et J.L. SASSEVILLE. (1976).
Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Volume 4: secteur des eaux atmosphériques. INRS-Eau, rapport scientifique no. 54, 50 p. (rapport soumis au ministère des Richesses naturelles, Québec).

- LIKENS, G.E., F.H. BORMANN, R.S. PIERCE et D.W. FISHER. (1971).
Nutrient hydrologic cycle interaction in small forested watershed-ecosystem. In productivity of forest ecosystems, Proc. Brussels Symp. 1969. UNESCO 1971: 553-563.
- LIKENS, G.E. et F.H. BORMANN. (1972).
Nutrient cycling in ecosystems. In ecosystem structure and fonctions Ed. J.A. Wiens. Oregon State University Press.
- LIKENS, G.E., F.H. BORMANN et N.M. JOHNSON. (1972).
Acid Rain. Environment. 14(2): 33-40
- LIKENS, G.E., N.M. JOHNSON, J.N. GALLOWAY et F.H. BORMANN. (1976).
Acid precipitation: strong and weak acids. Science 194: 643-645.
- LIKENS, G. (1976).
Acid precipitation. C and EN special report: Nov. 22: 29-44.
- MILLER, J.M. (1974).
The precipitation chemistry network in the United States. Present and future. Presented at the Amer. Geophysical Union, 55(4), Washignton.
- MOSS, M.R. (1975).
Spatial patterns of precipitation reaction. Environ. Pollution 8(4): 301-315.
- NEWMAN, L. (1975).
Acidity in rain water: has an explanation been presented? Science 188: 957-958.
- OSTERGAARD. (1974).
The problem of regional transportation of air pollutants in northern Europe. Clean Air V/I, 8(2): 30-32.
- REITER, R. et M. REITER. (1961).
Relations between the contents of nitrate and nitrite ions in precipitations and simultaneous atmospheric electric processes. Recent advances in atmospheric electricity. Ed. L.G. Smith.
- SCHINDLER, D.W., R.W. NEWBURY, K.G. BEATY et P. CAMPBELL. (1976).
Natural water and chemical budgets for a small precambrian lake. J. Fish. Res. Board Can. 33(11): 2526-2543.
- SCHNEIDER, S.H. (1976).
The genesis strategy climate and global survival. Plenum Press. New York and London.

- SCHOFIELD, C.L. (1976).
Acid precipitation. Effets on fish. *Ambio* 5(5-6): 228-230.
- SHIOMI, M.T. et K.W. KUNTZ. (1973).
Great lakes precipitation chemistry: Part I. Lake Ontario Bassin.
Proc 16th conf Great Lakes Res.: 581-602.
- SUMMERS, P.W. et D.M. WHELPDALE. (1976).
Acid precipitation in Canada. *Water air and soil pollution.* 6,
447-455.
- SUNDSTROM, K.R. et J.E. HAUGREN. (1973).
Using lichens as physiological indicators of sulfurous pollutants
Ambio 2(1-2): 13-21.
- UTTOMARK, P.O., J.O. CHAPIN et K.M.GREEN. (1974).
Atmospheric contributions of nitrogen and phosphorus. Estimating
nutrient loading of lakes from non-point sources. Wisconsin. Univ.
Water Ressources Centre, Madison, Wisconsin. 112 p.
- VIEMEISTER, P.E. (1969).
Lightning and the origin of nitrates found in precipitation. *Journal
of meteorology.* 17: 681-683.
- VITOUSEK, P.M. et W.A. REINERS. (1975).
Ecosystem succession and nutrient retention: a hypothesis. *Bioscience*
25(6): 376-381.
- VOLLENWEIDER, R.A. (1968).
Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes on flowing wa-
ters with a particular reference to nitrogen and phosphorus as a
factor in eutrophication. OCDE Rpt no DAS/CSI/68.27.
Paris. France.
- WHELPDALE, D.M. et P.W. SUMMERS. (1975).
Acid precipitation in Canada. Internal report No. ARQT 5-75. Atmos-
pheric Environnement Service, Downview, Ontario.
- WIEBE, H.A. (1975).
The effect of precipitation collector design on the measured acid con-
tent of precipitation. Presented at the First International Symposium
on Acid precipitation and the forest ecosystem. Ohio State University,
Columbus, Ohio. May 1975.
- WOOD, T. et F.H. BORMANN. (1974).
The effect of an artificial acid mist upon the growth of *Betula allegha-
niensis* Britt. *Environ. Pollut.* 7: 259-268.
- WRIGHT, R.F. et E.T. GJESSING. (1976).
Acid precipitation: changes in the chemical composition of lakes. *Ambio*
5(5-6): 219-223.

ANNEXES

ANNEXE A

LE PROCESSUS DE GENESE DES APPORTS PAR
PRECIPITATIONS HUMIDES OU SECHES

A. PROCESSUS DE GENESE DES APPORTS PAR PRECIPITATIONS HUMIDES OU SECHES

Les apports au sol en minéraux, en matière organique ou en gaz sont essentiellement constitués par les retombées sèches (particules), par l'adsorption de surface des molécules de gaz aériens et par le contenu en matière des précipitations humides (eau liquide ou gelée). A priori, l'apport au sol en substances organiques ou inorganiques par le captage moléculaire de certains gaz aériens (collision inélastique suivie par la formation de couches mono ou pluri-moléculaires, par la solubilisation du gaz dans un liquide au sol ou encore par une réaction chimique réversible ou irréversible de transformation) ne peut être négligé en tant que contribution potentiellement importante aux apports totaux de substances en provenance de l'atmosphère¹; cependant, le type de collecteur de précipitations utilisé sur le bassin de la rivière Yamaska (Lachance et Sasseville, 1976) ne présentant pas de surfaces caractéristiques offrant prise au captage moléculaire² et compte tenu du peu de connaissances acquises sur ce sujet, on se limitera, dans cette annexe à discuter de retombées sèches et humides.

A.1 Les retombées sèches

Nous retrouvons dans l'atmosphère, un spectre très étendu de

¹ L'apport en NH_3 ou en SO_2 par adsorption à la surface du sol minéral ou du couvert végétal peut être élevé par rapport aux apports en provenance directe des précipitations humides ou sèches; Eriksson (1952) rapporte des expériences faites en 1911 qui ont permis aux auteurs Hall et Miller de constater que le sol absorbait continuellement de l'ammoniaque.

² La surface des collecteurs est en polyéthylène peu rugueux, et son efficacité de captage apparaît comme généralement faible par rapport aux surfaces minérales ou végétales.

particules caractérisées par leur composition moléculaire, leurs dimensions, leurs surfaces, leurs charges et leurs réactions avec la phase vapeur de l'eau. Ces particules peuvent être des organismes vivants (pollen, microorganismes, insectes) ou de la matière non vivante (fumée, poussières, fibres, polymères, etc...). Leurs origines sont diverses et leur concentration dans l'atmosphère diminue avec la distance de l'origine.

Les dimensions des particules de matière non vivante, calculées d'après leurs périmètres, ont un ordre de valeur qui s'étend de $6 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$. Leur demi-vie dans l'atmosphère, inversement proportionnelle à la vitesse de sédimentation, décroît rapidement quand la dimension des particules augmente. Généralement, les petites particules sont chargées et ces charges favoriseraient leur adsorption sur d'autres particules de charge inverse (Corn, 1968).

Les particules ayant un rayon supérieur à $0.1 \mu\text{m}$ constituent la majeure partie de la masse totale de la matière particulaire de l'atmosphère. Ce sont les propriétés hygroscopiques de ces particules qui en font des noyaux de condensation responsables pour la formation de nuages et des précipitations. Cet effet sera très important puisque les particules non-solubles ou hydrophobes, deviendraient des particules hybrides hydrophiles après adsorption sur leur surface de gaz ou de petites particules chargées (Corn, 1968).

En l'absence de précipitation humide, on assiste à une sédimentation

continue de particules aériennes; l'intensité ou la vitesse de déposition est fortement influencée par la turbulence locale ou par les conditions de l'environnement thermodynamique des particules. En effet, ces conditions favoriseront la formation, par collision inélastique, de particules plus grosses ayant un temps de séjour dans l'atmosphère qui diminue rapidement avec le volume des particules. Ce phénomène est bien illustré au tableau A.1 où l'on constate que des particules ayant un diamètre de 1 μm ont une vitesse de sédimentation estimée de l'ordre de 0.026 cm/sec tandis que pour des particules d'un diamètre de 10 μm , on évalue leur vitesse de sédimentation à environ 2.7 cm/sec.

Ainsi les grosses particules originant d'émanations naturelles ou en provenance d'activités humaines auront une forte influence locale sur les apports atmosphériques; ces apports seront donc variables en fonction des conditions météorologiques locales (vents, humidité, température, ensoleillement) et seules la régularité des émanations aux sources et les dominances météorologiques favoriseront une certaine structure spatiale ou temporelle dans les apports locaux.

Les particules plus fines pourront être transportées sur des distances considérables avant de sédimenter ou d'être captées par collision inélastique. Les sources de particules étant diversifiées et leurs conditions de genèse très variables, on ne peut s'attendre à les retrouver à des concentrations homogènes dans l'atmosphère. Les apports en particules fines seront variables dans le temps et dans l'espace malgré que l'on puisse

TABLEAU A.1 Vitesse de sédimentation et temps de résidence de particules sphériques d'une densité de 2 g/cm³ dans un environnement atmosphérique formé par une couche de 5 km et où la distribution des particules est considérée comme homogène (Junge, 1963).

RAYON DES PARTICULES EN μm	1	2	4	6	8	10	15	20
VITESSE DE SEDIMENTATION EN CM/SEC	0.026	0.10	0.38	0.88	1.6	2.7	6.0	10
TEMPS DE SEJOUR EN JOUR	220	58	15	6.6	3.6	2.1	.96	.58

anticiper que leur contribution sera d'autant plus grande que les sources seront actives; ainsi, on retrouvera dans les apports particuliers, des tendances cycliques qui varient selon la saison (évolution saisonnière du métabolisme biotique, intensification saisonnière des activités humaines, etc...).

A.2 Les retombées humides

Il est difficile d'identifier la contribution relative des différentes sources d'eaux atmosphériques qui précipitent sous forme de pluie ou de neige dans un bassin; la proportion des eaux de précipitation d'origine océanique sur un bassin comme le Mississippi est de 85-89%, le reste provenant de l'évapotranspiration du bassin (8-9%) et des bassins avoisinants (3-6%). La contribution océanique à la production des eaux atmosphériques diminue en fonction de la distance de la côte et dépendra de nombreux facteurs atmosphériques et topographiques affectant leurs parcours: dans les régions éloignées des mers, on admet que 20 à 30% des précipitations proviennent des eaux atmosphériques produites par l'évapotranspiration du sol et de la végétation (Bruce et Clark, 1966).

On conçoit facilement que les eaux atmosphériques, qu'elles soient sous forme de vapeur, liquide ou solide, peuvent parcourir des distances énormes avant de précipiter au sol. Les masses d'air qui les accompagnent se chargeraient de matières particulières ou moléculaires d'origine

naturelle ou constituant les émanations des centres urbains ou industriels. Les concentrations de ces substances retrouvées dans les précipitations dépendront:

- du processus de formation des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace;
- de leur temps de séjour dans l'atmosphère et du nombre de collisions efficaces avec les molécules ou les particules en suspension avant que leur taille les entraîne vers les sol;
- du captage, lors de leur traversée de l'atmosphère au sol, de particules, de polymères, de molécules ou d'ions en solution dans les minigouttelettes.

Au cours de leur séjour aérien, les eaux atmosphériques, quelle que soit la phase sous laquelle elles se retrouvent dans l'atmosphère, viendront en contact plus ou moins prolongé avec des ions, des molécules, des polymères, des macromolécules et des particules de toute sorte et de toute origine. Toute substance venant en contact avec les eaux atmosphériques aura un effet sur au moins une phase des eaux atmosphériques et conditionnera la qualité des précipitations; ces substances viendront en contact avec les eaux atmosphériques de deux façons:

- réaction intime avec les eaux atmosphériques au cours de la formation de gouttelettes ou cristaux précédant les précipitations (rain out);

- captage des gaz ou des particules par les gouttelettes ou les cristaux de glace lors de leur chute au sol (wash out).

Les réactions des eaux atmosphériques avec le système gazeux aérien

Les eaux atmosphériques réagiront avec les gaz constituant l'atmosphère en les solubilisant selon la loi d'Henri, ou, s'il s'agit de cristaux de glace, par adsorption physique; chaque gaz retrouvé dans l'atmosphère aura une solubilité ou une adsorptivité différente variant selon ses caractéristiques moléculaires et ses réactions subséquentes avec l'eau.

Les gaz retrouvés dans l'atmosphère sont nombreux et leur fraction molaire variable selon l'altitude, la latitude, la longitude, l'heure du jour ou la période de l'année; toutefois, pour certains d'entre eux parmi lesquels on retrouve les plus importants, leur variabilité est très faible et l'échelle temps doit être étendue à plusieurs centaines d'années: il s'agit de l'oxygène, de l'azote et de la plupart des gaz rares.

En général, l'eau atmosphérique sera en équilibre avec la composante gazeuse environnante; lors de précipitations, la coalescence des micro-gouttelettes, ou la floculation des cristaux et la chute subséquence de l'agglomération, provoquera un changement continu du point d'équilibre et amènera un processus de solubilisation et d'adsorption différent. En

effet, la variation de la tension de surface, l'augmentation de la température, la vitesse de précipitation, la captation de particules ou de molécules de gaz transforment de façon continue les réactions d'échange avec le milieu ambiant.

Trois types de réaction de la phase gazeuse aérienne avec les eaux atmosphériques sont possibles:

- 1- Solubilisation (Junge, 1963) ou adsorption simple selon la loi d'Henri ou les lois de l'adsorption physique de gaz tels que O_2 , N_2 , CH_4 , gaz rares, etc...;
- 2- Solubilisation ou adsorption physique suivie d'une réaction d'hydratation et de dissociation avec les gaz tels que CO_2 et NH_3 ;
- 3- Solubilisation ou adsorption physique suivie d'une réaction d'oxydation ou d'une conversion irréversible avec les gaz tels que O_2 , SO_2 , NO_2 , etc...

Pour les gaz de la catégorie 1, la solubilisation dans les eaux atmosphériques est plus faible que les gaz de la catégorie 2 ou 3; la solubilisation étant limitée par la pression partielle du gaz dans la phase aqueuse, sa transformation sous une autre forme à l'intérieur de cette phase augmente sa solubilité. Les réactions avec les cristaux de glace sont moins connues et les mécanismes de transformation des

caractéristiques chimiques ont été peu étudiés.

Certains phénomènes influençant la qualité des précipitations humides

- L'évaporation

L'évaporation de l'eau ou son passage de la phase liquide à la phase gazeuse est la source majeure des eaux atmosphériques. Elle survient partout où il y a contact entre une phase gazeuse comme l'air et la phase liquide. Le mécanisme moléculaire de l'évaporation est essentiellement le même, qu'elle se produise à partir de la surface de l'océan, de lacs, de rivières, du sol ou de gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère: une molécule d'eau passera de la phase liquide à la phase vapeur quand elle aura acquis suffisamment d'énergie cinétique pour échapper aux forces d'interaction des autres molécules d'eau (forces de London-van der Waals moments dipolaires et liens covalent). L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est très élevée; elle est de l'ordre de $540 \text{ cal/gm} \Big|_{100^\circ\text{C}}$ tandis que l'énergie radiante maximale à nos latitudes variera de $150 \text{ cal/cm}^2\text{-jour}$ en janvier à 800 en juin.

Bien que l'eau soit de loin la masse liquide la plus importante de la géosphère, il existe une grande variété de produits volatiles, naturels ou artificiels qui sont présents en abondance dans certaines régions. Si l'énergie nécessaire à leur évaporation est faible comparée à celle de

l'eau, ces substances pourront influencer localement la composition de l'atmosphère.

La présence dans l'atmosphère de cristaux de sel ou de matière particulaire hydrophile serait en partie due à l'évaporation de gouttelettes ou de micro-gouttelettes pulvérisées par l'action combinée du vent, des vagues et de l'effervescence sur les grandes étendues d'eau; les sels solubles ou les particules qu'elles contiennent cristalliseraient ou s'aggloméreraient pendant l'évaporation et seraient transportés sur de longues distances par les vents après avoir été soulevés à de hautes altitudes par des courants de convection.

Ces deux phénomènes ont un effet sur la composition chimique des précipitations diminuant rapidement avec la distance.

- L'évapotranspiration

L'évapotranspiration des végétaux est une composante importante du bilan hydrique d'un bassin. La transpiration est essentielle au métabolisme hydro-électrolytique des plantes parce qu'elle fournit l'énergie nécessaire aux mouvements d'eau et des électrolytes du sol vers les feuilles; de plus, l'énergie d'évaporation de l'eau transpirée étant élevée, les feuilles peuvent exposer de grandes surfaces aux rayons solaires (photosynthèse) et à l'air ambiant (absorption d'oxygène ou de dioxyde de carbone) sans élever leur température à plus que quelques degrés au-dessus de la température de l'air ambiant. La majeure partie de l'eau (98%) absorbée par la plante à

partir du sol est évaporée vers l'atmosphère, tandis que le reste est retenu dans le couvert végétal (1.8%) ou utilisé dans la photosynthèse (.2%) (Sutcliffe, 1968). Le mouvement de l'eau et des électrolytes dans la plante est associé intimement à son métabolisme; ainsi, le liquide exsudé en surface de la feuille par les glandes salines est souvent riche en sel. Bien que l'on ne connaisse pas le mécanisme métabolique lié à cette sécrétion, cette dernière semble augmenter avec des conditions favorables à l'absorption d'eau et défavorable à la transpiration. Les gouttelettes apparaissant à la surface de la feuille contiennent de l'acide aspartique, de l'asparigine, des sucres, des produits organiques variés et une douzaine d'éléments minéraux (Kramer, 1969). L'action du vent sur les gouttelettes ou les résidus de leur évaporationensemencera l'atmosphère au-dessus du couvert forestier et ces différentes substances pourront être transportées sur de longues distances. Toutefois, il est probable qu'un effet marqué sur la chimie des précipitations ne se fasse sentir qu'au-dessus du couvert végétal.

- L'interception

Au cours d'une précipitation, le couvert végétal intercepte une certaine quantité d'eau qui, par la suite, est évaporée directement ou absorbée et transpirée par les plantes. Dans les régions humides et forestières, l'interception annuelle peut-être de l'ordre de 25 cm sur 100 cm (Gray, 1972). Au cours des averses, l'eau captée par le couvert végétal est en équilibre avec une partie de l'eau qui atteindra la surface du sol; les

substances solubles et les particules en provenance des sécrétions d'origine végétale ou des retombées sèches adhérant à la surface des plantes viendront changer les caractéristiques physico-chimiques des eaux atmosphériques et contribueront de façon non négligeable au bilan hydro-électrolytique d'un bassin.

- Les substances associées aux phénomènes naturels et aux activités humaines

La présence dans l'atmosphère terrestre de substances solides ou de gaz résulte des émanations en provenance des activités humaines ou de phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques, les feux de forêt, l'érosion des sols ou le bombardement cosmique. Les activités humaines provoquant des émanations sont diversifiées; nous y retrouvons, parmi les plus importantes, les produits de combustion d'énergie fossiles (SO_2 , NO_2 , CO , V , Zn , Pb , etc...), la poussière en provenance des activités industrielles (extraction de minerais, transformation de produits), des activités agricoles (remuage des sols, épandage d'engrais ou de pesticides), et du contrôle industriel des moustiques et de la végétation, ainsi que toutes sortes de substances en provenance d'explosions en temps de paix et en temps de guerre.

REFERENCES

- BRUCE, J.P. et R.H. CLARK. (1966).
Introduction to hydrometeorology, Pergamon Press.
- CORN, M. (1968).
Non-viable particle in the air. In: Air Pollution. G.J. A.C. Stern, Vol. I: Air Pollution and its effects. Academic Press, New York and London.
- ERIKSSON, E. (1952).
Composition of atmospheric precipitation I. Nitrogen compounds. *Tellus* 4: 215-232.
- GRAY, O.M. *et al.* (1972).
Manuel des principes d'hydrologie. Publications du Secrétariat du comité national canadien de la décennie hydrologique internationale. Ottawa.
- JUNGE, C.E. (1963).
Air chemistry and radioactivity. Academic Press. New York and London.
- KRAMER, P.J. (1969).
Plant and Soil. Water Relationships. McGraw-Hill Book Co.
- LACHANCE, M. et J.L. SASSEVILLE. (1976).
Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versant des rivières Saint-François et Yamaska, Volume 4: Secteur des eaux atmosphériques. INRS-Eau, rapport scientifique no. 54, 50 p. (rapport soumis au ministère des Richesses naturelles du Québec).
- SUTCLIFFE, J. (1968).
Plants and water. Arnold Publisher Ltd.



ANNEXE B

DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES
DES EAUX DE PRECIPITATIONS



TABLEAU B.1 Données obtenues au mois d'août 1974.

STATIONS	DEBUT ET NOM PERIODE MOIS	PRECIPITATION		CONCENTRATIONS																			
		SI	IO2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN	Y	
1) BETHANIE	04/08/74 28	1.79	2.10	<.1	1.7	.09	2.50	.20	7.4	<.1	.50	.76	.02	.09	.10	.14	2.2	.3	6.53	32.	.02	<.05	
2) BONSECOURS	01/08/74 31	2.59	2.59	<.1	.6	<.05	.10	.10	4.6	<.1	.36	.55	.20	.06	.03	.06	1.5	.0	4.17	29.	.02	<.05	
3) BRIT-MILLS	01/08/74 31	1.73	1.73	5.5	1.1	.06	<.05	.10	5.2	<.1	.52	.67	.01	.03	.03	.06	2.0	.0	4.27	30.	.02	<.05	
4) BROME	04/08/74 28	4.86	5.28	2.0	.3	.05	.05	.90	4.4	<.1	.27	.55	1.12	.62	.64	.65	3.0	.0	4.23	26.	.02	<.05	
5) BROMONT	04/08/74 28	2.15	2.35	5.5	.9	<.05	.10	.10	6.2	<.1	.56	.70	.06	.04	.04	.06	2.0	.0	4.12	39.	.03	<.05	
6) FARNHAM	01/08/74 31	2.50	2.50	<.1	1.1	.10	.10	.40	6.1	.1	.59	1.50	.46	.48	.48	.64	3.2	.0	4.44	29.	.03	<.05	
7) FLEURY	01/08/74 31	1.45	1.45	3.9	3.0	.30	.30	.10	11.6	.4	1.08	1.50	.56	.62	.65	.67	5.5	.0	4.64	48.	.03	<.05	
8) GRANBY	01/08/74 31	2.92	2.92	2.1	.5	.05	.20	.60	4.2	<.1	.32	.45	1.22	.29	.32	.48	9.0	.0	4.30	26.	.02	<.05	
9) KNOWLTON	04/08/74 28	5.08	5.99	<.1	.5	.05	.07	.10	4.3	<.1	.36	.43	.12	.11	.10	.11	1.5	.0	4.33	25.	.03	<.05	
10) ROUEMONT	04/08/74 28	1.14	2.03	<.1	2.9	.10	.20	.30	9.3	.1	.99	.65	.21	.15	.13	.22	3.8	.0	4.02	57.	.03	<.05	
11) ROXTON-FALLS	06/08/74 26	.74	2.39	2.0	"	"	"	"	6.4	<.1	.70	1.60	.60	.20	.20	.20	2.7	.3	5.16	31.	"	"	
12) ST-GUILLAUME	01/08/74 31	1.61	1.61	<.1	3.0	.10	.10	.40	8.6	.1	.72	.88	.16	.16	.16	.21	4.2	.0	4.62	35.	.02	<.05	
13) ST-HYACINTHE	01/08/74 33	3.59	3.19	<.1	2.1	.20	.30	1.70	6.8	.4	.45	1.50	5.80	1.25	1.35	1.64	13.0	1.5	5.15	40.	.02	<.05	
14) ST-NAZAIRE	01/08/74 31	1.95	1.95	3.9	1.5	.10	<.05	.30	5.9	.1	.54	.66	.04	.09	.10	.11	2.5	.0	4.30	21.	.01	<.05	
15) ST-VALERIEN	01/08/74 31	1.90	1.90	<.1	1.5	.10	<.05	.60	7.4	.1	.63	1.50	1.50	.53	.52	.65	5.0	.0	4.45	32.	.01	<.05	
16) STE-ROSALIE	01/08/74 31	2.33	2.33	5.5	1.9	.10	.10	.40	5.5	<.1	.56	.59	.06	.05	.03	.08	2.2	.0	4.47	26.	.01	<.05	
17) SUTTON-JCT	01/08/74 31	4.41	4.41	<.1	.3	.06	<.05	.10	4.3	.5	.38	.42	.07	.04	.05	.05	1.5	.0	4.12	31.	.02	<.05	
18) UPTON	03/08/74 29	1.23	1.51	3.9	2.6	.10	<.05	.20	6.2	.2	.56	.64	.01	.07	.08	.08	2.5	.0	4.60	34.	.01	<.05	
19) VALCOURT	01/08/74 31	3.36	3.36	4.0	.4	.05	<.05	.10	4.3	<.1	.32	.54	.16	.08	.10	.12	1.5	.0	4.24	26.	.02	<.05	
20) WARDEN	01/08/74 31	3.23	3.23	<.1	.4	<.05	.07	.10	4.7	<.1	.41	.50	.08	.06	.06	.09	2.0	.0	4.17	31.	.02	<.05	
MOYENNE		2.53	2.74	1.9	1.4	.09	.23	.36	6.2	.1	.54	.83	.62	.25	.26	.32	3.5	.1	4.35	32.	.02	<.05	
MEDIANE		2.24	2.37	1.0	1.1	.09	.10	.20	6.0	<.1	.53	.65	.16	.10	.10	.13	2.5	.0	4.31	31.	.02	<.05	
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:		20	20	20	19	19	19	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	19	
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:		0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

TABLEAU B.2 Données obtenues au mois de septembre 1974.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																				
			IBRE DE JOURS	PERIODE	MOIS	SI02	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE
1)BETHANIE	01/09/74	37	5.18	4.72	<.1	.6	.05	<.05	.10	5.0	.2	.45	.43	.13	.06	-	.06	2.0	.0	4.23	32.	.02	<.05
2)BONSECOURS	01/09/74	30	3.80	3.80	.1	.5	.05	<.05	.10	5.0	.2	.45	.49	.06	<.02	-	<.02	2.0	.0	4.14	38.	.02	<.05
3)BRIT-MILLS	01/09/74	30	4.40	4.40	.1	.8	.05	<.05	.10	4.5	.3	.54	.72	.05	.05	-	.05	2.0	.0	4.56	28.	.01	<.05
4)BROME	01/09/74	30	4.99	4.99	.1	.4	<.05	<.05	.20	4.0	.1	.41	.40	.03	.05	-	.08	1.8	.0	4.15	35.	.02	<.05
5)BROMONT	01/09/74	30	3.75	3.75	.1	.5	<.05	<.05	.10	5.0	.3	.59	.59	.07	.05	-	.11	2.0	.0	4.14	38.	.04	<.05
6)FARNHAM	01/09/74	30	3.21	3.21	.1	1.0	.05	<.05	.20	4.5	.1	.59	.65	.10	.11	-	.16	2.2	.0	4.43	31.	.03	<.05
7)FLEURY	01/09/74	30	3.31	3.31	.2	1.7	.10	<.05	.50	6.0	.5	.68	.90	.03	.29	-	.30	4.0	.0	4.54	30.	.02	<.05
8)GRANBY	01/09/74	30	3.99	3.99	.1	.5	<.05	<.05	.20	4.0	.3	.43	.31	.14	.04	-	.08	1.7	.0	4.20	35.	.02	<.05
9)KNOWLTON	01/09/74	30	5.21	5.21	.1	.7	.10	<.05	.20	4.5	.6	.36	.17	.03	.33	-	.33	5.7	.8	4.42	29.	.02	<.05
10)ROUEMONT	01/09/74	30	3.65	3.65	.1	1.2	.06	<.05	.20	4.5	.1	.61	.46	.04	.07	-	.08	2.0	.0	4.33	30.	.02	<.05
11)ROXTON-FALLS	01/09/74	30	4.40	4.40	<.1	.6	.10	<.05	.10	4.5	.3	.43	.72	.09	.14	-	.16	1.7	.3	4.80	22.	.01	<.05
12)ST-GUILLAUME	01/09/74	30	3.22	3.22	<.1	2.2	.10	<.05	.10	5.5	.4	.56	.44	.05	.08	-	.12	2.3	.2	4.83	25.	.02	<.05
13)ST-HYACINTHE	03/09/74	28	4.12	4.52	.1	2.0	.09	<.05	.20	5.5	.1	.59	.40	.10	.05	-	.05	2.2	.0	4.72	27.	.02	<.05
14)ST-NAZAIRE	01/09/74	30	4.43	4.43	<.1	.8	.06	<.05	.10	5.0	.3	.52	.48	.08	.07	-	.10	2.0	.0	4.28	31.	.02	<.05
15)ST-VALERIEEN	01/09/74	30	3.50	3.50	.1	.8	.05	<.05	.20	4.7	.1	.50	.80	.10	.13	-	.18	2.2	.0	4.72	23.	.01	<.05
16)STE-ROSALIE	01/09/74	30	4.27	4.27	.1	1.5	.05	<.05	.20	5.0	.3	.59	.55	.08	.14	-	.22	2.2	.3	4.43	29.	.02	<.05
17)SUTTON-JCT	01/09/74	30	5.49	5.49	.1	.2	<.05	<.05	2.10	4.0	.3	.38	.37	.03	.07	-	.10	2.5	.0	4.11	31.	.01	<.05
18)UPTON	01/09/74	30	4.24	4.24	.1	3.6	.05	<.05	.20	5.5	.3	.59	.77	.06	.10	-	.18	2.2	1.0	6.38	30.	.01	<.05
19)VALCOURT	01/09/74	30	4.68	4.68	<.1	.5	<.05	<.05	.10	5.5	.3	.43	.58	.06	.04	-	.08	2.0	.0	4.16	39.	.03	<.05
20)WARDEN	01/09/74	30	3.99	3.99	.1	.5	.05	<.05	.20	5.0	.4	.52	.55	.07	.04	-	.07	2.5	.0	4.07	40.	.02	<.05
MOYENNE			4.19	4.19	.1	1.0	.06	<.05	.27	4.9	.3	.51	.54	.07	.10	-	.13	2.4	.1	4.34	31.	.02	<.05
MEDIANE			4.18	4.25	.1	.8	.05	<.05	.20	5.0	.3	.52	.52	.07	.07	-	.10	2.1	.0	4.37	30.	.02	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0

B-4

TABLEAU B.3 Données obtenues au mois d'octobre 1974.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																			
			PERIODE MOIS	SI	O2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	CCND	FE
1) BETHANIE	08/10/74 28	3.20 3.02	<.1	.5	.05	<.05	.05	6.5	.2	1.08	1.34	.09	.05	.06	.06	2.5	.0	4.00	57.	.02	<.05	
2) BONSECOURS	01/10/74 35	6.37 5.96	<.1	.5	.05	<.05	.05	6.5	.7	.97	.97	.05	.03	.02	.07	3.0	.0	3.97	57.	.01	<.05	
3) BRIT-MILLS	01/10/74 34	1.81 1.65	<.1	1.8	.10	.50	.90	9.0	.5	1.24	1.46	.19	.13	.12	.14	6.0	.0	4.30	55.	.02	<.05	
4) BROME	01/10/74 35	3.52 2.78	<.1	.5	.05	<.05	.10	6.0	.4	.88	.79	.11	.12	.13	.14	3.0	.0	4.00	57.	.01	<.05	
5) BROMONT	01/10/74 35	3.35 2.83	<.1	.5	.10	.05	.10	7.0	1.2	1.11	1.02	.06	.03	.05	.12	2.8	.2	3.90	65.	.02	<.05	
6) FARNHAM	01/10/74 36	2.41 1.74	<.1	1.2	.10	.05	.20	8.5	.8	1.17	2.12	.18	.15	.15	.17	4.0	.0	4.53	48.	.02	<.05	
7) FLEURY	01/10/74 36	2.80 2.40	<.1	2.0	.10	.05	.40	8.0	.6	1.06	1.22	.11	.05	.05	.06	4.0	.0	4.40	48.	.02	<.05	
8) GRANBY	01/10/74 35	3.31 2.66	<.1	1.0	.10	.05	.10	7.5	.4	1.08	.99	.08	.05	.05	.07	4.0	.0	4.10	59.	.04	<.05	
9) KNOWLTON	01/10/74 35	4.16 4.05	<.1	.5	.10	.50	.80	7.0	.3	.90	.77	.07	.06	.07	.08	4.0	.0	4.20	48.	.02	<.05	
10) ROUEMONT	01/10/74 36	3.16 2.70	<.1	1.0	.10	<.05	.10	6.5	.5	1.04	.75	.05	.05	.05	.10	3.0	.0	4.20	55.	.03	<.05	
11) ROXTON-FALLS	01/10/74 35	2.72 2.31	<.1	.5	.10	<.05	.10	6.0	.2	.90	1.10	.12	.06	.10	.10	3.0	.0	4.12	48.	.01	<.05	
12) ST-GUILLAUME	01/10/74 36	2.29 1.99	<.1	.1	1.50	.05	.30	7.0	.4	.93	1.40	.16	.37	.43	.52	4.0	.0	4.10	48.	.02	<.05	
13) ST-HYACINTHE	01/10/74 36	2.35 1.96	<.1	4.5	.30	2.20	2.30	11.5	4.8	1.11	1.06	.11	1.10	1.10	1.16	9.0	.0	5.02	65.	.01	<.05	
14) ST-NAZAIRE	01/10/74 34	2.80 2.44	<.1	1.0	.10	.05	.10	7.5	.4	1.06	1.12	.10	.05	.06	.12	3.0	.0	4.03	57.	.02	<.05	
15) ST-VALERIE N	01/10/74 34	2.26 1.92	<.1	2.0	.10	.05	.20	8.5	.6	1.17	1.62	.03	.14	.16	.16	4.0	.0	4.50	49.	.02	<.05	
16) STE-ROSALIE	01/10/74 34	2.13 1.84	<.1	3.0	.10	.05	.30	9.5	.5	1.26	1.52	.09	.10	.10	.10	4.0	.0	4.75	48.	.02	<.05	
17) SUTTON-JCT	01/10/74 35	3.38 2.73	<.1	.5	.05	<.05	.10	6.0	.3	.88	.66	.12	.04	.05	.08	3.0	.0	3.90	57.	.01	<.05	
18) UPTON	01/10/74 34	2.09 1.81	<.1	4.8	.10	.05	.10	9.0	.2	1.24	1.36	.14	.03	.04	.04	3.1	.4	5.44	48.	.01	<.05	
19) VALCOURT	01/10/74 35	3.70 2.99	<.1	.5	.05	<.05	.05	6.0	.3	.86	.74	.09	.02	.03	.06	2.5	.0	4.10	55.	.03	<.05	
20) WARDEN	01/10/74 35	4.24 3.48	<.1	.5	.05	<.05	.10	5.5	.4	.86	.82	.09	.02	.02	.03	2.5	.0	3.98	55.	.01	<.05	
MOYENNE		3.10 2.66	<.1	1.3	.16	.19	.32	7.4	.7	1.04	1.14	.10	.13	.14	.17	3.7	.0	4.16	54.	.02	<.05	
MEDIANE		2.98 2.55	<.1	.8	.10	.05	.10	7.0	.4	1.06	1.08	.10	.05	.06	.10	3.0	.0	4.11	55.	.02	<.05	
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:		20 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:		0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU B.4 Données obtenues au mois de novembre 1974.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																				
			PERIODE MOIS	SI	O2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1) BETHANIE	05/11/74	28	4.91	5.45	<.1	.7	.10	.60	.10	3.0	.6	.50	.64	.03	.05	.05	.10	9.0	.0	4.75	16.	.01	<.05
2) BONSECOURS	05/11/74	28	3.93	4.14	<.1	.4	<.05	.60	.10	2.0	.5	.45	.50	.04	<.02	.02	.04	8.0	.0	4.67	16.	.02	<.05
3) BRIT-MILLS	04/11/74	28	3.66	3.82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4) BROME	05/11/74	28	3.84	4.42	<.1	.5	<.05	2.30	.20	2.5	.5	.38	.38	.04	.03	.04	.09	17.0	.0	4.88	15.	.01	<.05
5) BROMONT	05/11/74	28	4.12	4.76	<.1	.5	<.05	.80	.10	3.0	.4	.52	.51	.03	<.02	.04	.05	9.5	.0	4.52	17.	.02	<.05
6) FARNHAM	06/11/74	28	3.86	4.33	<.1	.7	<.05	2.30	.20	4.5	.5	.54	1.58	.05	.10	.13	.16	23.0	.0	5.60	30.	.01	<.05
7) FLEURY	06/11/74	28	3.93	3.91	<.1	1.2	.05	1.30	.10	4.4	.4	.50	.70	.01	.04	.06	.08	13.0	.0	5.11	21.	.01	<.05
8) GRANBY	05/11/74	28	4.37	4.75	<.1	.4	<.05	.30	.10	2.5	.1	.45	.27	.03	<.02	<.02	<.02	7.0	.0	4.41	20.	.02	<.05
9) KNOWLTON	05/11/74	28	6.31	6.31	<.1	.5	<.05	.70	.10	1.5	.1	.34	.17	.02	<.02	.02	.04	10.0	.0	4.72	12.	.01	<.05
10) ROUCEMONT	06/11/74	28	3.48	3.70	<.1	.8	<.05	1.30	.10	3.0	.4	.47	.44	.02	.04	.06	.09	12.0	.0	4.74	16.	.01	<.05
11) ROXTON-FALLS	05/11/74	28	4.29	4.43	.3	.5	<.05	1.70	.10	2.5	.5	.45	.50	.02	.05	.07	.13	12.0	.0	4.83	16.	.01	<.05
12) ST-GUILLAUME	06/11/74	28	4.10	3.48	<.1	1.4	.10	2.30	.20	4.5	.7	.56	.68	.12	.13	.12	.18	16.0	.0	4.96	24.	.02	<.05
13) ST-HYACINTHE	06/11/74	28	3.73	3.69	<.1	2.5	.05	.50	.10	5.5	.5	.54	.32	.05	.04	.05	.07	11.0	.0	5.24	24.	.02	<.05
14) ST-VAZAIRE	04/11/74	28	4.19	4.55	<.1	1.0	<.05	.60	.10	3.5	.2	.54	.51	.03	.03	.04	.07	9.0	.0	4.83	18.	.01	<.05
15) ST-VALERIEEN	04/11/74	28	3.73	4.07	<.1	1.0	<.05	2.70	.40	4.5	.6	.56	1.05	.39	1.20	1.30	1.30	18.0	.0	6.10	36.	<.01	<.05
16) STE-ROSALIE	04/11/74	28	3.42	3.71	<.1	2.2	<.05	2.30	.10	4.5	.6	.61	.50	.08	.04	.05	.11	14.0	.0	5.58	26.	<.01	<.05
17) SUTTON-JCT	05/11/74	28	4.25	4.62	<.1	.2	<.05	2.10	.10	3.0	.5	.45	.44	.09	.04	.03	.06	14.0	.0	4.72	15.	<.01	<.05
18) UPTON	04/11/74	28	3.55	3.83	<.1	1.2	<.05	.70	.10	3.5	.3	.50	.68	.04	.02	.03	.06	11.0	.0	5.72	22.	<.01	<.05
19) VALCOURT	05/11/74	28	4.29	4.98	<.1	.5	<.05	.80	.10	2.2	.3	.38	.34	.01	<.02	<.02	.03	9.5	.0	4.65	12.	.01	<.05
20) WARDEN	05/11/74	28	4.86	5.48	<.1	1.0	<.05	1.90	.10	2.5	.6	.41	.44	.09	<.02	<.02	<.02	13.0	.0	5.55	16.	.01	<.05
MOYENNE			4.14	4.42	<.1	.9	<.05	1.36	.13	3.3	.4	.48	.56	.06	.10	.11	.14	12.4	.0	4.86	19.	.01	<.05
MEDIANE			4.01	4.38	<.1	.7	<.05	1.30	.10	3.0	.5	.50	.50	.04	.04	.04	.07	12.0	.0	4.85	17.	.01	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			20	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABLEAU B.5 Données obtenues au mois de décembre 1974.

STATIONS	DEBUT ET NOM		PRECIPITATION		CONCENTRATIONS																			
	DATE	NOM	PERIODE	MOIS	SI	O2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NO3G	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1) BETHANIE	03/12/74	36	2.06	2.00	<.1	1.8	.10	.70	.10	6.5	.8	1.63	2.01	.02	.04	.04	.04	.04	4.0	.0	4.73	45.	<.01	<.05
2) BONSECOURS	03/12/74	36	2.16	1.96	<.1	.7	.08	1.20	.10	4.0	1.2	1.24	1.42	.09	.04	.04	.06	.06	3.0	.0	4.32	42.	.01	<.05
3) BRIT-MILLS	02/12/74	36	1.49	1.29	.4	.7	.08	.30	.05	2.1	.7	.32	1.03	<.01	.03	.03	.03	.03	3.0	.0	5.69	16.	<.01	<.05
4) BROME	03/12/74	36	2.17	1.82	<.1	.7	.07	.10	.10	3.0	.1	.77	.48	.02	<.02	<.02	<.02	.02	3.0	.0	4.18	33.	.01	<.05
5) BROMONT	03/12/74	36	2.20	1.80	<.1	1.2	.08	.50	.10	5.0	.7	1.15	.74	.08	.04	.04	.04	.04	2.0	.0	4.22	44.	.03	<.05
6) FARNHAM	04/12/74	36	2.80	2.51	<.1	1.2	.10	1.00	.30	8.3	1.5	1.45	4.05	.35	.30	.30	.33	.33	6.0	.0	6.06	53.	<.01	<.05
7) FLEURY	04/12/74	36	3.35	3.47	<.1	.8	.08	1.20	.20	2.7	.9	.41	.85	.03	<.02	<.02	<.02	.02	3.0	.0	5.45	20.	<.01	<.05
8) GRANBY	03/12/74	35	2.53	2.48	<.1	1.2	.10	.50	.10	4.0	1.0	1.02	.60	.04	.02	.03	.06	.06	2.0	.0	4.31	37.	.03	<.05
9) KNOWLTON	03/12/74	36	2.39	2.35	<.1	.6	.07	.20	.05	2.5	.5	.81	.43	.01	<.02	.02	.04	.04	2.0	.0	4.28	35.	.01	<.05
10) ROUEMONT	04/12/74	36	2.86	2.58	<.1	1.0	.10	1.20	.10	4.0	1.5	1.11	.62	.05	.06	.08	.09	.09	3.0	.0	4.17	46.	.02	<.05
11) ROXTON-FALLS	03/12/74	36	2.71	2.18	.1	.5	.08	1.20	.10	5.0	1.9	1.06	1.58	.05	.08	.09	<.02	.02	3.0	.0	4.61	38.	<.01	<.05
12) ST-GUILLEAUME	04/12/74	36	1.18	1.76	<.1	1.0	.08	.70	.10	3.5	1.0	.59	.60	.01	.02	.02	.02	.02	2.5	.0	4.70	27.	.02	<.05
13) ST-HYACINTHE	04/12/74	36	2.36	2.50	<.1	2.5	.10	.50	.10	3.8	1.6	.45	.27	<.01	<.02	<.02	<.02	.02	2.0	.0	5.73	23.	<.01	<.05
14) ST-NAZAIRE	02/12/74	36	3.23	2.88	<.1	.7	.08	.10	.20	1.5	.6	.38	.40	<.01	.02	.04	.08	.08	2.0	.0	4.92	14.	<.01	<.05
15) ST-VALERIE	02/12/74	36	2.06	1.72	.1	1.8	.10	3.70	.50	12.0	4.4	1.17	4.00	.40	.23	.22	.26	.26	6.0	.0	4.49	72.	<.01	<.05
16) STE-ROSALIE	02/12/74	36	3.42	3.22	<.1	1.2	.08	.50	.10	1.7	.4	.34	.44	.04	.06	.05	.07	.07	3.0	.0	5.82	16.	<.01	<.05
17) SUTTON-JCT	03/12/74	36	3.33	3.03	<.1	.7	.06	.50	.10	3.0	.6	.90	.60	.01	.02	.03	.06	.06	3.0	.0	4.21	36.	.01	<.05
18) UPTON	02/12/74	36	1.98	1.70	.2	2.8	.10	3.30	.20	7.1	1.8	.95	1.60	.06	.11	.11	.17	.17	6.0	.0	5.95	45.	.01	<.05
19) VALCOURT	03/12/74	36	3.17	3.19	<.1	.5	.08	.40	.10	3.4	1.0	.86	.60	.07	.06	.05	.06	.06	2.0	.0	4.38	32.	.02	<.05
20) WARDEN	03/12/74	36	2.57	2.35	<.1	.7	.08	2.20	.10	3.2	2.8	.90	.66	.02	.02	.04	.10	.10	3.0	.0	4.30	40.	.01	<.05
MOYENNE			2.50	2.34	<.1	1.1	.08	1.00	.14	4.3	1.2	.87	1.15	.07	.06	.06	.08	.08	3.2	.0	4.51	36.	<.01	<.05
MEDIANE			2.46	2.35	<.1	.9	.08	.60	.10	3.6	1.0	.90	.64	.03	.03	.04	.06	.06	3.0	.0	4.55	36.	.01	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU B.6 Données obtenues au mois de janvier 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM IRRE DE JOURS	PRECIPITATION PERIODE MOIS	CONCENTRATIONS																		
			SI02	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1)BETHANIE	08/01/75 27	2.12 2.26	<.1	1.8	.05	.50	.05	4.4	1.0	1.31	1.20	.04	.02	.03	.06	3.0	.0	5.26	33.	.01	<.05
2)BONSECOURS	08/01/75 27	3.42 3.82	<.1	1.0	<.05	1.90	.06	4.3	1.4	1.35	1.35	.05	<.02	.02	.05	4.0	.0	4.65	42.	.02	<.05
3)BRIT-MILLS	07/01/75 27	2.21 2.41	<.1	1.5	.10	.80	.10	8.9	1.5	1.24	4.30	<.01	.03	.02	.04	4.0	.0	5.81	54.	.01	<.05
4)BROME	08/01/75 27	1.56 2.07	<.1	.5	<.05	.80	.05	2.3	1.1	1.06	.39	.01	<.02	<.02	.03	3.5	.0	4.19	39.	.02	<.05
5)BROMONT	08/01/75 27	2.38 2.78	<.1	1.0	.05	.50	.05	3.5	1.0	1.17	.58	.02	<.02	.02	.05	3.0	.0	4.28	40.	.04	<.05
6)FARNHAM	09/01/75 27	2.66 3.15	<.1	1.5	<.05	1.00	.10	4.8	1.0	1.17	2.10	<.01	.09	.12	.16	5.0	.0	5.46	36.	.01	<.05
7)FLEURY	09/01/75 27	2.19 2.49	<.1	1.8	.05	1.10	.08	3.9	.9	.79	.77	.06	.03	.05	.07	3.5	.0	5.69	28.	.02	<.05
8)GRANBY	07/01/75 27	2.15 2.47	<.1	3.0	.10	1.20	.10	5.7	1.3	1.35	.63	.03	<.02	<.02	<.02	3.5	.0	5.15	39.	.03	.10
9)KNOWLTON	08/01/75 27	2.15 2.30	<.1	.5	<.05	.30	.08	2.2	.8	1.02	.30	.06	<.02	<.02	.05	3.0	.0	4.17	38.	.02	<.05
10)ROUEMONT	09/01/75 27	2.67 3.19	<.1	1.0	.10	.50	.05	2.4	.7	1.15	.36	.02	<.02	.03	.06	2.0	.0	4.29	37.	.03	<.05
11)ROXTON-FALLS	08/01/75 27	2.48 2.73	<.1	.6	.05	1.00	.05	3.7	.9	1.17	1.10	<.01	.05	.04	.05	3.0	.0	4.80	35.	.02	<.05
12)ST-GUILLAUME	09/01/75 27	1.33 1.67	<.1	1.2	.08	1.10	.20	2.8	1.0	.79	.41	.02	<.02	.02	.05	3.0	.0	4.80	26.	.03	<.05
13)ST-HYACINTHE	09/01/75 27	2.07 2.36	<.1	3.0	.10	.70	.06	4.2	1.2	.81	.25	.01	<.02	<.02	.02	3.0	.0	6.02	29.	<.01	<.05
14)ST-NAZAIRE	07/01/75 27	2.49 2.84	<.1	1.8	.10	.50	.05	3.8	.8	1.35	.80	<.01	.05	.03	.06	3.5	.0	4.58	36.	.03	.05
15)ST-VALERIEN	07/01/75 27	2.83 3.17	<.1	1.8	.10	3.00	.10	7.6	3.4	1.35	3.00	<.01	.25	.25	.32	5.0	.0	5.62	56.	.01	.05
16)STE-ROSALIE	07/01/75 27	1.66 1.86	<.1	2.5	.10	.40	.10	4.1	1.0	1.15	.70	.05	.03	.03	.06	3.0	.0	5.56	30.	.02	<.05
17)SUTTON-JCT	08/01/75 27	3.13 3.71	<.1	.6	<.05	1.00	.05	2.7	.7	1.15	.50	.02	<.02	<.02	.03	3.5	.0	4.21	39.	.02	<.05
18)UPTON	07/01/75 27	2.33 2.61	<.1	2.8	.06	2.30	.08	5.3	.9	1.17	1.20	.04	.02	.02	.05	4.5	.5	6.10	42.	.01	<.05
19)VALCOURT	08/01/75 27	2.60 2.60	<.1	.6	<.05	.50	.02	2.5	.6	1.08	.56	.04	<.02	.02	.05	2.5	.0	4.39	31.	.03	<.05
20)WARDEN	08/01/75 27	3.44 3.80	<.1	.8	.05	1.90	.06	2.5	3.2	1.04	.63	.02	.02	.02	.06	3.0	.0	4.36	41.	.02	<.05
MOYENNE		2.39 2.72	<.1	1.5	.06	1.05	.07	4.1	1.2	1.14	1.06	.03	.03	.04	.07	3.4	.0	4.61	38.	.02	<.05
MEDIANE		2.35 2.60	<.1	1.4	.05	.90	.06	3.8	1.0	1.16	.66	.02	<.02	.02	.05	3.3	.0	4.80	37.	.02	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:		20 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:		0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU B.7 Données obtenues au mois de février 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																				
			IBRE DE JOURS	PERIODE MOIS	ISO2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1)BETHANIE	04/02/75	28	2.36	2.16	<.1	.6	<.05	1.00	.10	5.2	.9	1.17	1.20	.30	.03	.03	.03	2.5	.0	4.42	38.	.04	.05
2)BONSECOURS	04/02/75	28	3.29	2.67	<.1	.4	<.05	1.50	.10	4.4	1.6	1.17	1.60	.40	.02	.03	.03	3.0	.0	4.34	40.	.04	<.05
3)BRIT-MILLS	03/02/75	28	1.18	1.18	.1	.1	1.90	1.20	.10	8.1	2.0	1.13	2.60	.20	.02	.02	.02	2.5	.0	5.44	45.	<.01	<.05
4)BROME	04/02/75	28	3.00	2.40	<.1	.3	<.05	.50	.10	2.2	.4	.70	.31	.03	<.02	.02	.03	2.0	.0	4.12	32.	.01	<.05
5)BROMONT	04/02/75	28	2.81	2.35	<.1	.6	<.05	.70	.10	4.5	.8	1.04	.63	.01	.02	.04	.04	2.5	.0	4.05	46.	.06	<.05
6)FARNHAM	05/02/75	28	2.80	2.72	<.1	1.0	<.05	.70	.10	6.1	.8	1.11	1.65	1.35	.04	.06	.06	3.0	.0	4.56	31.	.02	<.05
7)FLEURY	05/02/75	28	1.74	1.74	.1	1.5	.10	1.00	.10	7.6	1.7	1.13	1.60	.18	.08	.08	.11	3.0	.0	4.89	41.	.04	<.05
8)GRANBY	03/02/75	28	2.38	2.21	.1	.8	.09	1.00	.10	5.3	1.3	1.08	.51	.03	.03	.03	.03	2.5	.0	4.31	41.	.10	<.05
9)KNOWLTON	04/02/75	28	2.88	2.16	<.1	.8	<.05	.50	.10	2.8	.5	.84	.39	.11	.03	.05	.05	2.5	.0	4.27	29.	.02	<.05
10)ROUGEMONT	05/02/75	28	2.04	2.04	<.1	.5	.05	.70	.10	3.8	1.1	1.02	.58	.04	.02	.03	.04	2.0	.0	-	43.	.04	<.05
11)ROXTON-FALLS	04/02/75	28	1.70	1.56	<.1	.4	.05	.70	.10	8.7	1.1	1.06	1.20	.07	.03	.04	.05	2.0	.0	4.30	38.	.03	<.05
12)ST-GUILLAUME	05/02/75	28	1.14	1.14	.1	.6	.08	1.00	.20	5.5	.9	1.08	.94	.32	.20	.22	.28	4.0	.0	4.26	38.	.07	<.05
13)ST-HYACINTHE	05/02/75	28	1.60	1.60	.1	4.5	.10	3.20	.70	8.7	3.9	.99	.42	.03	.10	.10	.10	7.0	.0	6.05	52.	<.01	<.05
14)ST-NAZAIRE	03/02/75	28	1.98	1.98	.1	1.0	.10	1.20	.20	5.5	1.0	1.08	.82	.10	.11	.12	.18	4.0	.0	4.30	37.	.03	<.05
15)ST-VALERIE	03/02/75	28	1.48	1.48	.1	2.0	.1085	1.00	.50	8.9	14.0	.79	2.90	.10	.11	.12	.12	5.0	.0	6.14	447.	<.01	.05
16)STE-ROSALIE	03/02/75	28	1.48	1.48	.1	2.8	.10	7.00	.20	6.1	9.8	.99	.78	.14	.04	.04	.05	3.5	.0	5.60	62.	<.01	<.05
17)SUTTON-JCT	04/02/75	28	4.75	3.83	<.1	.5	<.05	.50	.10	3.2	1.5	.88	.72	.02	<.02	<.02	<.02	2.0	.0	4.12	37.	.02	<.05
18)UPTON	03/02/75	28	2.19	2.16	.1	1.3	<.05	4.10	.10	9.5	1.2	1.15	1.70	1.20	.03	.03	.03	6.5	.0	5.61	51.	<.01	<.05
19)VALCOURT	04/02/75	28	2.60	2.10	.1	.6	<.05	1.20	.10	4.1	.6	1.02	.77	.19	.03	.05	.06	3.0	.0	4.33	32.	.05	<.05
20)WARDEN	04/02/75	28	2.72	2.44	.2	.4	.05	2.10	.10	3.0	2.5	.93	.62	.03	.02	.04	.05	2.0	.0	4.24	39.	.03	<.05
MOYENNE			2.31	2.07	<.1	1.0	.14	5.74	.16	5.7	7.4	1.02	1.10	.24	.05	.06	.07	3.2	.0	4.41	61.	.03	<.05
MEDIANE			2.27	2.13	.1	.6	.05	1.00	.10	5.4	1.1	1.05	.80	.11	.03	.04	.05	2.8	.0	4.33	39.	.03	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

TABLEAU B.8 Données obtenues au mois de mars 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM		PRECIPITATION		CONCENTRATIONS																		
	IRRE DE JOURS	PERIODE MOIS	10102	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN		
1) BETHANIE	04/03/75	29	2.98	3.18	<.1	1.8	.10	1.60	.02	3.7	1.2	.93	.95	.20	<.02	.02	.02	2.2	.0	6.03	29.	<.01	<.05
2) BONSECOURS	04/03/75	29	4.00	4.60	<.1	.6	.10	3.00	.02	2.8	4.3	.93	.16	.81	<.02	.02	.04	2.6	.0	4.81	39.	.03	<.05
3) BRIT-MILLS	03/03/75	29	2.60	2.60	<.1	1.0	.10	1.20	.05	3.8	1.8	.86	1.05	.45	.02	.04	.06	2.4	.0	5.92	30.	<.01	<.05
4) BROME	04/03/75	29	3.53	4.03	<.1	.2	.10	1.20	.02	2.3	1.2	.50	.30	.09	<.02	<.02	.06	2.8	.0	4.46	25.	.02	<.05
5) BROMONT	04/03/75	30	3.65	3.81	<.1	.4	.10	1.50	.02	2.5	1.1	.68	.44	.06	.02	.02	.04	2.0	.0	4.37	29.	.05	<.05
6) FARNHAM	05/03/75	29	4.32	4.24	<.1	.6	.10	1.20	.10	3.3	1.0	.77	.85	.27	.02	.05	.08	3.6	.0	4.91	26.	.02	<.05
7) FLEURY	05/03/75	30	5.91	4.50	<.1	.8	.10	1.60	.05	3.0	1.7	.59	.72	.13	.05	.05	.05	3.0	.0	5.47	25.	.01	<.05
8) GRANBY	03/03/75	30	3.59	3.76	.1	1.4	.10	1.20	.05	4.1	1.5	.75	.35	.13	<.02	.02	.04	2.2	.0	4.82	28.	.05	<.05
9) KNOWLTON	04/03/75	29	2.84	3.55	<.1	.3	.10	1.50	.02	2.0	1.2	.56	.37	.05	.02	.03	.07	2.0	.0	4.32	29.	.02	<.05
10) ROUEMONT	05/03/75	29	3.99	3.75	<.1	.5	.10	1.70	.02	2.6	1.1	.61	.33	.05	.02	.02	.04	1.8	.0	4.46	27.	.03	<.05
11) ROXTON-FALLS	04/03/75	29	2.26	2.40	<.1	.4	.10	1.90	.02	3.6	1.1	.84	1.40	.10	.04	.05	.06	2.5	.0	4.95	28.	<.01	<.05
12) ST-GUILLAUME	05/03/75	37	3.06	1.86	.2	1.5	.10	1.00	.10	2.3	1.6	.54	.37	.16	.03	.03	.05	2.0	.0	5.75	23.	.05	<.05
13) ST-HYACINTHE	05/03/75	30	5.79	4.39	<.1	4.8	.10	1.30	.40	4.7	1.9	.56	.24	.09	<.02	.02	.08	3.6	.3	7.00	36.	<.01	<.05
14) ST-NAZAIRE	03/03/75	29	3.42	3.42	<.1	.9	.10	1.30	.05	3.9	1.4	.75	.55	.08	<.02	.02	.03	2.8	.0	4.70	29.	.02	<.05
15) ST-VALERIE	03/03/75	29	3.45	3.45	<.1	.7	.10	1.00	.10	4.7	1.7	.90	1.95	.05	.18	.20	.24	3.2	.0	5.36	33.	<.01	<.05
16) STE-ROSALIE	03/03/75	32	4.60	3.70	<.1	2.7	.10	1.70	.02	3.2	1.3	.68	.43	.05	<.02	.02	.04	2.0	.0	6.39	28.	<.01	<.05
17) SUTTON-JCT	04/03/75	29	3.92	4.84	<.1	.2	.10	1.60	.50	2.2	1.2	.68	.68	.12	.09	.10	.14	2.4	.0	4.40	28.	.02	<.05
18) UPTON	03/03/75	29	3.50	3.53	<.1	3.6	.10	3.00	.05	5.0	1.3	.81	.77	.25	.02	.04	.09	6.2	.3	6.79	42.	<.01	<.05
19) VALCOURT	04/03/75	29	4.07	4.57	<.1	.4	.10	1.30	.02	2.6	1.1	1.11	.53	.18	<.02	.04	.04	3.3	.0	4.22	35.	.06	<.05
20) WARDEN	04/03/75	29	3.37	3.65	<.1	.2	.10	1.20	.02	2.3	1.5	.63	.50	<.01	<.02	.02	.05	1.8	.0	4.39	29.	.02	<.05
MOYENNE			3.74	3.69	<.1	1.1	.10	1.20	.08	3.2	1.5	.73	.65	.17	.03	.04	.07	2.7	.0	4.71	30.	.02	<.05
MEDIANE			3.56	3.72	<.1	.6	.10	1.20	.03	3.1	1.3	.71	.52	.11	.02	.03	.05	2.5	.0	4.86	29.	.02	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU B.9 Données obtenues au mois d'avril 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM PERIODE MOIS	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																		
			SI	O2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE
1) BETHANIE	08/04/75 23	.74 2.64	.1	1.8	<.05	.10	.10	5.5	.6	.65	.80	.17	.03	.03	.03	3.0	.0	5.14	29.	<.01	<.05
2) BONSECOURS	08/04/75 25	1.36 4.09	.1	1.5	.05	.10	.10	6.0	1.1	.81	.70	.27	.03	.03	.03	3.5	.0	4.37	40.	.03	<.05
3) BRIT-HILLS	08/04/75 23	.87 2.03	.1	2.0	.10	.10	.20	6.0	.5	.84	1.20	2.00	.08	.08	.08	3.5	.0	4.61	35.	.02	<.05
4) BROME	08/04/75 23	1.08 3.10	.1	1.5	.05	.08	.02	5.0	.2	.52	.37	.08	<.02	.03	.06	2.5	.0	4.43	31.	.02	<.05
5) BROMONT	08/04/75 23	1.05 3.10	.1	1.7	.10	.10	1.40	9.5	.7	1.69	3.20	4.50	2.30	2.60	2.70	4.6	.4	5.84	-	.01	<.05
6) FARNHAM	08/04/75 23	.82 3.20	.1	1.8	.05	.30	.30	7.0	.6	.75	2.60	1.00	.09	.10	.15	4.0	.0	6.61	41.	<.01	<.05
7) FLEURY	08/04/75 23	1.15 2.76	.1	3.2	.10	.10	.40	7.0	.6	.99	1.40	<.01	.20	.20	.25	4.2	.0	5.36	35.	<.01	<.05
8) GRANBY	08/04/75 23	.91 3.03	.1	2.3	.07	.00	.20	4.0	.9	.52	.40	.01	.11	.14	.15	3.0	.0	5.08	24.	<.01	<.05
9) KNOWLTON	08/04/75 28	1.44 2.98	.1	1.7	.10	.06	.10	7.5	.4	.95	.67	.06	.10	.07	.10	3.2	.0	4.00	55.	.08	<.05
10) ROUGE MONT	08/04/75 23	.87 3.25	.1	2.1	.07	.10	.05	4.5	.4	.79	.40	.05	<.02	.02	.06	2.0	.0	4.55	26.	.02	<.05
11) ROXTON FALLS	08/04/75 23	.46 2.76	.1	1.2	.10	<.05	.02	4.9	.2	.36	1.00	.03	.04	.06	.08	4.0	.0	4.19	36.	.03	<.05
12) ST-GUILLEAUME	11/04/75 20	.76 1.94	.1	4.5	.10	.10	.10	7.5	.5	1.17	.70	.01	.03	.03	.06	3.5	.0	4.87	40.	.03	<.05
13) ST-HYACINTHE	08/04/75 23	.72 2.47	.1	8.2	.10	1.40	1.60	8.5	2.0	.99	.56	.08	.40	.40	.42	21.0	.6	6.65	168.	.07	<.05
14) ST-NAZAIRE	08/04/75 23	.83 2.43	.1	4.3	.10	.20	.40	7.0	1.1	1.58	1.00	.06	.12	.13	.15	4.0	.0	5.06	43.	<.01	<.05
15) ST-VALERIEN	03/04/75 23	.70 2.73	.1	3.1	.20	.30	.40	7.0	.8	1.11	1.30	.07	.31	.30	.43	4.2	.0	5.04	41.	<.01	<.05
16) STE-ROSALIE	08/04/75 23	.78 2.78	.1	4.7	.20	.20	1.00	7.5	.7	1.06	.66	.02	.05	.05	.08	3.8	.7	6.75	45.	.03	<.05
17) SUTTON-JCT	08/04/75 23	.97 2.87	.1	1.3	.05	.06	.02	5.0	.2	.50	.50	.05	.05	.05	.08	3.0	.0	4.42	30.	.01	<.05
18) UPTON	08/04/75 23	.80 2.40	.1	4.5	.09	.08	.05	8.5	.5	1.13	.70	.09	.02	<.02	.05	2.9	.6	6.65	43.	<.01	<.05
19) VALCOURT	08/04/75 23	1.12 3.72	.1	.9	.10	.08	1.40	4.5	.4	.36	1.20	5.15	1.50	1.70	1.80	8.0	.0	4.97	24.	<.01	<.05
20) WARDEN	08/04/75 23	1.16 3.18	.1	1.2	.08	.20	.10	5.0	.5	.52	.60	.01	.04	.02	.09	2.0	.0	4.40	32.	.02	<.05
MOYENNE		.93 2.87	.1	2.7	.09	.22	.40	6.4	.6	.86	1.00	.69	.28	.30	.34	4.5	.1	4.66	43.	.02	<.05
MEDIANE		.87 2.83	.1	1.9	.10	.10	.15	6.5	.6	.82	.70	.07	.06	.06	.08	3.5	.0	5.00	36.	.02	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:		20 20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:		0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

TABLEAU B.10 Données obtenues au mois de mai 1975.

STATIONS	IDERUT ET NOM	IPRECIPITATIONI	CONCENTRATIONS																				
			IBRE DE JOURS	IPERIODE	IMOIS	ISIO2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE
1)BETHANIE	01/05/75	31	2.73	2.73	.1	1.4	.10	<.05	.05	5.2	<.1	.23	1.20	.04	.07	.07	.12	5.0	.0	4.15	36.	.04	<.05
2)BONSECOURS	03/05/75	29	3.25	3.42	.1	.5	.10	<.05	.02	4.9	<.1	.32	.88	.03	.06	.06	.12	4.5	.0	3.96	41.	.03	<.05
3)BRIT-MILLS	01/05/75	31	3.02	3.02	<.1	2.9	.20	<.05	.10	5.9	.2	1.08	1.03	.02	.13	.10	.13	5.0	.0	4.74	32.	.03	<.05
4)BROME	01/05/75	31	3.54	3.54	<.1	.4	.10	.05	.05	6.6	.4	.45	.80	.03	.04	.05	.08	5.0	.0	3.78	62.	.05	<.05
5)BROMONT	/ /	0	-	3.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6)FARNHAM	01/05/75	31	3.68	3.68	<.1	.9	.10	<.05	.20	5.4	<.1	.23	2.30	.10	.33	.30	.40	13.0	.0	4.77	28.	.02	<.05
7)FLEURY	01/05/75	31	2.83	2.83	<.1	.1	.20	<.05	.40	6.0	.2	.34	1.18	.04	.20	.25	.35	7.0	.0	4.51	29.	.03	<.05
8)GRANBY	01/05/75	31	3.08	3.08	.2	2.6	.20	.30	1.30	5.3	.7	.32	2.30	3.50	2.10	2.00	2.30	12.0	1.5	5.19	39.	.03	<.05
9)KNOWLTON	06/05/75	26	2.80	3.22	6.6	19.0	3.20	4.70	.70	11.4	7.0	.45	.02	<.01	<.02	<.02	<.02	7.0	7.0	7.52	146.	.01	<.05
10)ROUEMONT	01/05/75	31	2.49	2.49	<.1	1.2	.10	<.05	.10	5.5	<.1	.34	1.00	.03	.16	.20	.29	4.5	.0	4.13	39.	.05	<.05
11)ROXTON-FALLS	01/05/75	31	2.65	2.65	.1	.9	.10	<.05	.05	5.0	.3	.43	.80	.11	.12	.10	.13	4.0	.0	3.97	43.	.04	<.05
12)ST-GUILLEAUME	01/05/75	31	2.71	2.71	<.1	1.5	.10	<.05	.10	5.9	<.1	.23	.89	.04	1.50	1.60	1.70	5.0	.0	4.07	52.	.03	<.05
13)ST-HYACINTHE	01/05/75	31	3.32	3.32	<.1	3.6	.30	1.30	4.90	10.1	1.9	.27	7.00	13.00	8.00	8.25	9.50	32.0	6.0	6.06	97.	.03	<.05
14)ST-NAZAIRE	01/05/75	31	2.28	2.28	<.1	2.2	.10	<.05	.20	6.2	.2	.95	1.38	.05	.12	.13	.21	6.0	.0	4.49	31.	.03	<.05
15)ST-VALERIE	01/05/75	31	3.33	3.33	.1	1.2	.10	.20	.30	3.5	.5	.56	1.45	.45	.50	.42	.52	5.0	.0	5.29	22.	.03	<.05
16)STE-ROSALIE	01/05/75	31	3.58	3.58	.3	3.0	.10	<.05	.10	5.2	.2	.77	.64	<.01	.08	.07	.09	4.0	.0	5.07	28.	.02	<.05
17)SUTTON-JCT	01/05/75	31	2.91	2.91	<.1	1.0	.20	<.05	.70	7.0	.2	.16	2.10	2.30	.80	.80	2.10	12.0	.0	3.83	58.	.03	<.05
18)UPTON	01/05/75	31	2.14	2.14	<.1	6.2	.20	.10	.90	6.6	.7	.93	2.60	.50	.22	.15	1.21	8.5	2.0	7.01	57.	.02	<.05
19)VALCOURT	01/05/75	31	2.91	2.91	.1	.6	.10	<.05	.05	5.3	<.1	.36	.80	.04	.06	.06	.08	4.5	.0	3.94	48.	.05	<.05
20)WARDEN	01/05/75	32	3.02	2.93	.1	.9	.10	<.05	.02	5.4	.2	.34	.76	.02	.05	.07	.10	5.0	.0	3.91	52.	.04	<.05
MOYENNE			2.96	3.00	.4	2.6	.30	.36	.54	6.1	.7	.46	1.53	1.07	.77	.77	1.02	7.8	.9	4.23	49.	.03	<.05
MEDIANE			2.91	2.97	<.1	1.2	.10	<.05	.10	5.5	.2	.34	1.03	.04	.13	.13	.21	5.0	.0	4.49	41.	.03	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			19	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABLEAU B.11 Données obtenues au mois de juin 1975.

STATIONS	DERUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																				
			PERIODE MOIS	SI	O2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1) BETHANIE	01/06/75	30	2.54	2.54	<.1	.5	<.05	<.05	.10	3.1	.3	.34	.38	.02	.04	.05	.12	2.0	.0	4.50	17.	.01	<.05
2) BONSECOURS	01/06/75	30	2.75	2.75	<.1	.3	<.05	<.05	.20	3.8	.6	.32	.54	<.01	.08	.08	.10	3.0	.0	4.33	23.	.01	<.05
3) BRIT-MILLS	01/06/75	30	1.67	1.67	<.1	.6	.06	<.05	.20	4.9	.2	.54	.48	.06	.08	.10	.13	3.0	.0	4.35	23.	.02	<.05
4) BROME	01/06/75	30	2.68	2.68	<.1	.2	<.05	<.05	.20	4.1	.6	.29	.34	<.01	.02	.03	.03	3.0	.0	4.11	29.	.02	<.05
5) BROMONT	/ /	=0	=	2.61	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
6) FARNHAM	01/06/75	30	2.07	2.07	<.1	.5	<.05	<.05	.20	4.1	.5	.36	1.05	.02	.04	.04	.14	3.0	.0	5.03	19.	<.01	<.05
7) FLEURY	01/06/75	30	1.99	1.99	<.1	.7	.10	<.05	.20	5.2	.7	.38	1.50	3.00	.92	.79	1.08	4.5	.0	4.38	25.	.01	<.05
8) GRANBY	01/06/75	30	2.72	2.72	<.1	1.4	.05	<.05	.10	4.0	.3	.41	.35	<.01	<.02	<.02	<.02	3.0	.0	4.77	18.	.02	<.05
9) KNOWLTON	01/06/75	30	2.58	2.58	<.1	.2	<.05	.40	.20	3.9	.9	.23	.26	.14	.04	.05	.08	3.0	.0	4.45	22.	.13	<.05
10) ROUEMONT	01/06/75	30	3.10	3.10	<.1	.3	<.05	<.05	.10	3.5	.5	.36	.40	.04	.04	.03	.06	3.0	.0	4.29	25.	.02	<.05
11) ROXTON-FALLS	01/06/75	30	2.96	2.96	<.1	.4	.09	<.05	1.20	5.2	.5	.32	2.10	1.10	2.70	2.70	4.00	5.0	.0	5.75	32.	.01	<.05
12) ST-GUILLEUME	01/06/75	30	2.41	2.41	<.1	.5	.05	<.05	.30	4.6	.5	.34	.83	.41	.40	.36	.47	3.0	.0	4.17	29.	.01	<.05
13) ST-HYACINTHE	01/06/75	30	2.45	2.45	.1	3.2	.20	2.30	1.50	6.2	2.8	.43	4.20	<.01	2.00	1.90	2.10	20.0	.0	6.85	68.	.01	<.05
14) ST-NAZAIRE	01/06/75	30	1.78	1.78	<.1	.8	.06	<.05	.20	6.3	.5	.68	.80	.08	.10	.12	.18	4.0	.0	4.15	35.	.03	<.05
15) ST-VALERIE	01/06/75	30	1.76	1.76	<.1	.8	.30	.10	1.20	5.9	.8	.45	3.40	2.20	2.00	2.10	1.60	6.0	.0	5.77	44.	.01	<.05
16) STE-ROSALIE	01/06/75	30	1.73	1.73	<.1	1.6	.10	<.05	.20	6.1	.3	.63	.56	<.01	.05	.06	.08	4.0	.0	4.50	32.	.04	<.05
17) SUTTON-JCT	01/06/75	30	2.49	2.49	.1	1.0	.40	.50	4.30	7.3	1.4	.25	4.00	9.80	6.60	6.60	7.40	22.0	.0	6.51	110.	.02	<.05
18) UPTON	01/06/75	30	1.53	1.53	.1	4.3	.40	.30	2.20	6.9	1.3	.70	3.20	.30	2.10	2.20	2.30	10.0	.0	7.31	71.	.01	<.05
19) VALCOURT	01/06/75	30	2.11	2.11	<.1	.2	<.05	<.05	.05	3.5	.3	.36	.39	.05	.02	.03	.05	2.5	.0	4.29	26.	.02	<.05
20) WARDEN	02/06/75	29	2.33	2.42	<.1	.2	<.05	<.05	.20	2.9	.7	.36	.47	.05	.05	.05	.09	2.5	.0	4.31	22.	.02	<.05
MOYENNE			2.30	2.32	<.1	.9	.10	.20	.68	4.8	.7	.41	1.33	1.91	.91	.91	1.58	5.6	.0	4.48	35.	.02	<.05
MEDIANE			2.41	2.44	<.1	.5	.05	<.05	.20	4.6	.5	.36	.56	.05	.08	.08	.13	3.0	.0	4.45	26.	.02	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			19	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABLEAU B.12 Données obtenues au mois de juillet 1975.

STATIONS	DEBUT ET FIN PERIODE MOIS	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																		
			SO2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1) BETHANIE	01/07/75 31	6.10 6.10	.1	.5	.05	<.05	.09	2.9	.3	.36	.35	.03	.02	.04	.05	4.0	.0	4.31	26.	.03	<.05
2) BONSECOURS	01/07/75 31	6.59 6.59	.9	2.8	1.00	.50	.09	3.6	.6	.50	.45	<.01	.04	.17	.45	5.0	1.0	6.25	34.	.01	<.05
3) BRIT-MILLS	01/07/75 31	5.02 5.02	.1	.7	.10	<.05	.40	4.5	.5	.36	1.10	.70	.47	.48	.75	6.0	.0	4.99	23.	.04	<.05
4) BROME	01/07/75 31	8.51 8.51	.4	.2	.10	<.05	2.60	3.7	.6	.23	1.60	3.60	2.90	3.80	6.70	13.0	1.0	5.01	29.	.02	<.05
5) BROMONT	/ / 0	- 3.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6) FARNHAM	01/07/75 31	5.20 5.20	.1	.6	.09	<.05	.20	5.1	.5	.43	.72	.07	.14	.13	.29	6.0	.0	4.29	32.	.02	<.05
7) FLEURY	01/07/75 31	6.58 6.58	.1	.9	.10	<.05	.30	4.6	.4	.41	.61	.03	.15	.20	.32	6.0	.0	4.48	25.	.02	<.05
8) GRANBY	01/07/75 31	4.52 4.52	.2	3.5	.09	.05	.50	5.4	.4	.52	.73	1.07	.62	.67	.72	10.0	.0	4.94	33.	.02	<.05
9) KNOWLTON	01/07/75 31	7.93 7.93	1.5	4.8	.70	1.60	.30	4.3	2.9	.23	.18	.12	<.02	<.02	.02	4.5	1.5	6.52	44.	.02	<.05
10) ROUEMONT	01/07/75 31	5.47 5.47	.1	.4	.05	<.05	.09	5.2	.2	.38	.45	.04	.03	.06	.10	5.0	.0	4.12	40.	.02	<.05
11) ROXTON-FALLS	01/07/75 31	5.36 5.36	.1	.4	.08	<.05	.10	3.1	.3	.34	.71	.17	.06	.07	.08	5.5	.0	4.49	23.	.02	<.05
12) ST-GUILLAUME	01/07/75 31	5.24 5.24	.1	.8	.08	<.05	.10	3.9	.1	.34	.56	.16	.10	.11	.24	5.0	.0	4.56	19.	.02	<.05
13) ST-HYACINTHE	01/07/75 31	5.96 5.96	.3	1.0	.20	<.05	2.40	5.8	.4	.36	1.80	3.20	2.40	3.25	5.10	13.0	.8	4.86	33.	.02	<.05
14) ST-NAZAIRE	01/07/75 31	4.43 4.43	.1	1.2	.10	<.05	.30	4.3	.3	.43	.78	.52	.36	.35	.76	6.0	.0	4.55	41.	.02	<.05
15) ST-VALERIEEN	01/07/75 31	4.55 4.55	.6	1.3	.40	.06	1.00	3.2	1.2	.38	1.50	2.50	.85	.90	2.70	14.0	.8	5.28	30.	.02	<.05
16) STE-ROSALIE	01/07/75 31	4.65 4.65	.1	1.2	.10	<.05	.20	4.7	.6	.50	.60	.02	.09	.10	.14	5.0	.0	4.38	30.	.05	<.05
17) SUTTON-JCT	01/07/75 31	7.35 7.35	.5	.4	.20	<.05	2.40	5.4	.6	.25	3.60	5.60	5.00	5.80	10.40	15.0	1.0	5.56	69.	.02	<.05
18) UPTON	01/07/75 31	5.39 5.39	.1	3.6	.20	<.05	.50	6.1	.7	.70	1.30	.30	.28	.28	.43	7.5	.5	6.42	40.	.02	<.05
19) VALCOURT	01/07/75 31	4.24 4.24	.1	.5	.05	<.05	.10	4.0	.3	.41	.58	.02	<.02	.03	.03	5.0	.0	4.27	30.	.04	<.05
20) WARDEN	01/07/75 31	4.08 4.08	.3	.3	.05	<.05	.10	3.6	.6	.32	.45	.09	.07	.08	.30	5.0	.0	4.32	27.	.02	<.05
MOYENNE		5.64 5.55	.3	1.3	.20	.14	.62	4.4	.6	.39	.95	.96	.72	.87	1.56	7.4	.3	4.58	33.	.02	<.05
MEDIANE		5.36 5.30	.1	.8	.10	<.05	.30	4.3	.5	.38	.71	.16	.14	.17	.32	6.0	.0	4.56	30.	.02	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:		19 20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:		1 0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABLEAU B.13 Données obtenues au mois d'août 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																				
			PREMIER JOUR	PERIODE	MOIS	SI	O2	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND
1) BETHANIE	01/08/75	31	3.71	3.71	<.1	.7	.05	.50	.08	3.7	.2	.50	.41	.03	.02	.07	.09	-	-	4.30	26.	.02	<.05
2) BONSECOURS	01/08/75	31	3.91	3.91	.4	1.6	.40	.10	.08	3.3	.2	.43	.36	.11	.04	.04	.06	-	-	5.77	19.	<.01	<.05
3) BRIT-MILLS	01/08/75	31	2.29	2.29	<.1	.9	.08	<.05	.08	3.8	.1	.47	.47	.01	<.02	<.02	<.02	-	-	4.48	26.	.02	<.05
4) BROME	01/08/75	31	4.63	4.63	.1	.6	.10	.50	.70	3.3	.2	.32	.65	1.30	1.20	1.45	1.52	-	-	4.60	18.	.01	<.05
5) BROMONT	/ /	0	-	3.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6) FARNHAM	01/08/75	31	2.84	2.84	<.1	.9	.08	.10	.10	4.7	.1	.65	1.50	.11	.14	.14	.18	-	-	5.38	23.	<.01	<.05
7) FLEURY	01/08/75	31	1.16	1.16	.1	4.1	.30	.30	1.20	7.5	.6	1.13	1.10	.47	.45	.46	.67	-	-	5.77	43.	.01	<.05
8) GRANBY	01/08/75	31	2.74	2.74	.3	6.0	.10	.20	.10	5.2	.1	.81	.22	.08	<.02	<.02	<.02	-	-	6.11	39.	.01	<.05
9) KNOWLTON	01/08/75	31	4.76	4.76	<.1	.4	<.05	.10	.40	2.9	.4	.43	.28	.13	<.02	.02	.02	-	-	4.51	20.	.01	<.05
10) ROUEMONT	01/08/75	31	1.98	1.98	<.1	1.0	.10	.10	.30	5.8	.1	.70	1.20	.04	.35	.34	.52	-	-	4.45	33.	.01	<.05
11) ROXTON-FALLS	01/08/75	31	2.33	2.33	.1	1.6	.20	.30	1.00	5.9	.2	.90	.90	.16	.25	.28	.58	-	-	4.46	35.	.03	<.05
12) ST-GUILLAUME	01/08/75	31	2.13	2.13	.1	1.9	.30	.30	1.20	4.9	.5	.50	1.30	2.90	1.50	1.50	2.20	-	-	5.76	32.	<.01	<.05
13) ST-HYACINTHE	01/08/75	31	1.72	1.72	.1	4.5	.20	.10	.50	8.2	.2	1.06	.82	.24	.23	.22	.29	-	-	5.24	39.	.02	<.05
14) ST-NAZAIRE	01/08/75	31	2.33	2.33	<.1	1.5	.10	.10	.20	4.8	.1	.68	.71	.02	.13	.18	.21	-	-	4.38	29.	.02	<.05
15) ST-VALERIEN	01/08/75	31	1.90	1.90	<.1	1.7	.10	.30	.20	5.7	.2	1.31	1.40	.02	.15	.18	.33	-	-	4.53	34.	.02	.05
16) STE-ROSALIE	01/08/75	31	3.21	3.21	<.1	1.9	.10	.10	.50	4.4	.2	.56	.70	.69	.37	.40	.64	-	-	4.80	25.	.01	<.05
17) SUTTON-JCT	01/08/75	31	4.90	4.90	<.1	.5	<.05	.10	.10	3.1	.1	.41	.44	.34	.13	.12	.25	-	-	-	24.	.01	<.05
18) UPTON	01/08/75	31	2.57	2.57	<.1	4.3	.10	.10	.40	4.7	.3	.61	.81	.13	.50	.47	.65	-	-	6.24	34.	.01	<.05
19) VALCOURT	01/08/75	31	2.97	2.97	.2	.5	.08	.10	.10	4.4	.2	.47	.99	.19	.15	.16	.33	-	-	4.42	26.	.01	<.05
20) WARDEN	01/08/75	31	3.27	3.27	<.1	.6	.05	.30	.08	3.5	.1	.45	.42	.05	.04	.07	.13	-	-	4.25	26.	.01	<.05
MOYENNE			2.91	2.94	.1	1.9	.13	.20	.39	4.7	.2	.65	.77	.37	.30	.32	.46	-	-	4.65	29.	.01	<.05
MEDIANE			2.74	2.79	<.1	1.5	.10	.10	.20	4.7	.2	.56	.71	.13	.15	.18	.29	-	-	4.56	26.	.01	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			19	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	0	0	18	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	20	2	1	1	1

TABLEAU B.14 Données obtenues au mois de septembre 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																				
			PERIODE MOIS	1902	CA	MG	NA	K	SO4	CL	NO3	NH4	NORG	PO4	PHY	PT	TCC	TIC	PH	COND	FE	MN	
1)BETHANIE	01/09/75	30	4.88	4.88	<.1	.4	<.05	.10	.02	2.5	.3	.38	.58	.04	.02	.02	.03	2.0	.0	4.43	25.	.01	<.05
2)BONSECOURS	01/09/75	30	4.88	4.88	.6	3.1	.90	.10	.02	3.0	.6	.45	.55	.01	.02	.02	.02	4.0	.5	5.90	31.	<.01	<.05
3)BRIT-MILLS	01/09/75	30	5.42	5.42	<.1	.4	<.05	.10	.10	.7	<.1	.18	.32	.06	.02	.02	.04	4.0	.0	5.01	12.	.01	<.05
4)BROME	01/09/75	30	5.97	5.97	.1	.4	.20	.10	.60	2.1	.3	.27	2.40	4.00	1.40	1.40	1.58	9.0	.0	5.99	18.	.01	<.05
5)BROMONT	/ /	0	-	4.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6)FARNHAM	01/09/75	30	4.24	4.24	.1	2.4	.05	.10	.02	2.6	.8	.43	.40	.05	.10	.11	.13	4.1	.4	6.16	25.	<.01	<.05
7)FLEURY	01/09/75	30	6.78	6.78	<.1	.5	.06	.10	.10	1.5	.3	.23	.49	.08	.16	.12	.16	2.0	.0	5.08	12.	.01	<.05
8)GRANBY	01/09/75	30	6.01	6.01	.1	2.3	.08	.10	.06	2.6	.1	.32	.15	.07	.03	.03	.04	3.0	.0	5.70	16.	.01	<.05
9)KNOWLTON	01/09/75	30	5.95	5.95	.1	1.0	.10	.10	.70	2.3	.7	.34	.58	.05	.18	.20	.20	3.0	.0	5.54	15.	.01	<.05
10)ROUGE-MONT	01/09/75	30	5.83	5.83	<.1	.8	.05	.10	.02	2.2	.3	.34	.30	.06	.05	.05	.06	2.5	.0	4.65	22.	.01	<.05
11)ROXTON-FALLS	01/09/75	30	4.59	4.59	<.1	.4	<.05	.10	.02	2.9	.1	.36	.66	.01	.05	.04	.06	2.0	.0	4.52	23.	.02	<.05
12)ST-GUILLAUME	01/09/75	30	5.30	5.30	<.1	.5	<.05	.10	.02	1.6	.1	.25	.27	.02	.03	.03	.05	1.5	.0	4.78	13.	.01	<.05
13)ST-HYACINTHE	01/09/75	30	6.47	6.47	<.1	.8	.06	.10	.10	2.3	.4	.29	.42	.36	.21	.15	.22	3.5	.0	4.90	16.	.01	<.05
14)ST-NAZAIRE	01/09/75	30	6.13	6.13	.1	.5	<.05	.10	.02	1.6	<.1	.25	.36	.04	.03	.05	.06	1.5	.0	4.74	21.	.01	<.05
15)ST-VALERIEN	01/09/75	30	4.57	4.57	.1	.7	.05	.10	.06	2.6	.3	.36	.90	.03	.05	.04	.06	3.0	.0	5.28	16.	.01	<.05
16)STE-ROSALIE	01/09/75	30	5.18	5.18	<.1	.8	.05	.10	.08	1.8	<.1	.27	.55	.12	.15	.15	.15	2.0	.0	4.87	15.	.01	<.05
17)SUTTON-JCT	01/09/75	30	5.93	5.93	.1	.3	.08	.10	.60	2.2	.6	.18	.76	4.24	.70	.79	1.60	7.0	.0	4.70	21.	.01	<.05
18)UPTON	01/09/75	30	4.94	4.94	.1	1.5	.09	.10	.10	1.9	.1	.27	.64	.01	.08	.10	.13	2.5	.0	6.05	17.	.01	<.05
19)VALCOURT	01/09/75	30	4.66	4.66	<.1	.4	<.05	.40	.10	2.5	.4	.36	.54	.01	.12	.12	.12	1.8	.0	4.40	24.	.01	<.05
20)WARDEN	01/09/75	30	5.30	5.30	.1	.3	<.05	.10	.02	2.0	.5	.29	.28	.01	<.02	<.02	<.02	2.0	.0	4.43	23.	.01	<.05
MOYENNE			5.42	5.37	.1	.9	.10	.12	.15	2.2	.3	.31	.59	.49	.18	.18	.25	3.2	.0	4.83	19.	.01	<.05
MEDIANE			5.30	5.30	.1	.5	.05	.10	.06	2.2	.3	.29	.54	.05	.05	.05	.06	2.5	.0	4.90	18.	.01	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:			19	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:			1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABLEAU B.15 Données obtenues au mois d'octobre 1975.

STATIONS	DEBUT ET NOM	PRECIPITATION	CONCENTRATIONS																			
			PERIODE MOIS	SI02	CA	MG	NA	K	804	CL	NO3	NH4	NO3G	P04	PHY	PT	TOC	TIC	PH	COND	FE	MN
1)BETHANIE	01/10/75 31	3.63	3.63	<.1	.5	<.05	<.05	.05	2.2	.1	.54	.50	.01	.05	.05	.06	2.0	.0	4.46	24.	.01	<.05
2)BONSECOURS	01/10/75 31	4.12	4.12	<.1	.3	<.05	<.05	.05	2.4	.1	.52	.46	.03	<.02	.03	.04	1.5	.0	4.30	25.	.01	<.05
3)BRIT-HILLS	01/10/75 31	4.03	4.03	.1	.7	.08	<.05	.10	3.2	.3	.54	.80	.10	.07	.08	.08	1.5	.0	4.83	22.	.01	<.05
4)BROME	01/10/75 31	4.07	4.07	<.1	.3	<.05	<.05	.05	2.7	.1	.50	.50	.05	.05	.06	.06	1.5	.0	4.25	27.	.01	<.05
5)BROMONT	01/10/75 30	-	3.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6)FARNHAM	01/10/75 31	3.41	3.41	<.1	1.7	.06	<.05	.05	3.0	.2	.50	.50	.20	.03	.04	.04	1.8	.0	5.90	19.	<.01	<.05
7)FLEURY	01/10/75 31	3.37	3.37	.1	.7	.07	<.05	.10	4.4	.2	.54	.80	.04	.08	.09	.18	2.0	.0	4.32	30.	.02	<.05
8)GRANBY	01/10/75 31	3.65	3.65	.1	1.2	.08	<.05	.10	3.1	.2	.54	.30	.06	<.02	<.02	<.02	1.5	.0	4.63	24.	.03	<.05
9)KNIGHTON	01/10/75 31	3.93	3.93	<.1	.6	.06	<.05	.20	3.1	.2	.59	.43	.03	.06	.07	.10	1.4	.0	4.45	24.	.03	<.05
10)ROUCEMONT	01/10/75 31	3.04	3.04	.1	.4	<.05	<.05	.02	1.2	.2	.29	.19	.01	.02	.03	.06	1.0	.0	4.66	14.	.02	<.05
11)ROXTON-FALLS	01/10/75 31	3.25	3.25	<.1	.4	<.05	<.05	.02	1.7	.1	.36	.26	.04	<.02	<.02	<.02	1.0	.0	4.48	21.	.01	<.05
12)ST-GUILLAUME	01/10/75 31	3.22	3.22	.1	.6	.06	<.05	.20	3.9	.2	.50	.57	.01	.05	.06	.10	2.0	.0	4.26	31.	.02	<.05
13)ST-HYACINTHE	01/10/75 31	2.99	2.99	.1	1.3	.10	<.05	.20	4.0	.4	.45	.34	.05	.12	.12	.12	2.0	.0	4.59	25.	.03	<.05
14)ST-NAZAIRE	01/10/75 31	3.13	3.13	.1	1.1	.10	<.05	.10	3.3	.2	.41	.87	.13	.16	.16	.16	2.0	.0	4.74	21.	.01	<.05
15)ST-VALERIEN	01/10/75 31	3.05	3.05	.1	.6	.06	<.05	.05	3.5	.1	.47	.70	.36	.06	.07	.07	1.8	.0	4.93	18.	.01	<.05
16)STE-ROSALIE	01/10/75 31	2.76	2.76	<.1	1.3	.09	<.05	.10	3.9	.1	.54	.70	<.01	.02	.02	.02	1.8	.0	4.76	23.	.02	<.05
17)SUTTON-JCT	01/10/75 31	3.79	3.79	.1	.3	<.05	<.05	.10	2.7	.2	.52	.81	.01	.08	.09	.09	1.7	.0	4.38	24.	.01	<.05
18)UPTON	01/10/75 31	4.49	4.49	.1	1.6	.10	<.05	.20	2.3	.4	.38	.80	.14	.12	.12	.12	2.0	.0	6.31	21.	<.01	<.05
19)VALCOURT	01/10/75 34	3.33	3.33	<.1	.4	<.05	<.05	.05	2.6	.1	.52	.44	.04	<.02	.03	.03	1.8	.0	4.35	25.	.01	<.05
20)WARDEN	01/10/75 31	3.71	3.71	<.1	.3	<.05	<.05	.05	2.2	.3	.34	.32	.07	.05	.04	.05	1.3	.0	4.43	19.	.03	<.05
MOYENNE		3.52	3.53	<.1	.8	.05	<.05	.09	2.9	.2	.48	.54	.07	.06	.06	.07	1.7	.0	4.52	23.	.02	<.05
MEDIANE		3.41	3.52	.1	.6	.06	<.05	.10	3.0	.2	.50	.50	.04	.05	.06	.06	1.8	.0	4.48	24.	.01	<.05
NOMBRE DE VALEURS VALIDES:		19	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
NOMBRE DE VALEURS MANQUANTES:		1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ANNEXE C

METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES



C. METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales (Hotelling, 1933; Kendall, 1957; Anderson, 1958) est une méthode qui appartient à la statistique descriptive multidimensionnelle.

C.1 Description théorique

Une série de p variables mesurée sur n observations est représentée par une matrice de dimension $p \times n$ qu'on note X_{pn} . Chaque observation peut être représentée par un point dans un espace à p dimensions. Cependant, comme il peut exister une corrélation entre chaque variable, les p axes de cet espace ne sont pas toujours orthogonaux. L'analyse en composantes principales a pour but de faire subir une transformation aux variables pour rendre les axes orthogonaux et faire en sorte que le premier axe explique le maximum de variance, que le deuxième axe explique le maximum de variance résiduelle, etc...

Le calcul de la première composante principale se résume à la détermination de l'axe tel que la somme des carrés des distances des n points à cet axe soit minimale, ou encore que la somme des carrés des projections des points sur cet axe soit maximale.

Pour déterminer le second axe, on projette les n points dans un plan orthogonal au premier axe et on cherche l'axe tel que la somme

des carrés des distances des points observations soit minimale. On répète ce processus de calcul p fois. Les derniers axes expliquant de moins en moins de variance, les observations peuvent ainsi être représentées dans un sous espace à q dimensions ($q < p$) sans perte importante d'information, ce qui signifie qu'on remplace p variables reliées entre elles par q variables indépendantes.

C.2 Description mathématique

Les calculs peuvent être effectués soit sur les variables observées, soit sur les variables centrées réduites. Dans cette étude, pour que chaque variable ait même poids dans la somme des carrés des distances, on travaille seulement avec les variables centrées réduites. Ainsi, par exemple, si les concentrations en ions hydrogène sont d'un ordre de grandeur différent des concentrations en nitrate, les séries centrées réduites peuvent être considérées homogènes quant à leur moyenne et à leur dispersion.

Notons X la matrice qui représente la série de variables mesurée sur n observations, et x_{ij} l'observation j de la variable i .

Les valeurs centrées réduites nous sont données par

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

y = nouvelle variable centrée réduite de

moyenne = 0

variance = 1

x = variable observée;

\bar{X}_j = moyenne de la j ème variable;

σ_j = l'écart type de la j ème variable.

La recherche des nouveaux axes pour les variables y est faite en respectant les critères suivants: nous choisissons les coefficients de façon à obtenir le maximum de variance pour la première composante; la deuxième composante est déterminée de façon à être orthogonale à la première et à expliquer le maximum de la variance résiduelle; la troisième doit être orthogonale aux deux premières et expliquer le maximum de variance résiduelle, etc...

Considérons n points dans un espace à p dimensions, lorsque les variables sont centrées réduites, c'est-à-dire, lorsque la moyenne est nulle et que la variance est unitaire. L'équation de l'axe des y est:

$$\frac{y_1 - m_1}{C_1} = \frac{y_2 - m_2}{C_2} = \dots \dots \dots \frac{y_p - m_p}{C_p} \quad (2)$$

où les C_i sont les cosinus directeurs de cet axe et sont soumis à la condition:

$$\sum_{i=1}^p c_i^2 = 1$$

et les m_i sont les projections d'un point m sur les axes.

Puisque l'axe passe par l'origine, nous pouvons prendre zéro pour toutes les valeurs de m ; nous avons alors l'équation:

$$\frac{y_1}{c_1} = \frac{y_2}{c_2} = \dots = \frac{y_p}{c_p} \quad (3)$$

Nous recherchons l'axe y défini par ses cosinus directeurs qui rend minimale la somme des carrés des distances de n points observations à cet axe. Nous devons donc minimiser:

$$nD = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p y_{ji}^2 - \left(\sum_{i=1}^p c_i y_{ji} \right)^2 \quad (4)$$

Les y_{ji} étant centrés réduits, nous avons:

$$D = p - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^p c_i y_{ji} \right)^2 \quad (5)$$

Il a été démontré que la condition (3) appliquée à (5) nous impose de minimiser:

$$D = p - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^p C_i y_{ji} \right)^2 + \lambda \sum_{i=1}^p C_i^2 \quad (6)$$

λ est un scalaire appelé multiplicateur de Lagrange.

L'équation (6) peut s'écrire:

$$D = p - \frac{1}{n} \sum \left(C_1 y_{j1} + C_2 y_{j2} + \dots + C_p y_{jp} \right)^2 + \lambda \left(C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_p^2 \right) \quad (7)$$

Pour trouver C qui minimise (7), nous devons annuler les dérivées partielles de cette équation par rapport aux coefficients C_k .

Nous obtenons:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \left(y_{jk} \sum_{i=1}^p C_i y_{ji} + 2 \lambda C_k \right) \\ &= -2 \sum_{i=1}^p C_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^p y_{ji} y_{jk} - \lambda C_k \end{aligned} \quad (8)$$

y étant centré réduit, nous avons:

$$r_{ik} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ji} y_{jk} \quad (9)$$

r_{ik} est le coefficient de corrélation entre les variables i et k .

L'équation (9) dans (8) nous donne l'équation à résoudre pour C_k :

$$\sum_{i=1}^p C_i r_{ik} - \lambda C_k = 0 \quad (10)$$

Pour k variant de 1 à p , nous avons à résoudre le système d'équations suivant:

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^p C_i r_{i1} - \lambda C_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^p C_i r_{i2} - \lambda C_2 = 0 \\ \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^p C_i r_{ip} - \lambda C_p = 0 \end{array} \right] \quad (11)$$

(11) peut s'écrire en notation matricielle

$$RL - \lambda L = 0 \quad (12)$$

R = matrice des coefficients de corrélation des variables

$$L = \text{vecteur unitaire} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ C_p \end{bmatrix}$$

L'élimination de L conduit finalement à résoudre:

$$\left| R - \lambda I \right| = 0 \quad (13)$$

I = matrice unité

λ = valeurs propres

L'axe le plus près de tous les points au sens des moindres carrés a pour vecteur directeur un des vecteurs propres de la matrice des coefficients de corrélation et λ est la valeur propre correspondante.

Nous avons vu avec la relation (5) que, lorsque les variables sont centrées réduites, la distance D est égale à p moins la variance des projections des points sur l'axe. La variance des points projetés sur l'axe est égale à la valeur propre λ . On obtient donc pour D :

$$D = p - \lambda \quad (14)$$

La plus grande des racines de l'équation caractéristique λ_1

minimise D et définit le premier axe ou composante principale. La somme des carrés des distances des points à cet axe est minimum et les variates¹ mesurées le long de cet axe ont le maximum de variance.

Les premières variates ou composantes nous sont données par:

$$z_{n1} = \sum_{k=1}^p c_{k1} y_{nk} \quad (15)$$

z_{n1} : première variate ou première composante;

c : cosinus directeur;

y : observations centrées réduites.

Si on cherche maintenant l'axe perpendiculaire au premier, pour lequel la somme des carrés des distances des points à cet axe soit minimum, nous devons projeter tous les points sur un hyperplan orthogonal au premier axe. Nous nous trouvons alors dans un nouveau système comprenant $p - 1$ équations et nous trouvons l'axe correspondant à λ_2 , la deuxième plus grande racine et nous pouvons calculer les deuxièmes variates ou composantes.

Si nous procédons ainsi jusqu'à λ_p , nous avons obtenu une nouvelle série de variates Z qui ne sont pas corrélées et dont les variances sont respectivement $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ par ordre de valeur décroissante.

Si nous désirons obtenir une série de variates ou composantes

¹ variate: variable aléatoire. Terme d'origine anglaise assez usité. "cf. dictionnaire de statistique", E. MORICE-DUNOD.

normées, (15) doit être de la forme:

$$z_{nj} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} \sum_{i=1}^p C_{ij} y_{ni} \quad (16)$$

z_{nj} = j ième composante, n ième observation;

λ_j = j ième valeur propre;

C = cosinus directeur;

y = observation.

C.3 Propriétés du nouveau système d'axes et des transformées

Nous allons énumérer les propriétés des nouvelles variates sans faire de démonstration mathématique. Ces démonstrations peuvent être retrouvées dans les ouvrages d'analyse multidimensionnelle.

C.3.1 Les variables transformées sont non-corrélées entre elles

C'est-à-dire qu'on a:

$$E \left(z_{.i} \cdot z_{.j} \right) = 0 \text{ pour } i \neq j$$

Cette propriété est très importante si nous voulons nous servir de ces variables pour des régressions. Ainsi, si on trouve par régression une relation entre une variable

et les composantes, nous pouvons améliorer cette relation en y ajoutant des termes sans qu'il soit nécessaire de refaire les premiers calculs.

C.3.2 Les premières composantes contiennent une grande partie de la variance totale

Les calculs ont été faits de façon à ce que la première composante explique le maximum de variance, puis la deuxième explique le maximum de variance résiduelle, etc...

Comme les calculs sont faits avec une matrice semi-définie positive, ce qui est le cas pour une matrice de coefficients de corrélation, nous pouvons démontrer que:

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i = p \quad (18)$$

p = nombre de variables;

λ = valeur propre.

Nous pouvons calculer le pourcentage de variance expliquée en utilisant les m premières composantes à l'aide de:

$$p_m = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{p} \times 100 \quad (19)$$

C.3.3 Relation entre variables et composantes

Le coefficient de corrélation entre la variable i et la k ième composante nous est donné par:

$$r \left(Y_{.i} : Z_{.k} \right) = \sqrt{\lambda_k C_{ik}} \quad (20)$$

Le coefficient de corrélation multiple entre la variable i et les m premières composantes nous est donné par:

$$r \left(Y_{.i} : Z_{.1}, Z_{.2}, \dots, Z_{.m} \right) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \lambda_j C_{ij}^2} \quad (21)$$

C.4 Interprétation des résultats

La représentation des résultats de l'analyse peut consister à porter en graphique les points variables sur un plan dont les axes sont les deux premiers axes principaux. Une proximité plus grande entre deux points signifie que ces deux variables sont plus corrélées, et ceci d'autant plus vrai que les points variables sont éloignés de l'origine. Si les points sont situés assez près de l'origine, il peut s'avérer nécessaire de considérer la position de ces points sur d'autres plans formés par l'intersection des troisième et quatrième axes principaux.

On peut représenter également sur un même plan les points observations en notant qu'une proximité entre deux points observations indique une similitude de comportement à l'égard des variables analysées. Les coordonnées des points observations sur les axes principaux sont obtenues à partir de l'équation (16).

Si l'on représente simultanément les points observations et les points variables sur le même plan, on enrichit considérablement l'interprétation. En considérant la position des points variables, on a aussitôt une idée de la signification des axes factoriels et l'on sait quelles variables sont responsables de la proximité entre telle ou telle observation. Il faut noter qu'une proximité entre un point-variable et un point-observation signifie en moyenne que cette observation a une valeur élevée pour cette variable.

C.5 Méthode pratique de calcul des racines de l'équation caractéristique

Il existe plusieurs façons de calculer les valeurs et les vecteurs propres d'une matrice symétrique. Dans notre cas, les calculs des valeurs et vecteurs propres ont été faits à l'aide de la sous-routine EIGEN disponible dans la bibliothèque des programmes de la compagnie IBM (1970).

Cette sous-routine qui calcule toutes les valeurs propres avec ou sans les vecteurs propres correspondants, utilise pour ses calculs une méthode de diagonalisation adaptée pour les grandes calculatrices dont on peut trouver un exposé dans Rals et Wilf (1962).

REFERENCES

- ANDERSON, T.W. (1958).
An introduction to multivariate statistical analysis. John Wiley and Sons, New York, 374 p.
- KENDALL, M.G. (1957).
A course in multivariate analysis. Chas. Griffin and Co., London, 185 p.
- HOTELLING, H. (1933).
Analysis of a complex of statistical variables into principal components. J. Educ. Psych., 24: 417-441, 498-520.
- IBM. (1970).
System/360 Scientific Subroutine Package. Version III, 5TH EDITION.
- RALS, A. and H.S. WILF. (1962).
Mathematical methods for digital computer. John Wiley and Sons, New York, chapter 7.



ANNEXE D

METHODE DE L'INTERPOLATION OPTIMUM

D. METHODE DE L'INTERPOLATION OPTIMUM

Assumons qu'un phénomène f est connu sans erreur pour N point $m_1, m_2 \dots m_n$ qu'on notera

$$f_1, f_2 \dots f_n$$

on cherche à évaluer la valeur au point m_0 qu'on note f_0 .

Premièrement on soustrait à chaque valeur la norme correspondante au point d'observation pour obtenir ce qu'on appelle les déviations

$$f'_i = f_i - \frac{\sum_{j=1}^N f_{ij} \bar{f}_i}{N} \quad (1)$$

où "i" est le point de la station

et "N" est le nombre d'observations

La valeur cherchée au point m_0 est donnée par

$$f_0 = f'_0 + \bar{f}_0 \quad (2)$$

Gandin (1963) dans la théorie d'interpolation optimum calcule seulement les anomalies (f'). La norme ou moyenne \bar{f}_0 au point m , est supposément connue. On verra plus loin comment on peut appliquer les mêmes théories sur les valeurs observées et ainsi ne pas avoir à estimer la norme par une autre méthode.

a) Valeurs exactes:

Nous cherchons la valeur f'_0 c'est-à-dire la déviation au point (x_0, y_0) . Cette déviation peut être estimée par une équation de cette forme:

$$f'_0 = p_1 f'_1 + p_2 f'_2 + \dots + p_n f'_n = \sum_{i=1}^N p_i f'_i \quad (3)$$

où:

p_i = sont les facteurs à déterminer;

f'_i = la déviation aux N stations.

On cherche les facteurs qui minimisent l'erreur quadratique moyenne

$$E^2 = \overline{\left(f'_0 - \sum_{i=1}^N p_i f'_i \right)^2} \quad (4)$$

Transformons l'équation (4) en effectuant le carré tel qu'indiqué

$$\begin{aligned} E^2 &= \overline{f'_0{}^2} - 2 \sum_{i=1}^N p_i \overline{f'_0 f'_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_i p_j \overline{f'_i f'_j} \\ &= \overline{f'_0{}^2} - 2 \sum_{i=1}^N p_i \overline{f'_0 f'_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_i p_j \overline{f'_i f'_j} \\ &= \sigma_{00}^2 - 2 \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_i p_j \sigma_{ij}^2 \quad (5) \end{aligned}$$

Pour minimiser l'équation (5) il suffit d'annuler les dérivées partielles par rapport aux p_i . On obtient ainsi le système à N équations qu'on écrit sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{1n}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n}^2 \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{o1}^2 \\ \sigma_{o2}^2 \\ \sigma_{on}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

En vertu des propriétés d'une matrice de covariance ce système est régulier et admet une solution unique qui donne les N poids p_i . L'interpolation à l'aide de la formule (3) avec les poids p_i déterminés en résolvant l'équation (6) est appelée interpolation optimum. Les poids obtenus en résolvant l'équation (6) impliquent que l'erreur d'interpolation est minimum.

L'équation (6) sous forme simplifiée peut s'écrire

$$\sum_{j=1}^N \sigma_{ij}^2 p_j = \sigma_{oi}^2 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

Multipliant (7) par p_i et sommant sur i on obtient:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{ij}^2 p_i p_j = \sum_{i=1}^N \sigma_{oi}^2 p_i \quad (8)$$

Combinant (8) et (5) on obtient:

$$E^2 = \sigma_{00}^2 - \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{0i}^2 \quad (9)$$

E^2 représente la variance de l'erreur d'interpolation sur f'_0 . C'est une mesure de l'incertitude.

Considérons quelques cas limites de l'interpolation optimum:

- 1) Assumons que le point à interpoler coïncide avec la station (i). Le système donne comme solution $p_{i0} = 1$ et $p_{j0} = 0$ pour $V_j \neq i_0$. On a donc un interpolateur exact. L'estimé le plus précis à ce point est celui observé étant donné qu'on a supposé qu'il n'y a pas d'erreur de mesure.
- 2) Si toutes les stations se situent suffisamment loin du point à interpoler pour qu'il n'y ait pas de corrélation possible avec le point et les stations, on obtient $p_i = 0$ pour $i = 1$ à N , c'est-à-dire que l'estimé qu'on peut faire à ce point est la norme, la déviation calculée étant nulle.

b) Valeurs avec erreurs

Le système précédent suppose des valeurs exactes c'est-à-dire sans erreur de mesure. Si on a des erreurs (\mathcal{E}) sur les observations qu'on suppose:

- i) non systématique de moyenne nulle $\overline{\mathcal{E}_i} = 0$
- ii) non corrélées avec les observations $\overline{\mathcal{E}_i f_j} = 0$
- iii) non corrélées entre elles $\overline{\mathcal{E}_i \mathcal{E}_j} = 0$

et qu'on cherche à estimer la déviation entachée d'erreur ($f'_0 + \mathcal{E}_0$), on est ramené au problème précédent en remplaçant la covariance des f'_0 par la covariance des ($f'_0 + \mathcal{E}_0$). L'équation (3) s'écrit alors:

$$f'_0 = p_0 \left(f'_i + \mathcal{E}_1 \right) + p_2 \left(f'_2 + \mathcal{E}_2 \right) \dots = \sum_{i=1}^N p_i \left(f'_i + \mathcal{E}_i \right) \quad (10)$$

En pratique on suppose que les erreurs de mesure sont analogues pour toutes les stations.

Comme précédemment on cherche les facteurs qui minimisent l'erreur moyenne

$$E^2 = f'_0 - \sum_{i=1}^N p_i \left(f'_i + \mathcal{E}_i \right) \quad (11)$$

Si on refait les mêmes calculs, on obtient le système suivant à résoudre:

$$\sum_{j=1}^N p_j \left(\sigma_{ij}^2 + \mathcal{E}_i \mathcal{E}_j \right) = \sigma_{io}^2 \quad (i = 1 \text{ à } N) \quad (12)$$

$\mathcal{E}_i \mathcal{E}_j$ est la covariance des erreurs de mesure. En vertu des hypothèses faites sur les erreurs on a

$$\mathcal{E}_i \mathcal{E}_j = \sigma_{\mathcal{E}}^2 C_{ij} \quad (13)$$

où

$\sigma_{\mathcal{E}}^2$ = variance commune des erreurs de mesure

$C_{ij} = 0$ pour $i \neq j$

$= 1$ pour $i = j$

La variance de l'estimation nous est donnée par

$$E^2 = \sigma_{oo}^2 - \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{oi}^2 \quad (14)$$

Les p_i étant déterminé en résolvant l'équation (12).

Dans ce cas on n'a plus un interpolateur exact, c'est-à-dire que si on interpole à un point qui coïncide avec une station, on ne retrouve pas $p_{io} = 1$ d'où la valeur estimée au point diffère de la valeur observée.

Il est normal que les valeurs estimées ne soient pas égales aux valeurs expérimentales si ces valeurs ont une erreur.

c) Problème de la norme

On vient de voir comment on peut déterminer la déviation f'_o .
D'après l'équation (2)

$$f_o = \overline{f_o} + f'_o$$

ce que l'on cherche étant f_o on doit connaître $\overline{f_o}$ au point désiré. Gandin (1963) propose deux méthodes permettant de calculer directement les valeurs f_o lorsque $\overline{f_o}$ est inconnu.

Jusqu'à présent la détermination des poids n'était sujette qu'à la seule condition que l'erreur quadratique moyenne d'interpolation soit minimum. Comme conséquence, cette méthode d'interpolation peut être appliquée seulement aux déviation f' . Pour l'élément f lui-même, l'équation (3) peut s'écrire:

$$f_o = \overline{f_o} - \sum_{i=1}^N p_i \overline{f_i} + \sum_{i=1}^N p_i f_i \quad (15)$$

Généralement, le gradient du champ de la norme est considérablement plus petit que le gradient observé sur chaque situation. En particulier, on

peut faire l'approximation suivante:

$$\overline{f_i} = \overline{f_o}$$

qu'on applique à l'équation (15) pour obtenir

$$f_o = \left(1 - \sum_{i=1}^N p_i\right) \overline{f_o} + \sum_{i=1}^N p_i f_i \quad (16)$$

Gandin (1963) a par ailleurs démontré que si la distance entre les stations où l'erreur sur les données augmentent, les poids obtenus par l'interpolation optimum baissent si toutes les autres conditions sont égales. La somme des poids diminue également. Ceci implique avec l'équation (16) que plus les stations sont distantes et que l'erreur des mesures augmentent, le facteur appliqué à la norme sera de plus en plus grand, c'est-à-dire qu'à la limite, avec des distances inter-stations très grandes ou des erreurs très importantes sur les observations, le meilleur estimé en un point peut être la norme. Ainsi, on voit que le fait de travailler avec les valeurs sans contraintes supplémentaires, peut avoir un effet positif sur l'analyse en autant que l'on dispose de la norme au point à interpoler.

Si la norme au point à interpoler n'est pas connu et qu'on travaille directement avec les observations, on doit imposer que l'estimé soit sans-biais.

Vérifions que l'espérance mathématique des valeurs calculées en un point, moins la valeur réelle est nulle, soit:

$$E \left(\sum_{i=1}^N p_i f_i - f_o \right) = 0 \quad (17a)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i E [f_i] - E (f_o) = 0 \quad (17b)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i m - m = 0 \quad (17c)$$

où

m représente la moyenne

$$m \left(\sum_{i=1}^N p_i - 1 \right) = 0 \quad (18)$$

Pour que l'estimé soit sans biais, l'équation (18) doit être vérifiée.

Quelque soit la valeur de m , cette équation est vérifiée si

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (19)$$

Cette condition doit être imposée si on travaille avec les valeurs observées et non avec les déviations.

On peut démontrer que le système d'équation permettant de travailler sur la valeur et qui minimise l'erreur moyenne est identique au système précédent à laquelle on ajoute la contrainte (19). On obtien un système de $N + 1$ équations et de $N + 1$ inconnus. La $(N + 1)$ ième inconnue étant le paramètre de Lagrange μ .

$$\sum_{j=1}^N p_j \sigma_{ij}^2 = \sigma_{io}^2 + \mu \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

dans laquelle

$$\sum_{j=1}^N p_j = 1$$

La variance de l'erreur d'interpolation est donnée par:

$$E^2 = \sigma_{oo}^2 - \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{io}^2 + \mu \quad (21)$$

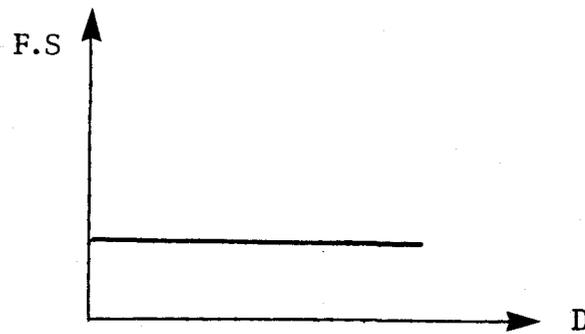
d) Résolution pratique:

Pour résoudre le système d'équations (6), (12) ou (20), on doit connaître la fonction covariance entre les stations i et le point à interpoler. Comme on a assumé l'étude sur une région homogène, on définit ce qui est nommé "fonction de structure" par Gandin (1963) ou "variogramme ou demi variogramme" dans la théorie du krigeage (Delhomme, 1976). La fonction de

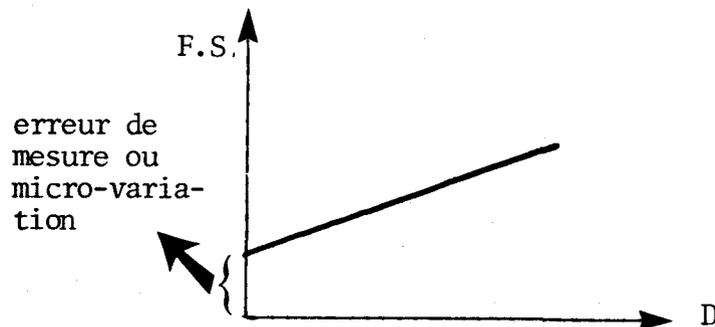
structure est une courbe qui définit pour une région les liens inter-stations d'un phénomène en fonction de la distance. Cette courbe est utilisée par la suite pour interpoler les fonctions covariances entre les stations et le point à interpoler.

La forme de courbe obtenue pour la fonction de structure est une description synthétique de la structure spatiale du phénomène étudié. Les formes les plus courantes sont:

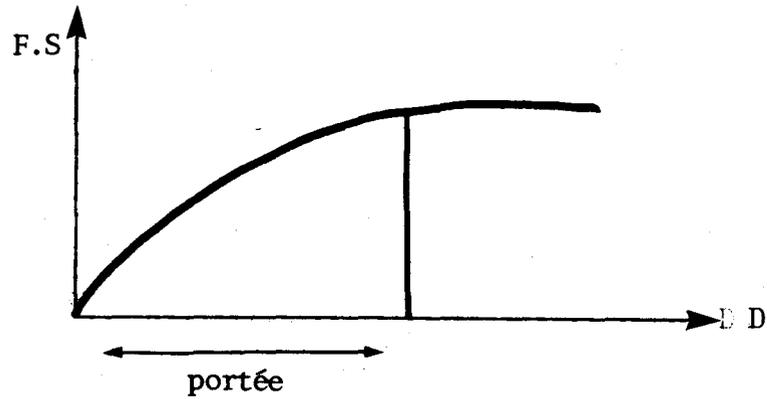
i) pour un phénomène aléatoire



ii) pour un phénomène ayant des erreurs d'observation ou de micro-variations



iii) pour un phénomène dont la zone d'influence est limitée



La forme mathématique des fonctions de structure proposée sont pour l'équation (6) et (12):

$$F.S. = \sum_{i=1}^m \left(f'_i - f'_j \right)^2 \quad (20)$$

où

m = nombre d'observations

i et j varient de 1 à N .

Pour l'équation (21) on utilise

$$F.S. = \sum_{i=1}^m \left(f_i - f_j \right)^2 \quad (21)$$

REFERENCES

DELHOMME, J.P. (1976).

Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Pierre et Marie Curie. Paris-6.

GANDIN, L.S. (1963).

Objective analysis of meteorological fields. Leningrad, Translate from russian by "Israel Program for Scientific translations", Jerusalem, 1965.

GANDIN, L.S. (1970).

The planning of meteorological station networks. WMO Technical Note No. 111.