

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE ÈS SCIENCES (EAU)

par

LISE SYLVAIN

BACHELIÈRE ÈS SCIENCES (PHYSIQUE)

DE L'UNIVERSITÉ LAVAL

VARIABILITÉ TEMPORELLE ET RELATIONS ENTRE CERTAINS

PARAMÈTRES DE QUALITÉ EN RIVIÈRE

JUIN 1979

## REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier sincèrement mon directeur de mémoire monsieur Bernard Bobée, ainsi que monsieur Pierre Campbell pour les nombreux conseils judicieux qu'ils m'ont prodigués et pour la correction de ce mémoire. Je tiens aussi à souligner l'excellent travail de monsieur Marius Lachance en tout ce qui a trait au traitement informatique des données, et je lui sais gré du temps consacré et des éclaircissements apportés au cours de nombreuses discussions. Je remercie aussi monsieur Pierre Couture pour les renseignements fournis au sujet du lac Boivin et du potentiel de fertilité ainsi que monsieur Jean-Louis Sasseville qui m'a permis dans le cadre de son cours de systémologie, d'entreprendre l'étude à priori des relations potentielles entre paramètres.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à monsieur Henri St-Martin, du service Qualité des eaux du Ministère des richesses naturelles, qui a bien voulu être correcteur externe de ce mémoire.

Je remercie mademoiselle Colette Arial pour le soin apporté à la dactylographie de ce mémoire, monsieur Magella Cantin pour les travaux d'édition, ainsi que monsieur André Parent pour l'élaboration des figures.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à mon ami Gilles et à tous les étudiants de deuxième année pour leur soutien moral qui a permis la réalisation de ce travail.

## RÉSUMÉ

La rivière étudiée est la rivière Yamaska-Nord, plus précisément le tronçon Granby-Waterloo. On procède à l'identification théorique des relations potentielles entre certains paramètres de qualité de l'eau, reliés aux substances nutritives et on effectue aussi une revue des relations identifiées lors d'autres recherches dans le cas d'autres rivières. On vérifie par la suite l'existence des relations possibles à l'aide de techniques statistiques. En premier lieu on procède à une étude globale, grâce à l'analyse factorielle des correspondances (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.), qui permettent de mettre en évidence des similitudes de comportement pour l'ensemble des stations. En second lieu par des calculs de corrélation, on quantifie davantage les relations existant entre les paramètres à chacune des stations. On compare alors les relations prévues à celles effectivement observées. Ceci permet de mettre en évidence l'influence importante de la localisation des stations et de la période de temps considérée quant à la force des corrélations, ce qui rend difficilement transposables les relations observées à d'autres bassins. L'étude a de plus fait ressortir l'existence de similitudes de comportement très marquées entre les formes particulières des éléments nutritifs, l'azote et le carbone surtout, et à un degré moindre, avec la chlorophylle. Les formes solubles de ces éléments semblent

affectées par un ensemble plus variable de facteurs, ce qui diminue la force des relations les impliquant.

En dernier lieu, on s'intéresse à l'évolution temporelle des concentrations, utilisant encore une fois l'A.F.C. et la C.A.H. On effectue d'abord une analyse de cette évolution pour l'ensemble des stations d'échantillonnage. On considère enfin les variations à un site en particulier, représentatif d'une station de rivière située en aval d'une agglomération urbaine. Cette partie de l'étude permet de mettre en évidence les cycles annuels des différents paramètres.

## TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
REMERCIEMENTS . . . . .	i
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	viii
LISTE DES FIGURES . . . . .	xi
INTRODUCTION. . . . .	1
<u>CHAPITRE I</u> <u>CARACTÉRISATION DES DONNÉES RETENUES</u> . . . . .	5
1.1 Le bassin de la rivière Yamaska-Nord . . . . .	5
1.1.1 Physiographie . . . . .	5
1.1.2 Réseau hydrographique . . . . .	6
1.2 Mesure des paramètres de qualité . . . . .	9
1.2.1 Stations d'échantillonnage . . . . .	9
1.2.2 Fréquence de mesure . . . . .	12
1.2.3 Protocole d'échantillonnage et procédure analytique. . . . .	14
1.3 Mesures hydrologiques . . . . .	14
1.3.1 Débits. . . . .	18
1.3.2 Consommation d'eau . . . . .	19
1.4 Paramètres retenus pour l'étude . . . . .	19
1.4.1 Choix des paramètres. . . . .	19
1.4.2 Valeurs manquantes . . . . .	21
<u>CHAPITRE II</u> <u>RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES: ASPECTS THÉORIQUES</u> <u>ET REVUE DE LITTÉRATURE</u> . . . . .	29
2.1 Composantes du système générateur des concentrations . . . . .	29
2.1.1 Apports atmosphériques. . . . .	30
2.1.2 Apports géologiques . . . . .	35



	<u>Page</u>
3.2.7 Relations prévues de la chlorophylle avec la silice et le potentiel de fertilité. . . . .	121
3.2.8 Relations prévues entre la chlorophylle et les phaeopigments . . . . .	125
3.2.9 Relations non prévues lors de l'étude à priori. . . . .	127
3.2.10 Influence des conditions hydrologiques et locales . . . . .	131
<u>CHAPITRE IV</u> <u>VARIABILITÉ TEMPORELLE.</u> . . . . .	135
4.1 Evolution temporelle des concentrations: étude globale aux stations 101, 103, 105 et 210. . . . .	137
4.1.1 Regroupement en classes des points observations . . . . .	138
4.1.2 Correspondance entre les classes d'observations et celles de paramètres . . . . .	145
4.2 Evolution temporelle des concentrations à la station 101 (Savage Mills) . . . . .	149
4.2.1 Axes factoriels . . . . .	150
4.2.2 Regroupement des points paramètres en classes . . . . .	154
4.2.3 Contribution des observations à la séparation en classes . . . . .	159
4.2.4 Paramètres supplémentaires: débit et température. . . . .	165
4.2.5 Regroupement en classes des points observations . . . . .	165
4.2.6 Evolution temporelle des concentrations à la station 101 . . . . .	170
4.3 Aspect méthodologique de l'étude de la variabilité tem- porelle. . . . .	171
CONCLUSION . . . . .	174
BIBLIOGRAPHIE . . . . .	177
ANNEXE A . . . . .	184
ANNEXE B . . . . .	200

## LISTE DES TABLEAUX

		<u>Page</u>
1.1	Caractéristiques physiques des plans d'eau du bassin de la Yamaska-Nord. . . . .	10
1.2	Caractéristiques des stations d'échantillonnage. . . . .	13
1.3	Paramètres mesurés . . . . .	15
1.4	Point de prélèvement de l'eau pour la consommation de la ville de Granby. . . . .	20
1.5	Paramètres retenus pour l'étude. . . . .	22
1.6	Valeurs manquantes . . . . .	23
2.1	Apports spécifiques moyens annuels . . . . .	32
2.2	Utilisation du territoire du bassin versant de la rivière Yamaska-Nord . . . . .	33
2.3	Caractéristiques des paramètres. . . . .	52
2.4	Mécanismes influençant les paramètres. . . . .	53
2.5	Relations notées dans la littérature . . . . .	60
2.6	Relations potentielles . . . . .	64
3.1	Codes utilisés pour l'identification des paramètres. . . . .	74

	<u>Page</u>	
3.2	Qualité de la représentation des paramètres: contribution relative cumulée en considérant les six premiers axes principaux. . . . .	76
3.3	C.A.H. sur les points paramètres: composition des classes.	79
3.4	Contribution relative des axes à la variabilité expliquée par chacune des classes. . . . .	81
3.5	Paramètres contribuant fortement à la définition des axes factoriels . . . . .	82
3.6	Contributions relatives des observations à la distance des classes du centre du nuage . . . . .	86
3.7	Correspondance entre les numéros des observations et les dates d'échantillonnage. . . . .	89
3.8	C.A.H. sur les points paramètres incluant le débit et la température: composition des classes . . . . .	95
3.9	Concentrations moyennes des paramètres pour les périodes d'activité biologique de 1975 et 1976. . . . .	102
3.10	Relations des nitrates et de l'azote ammoniacal entre eux et avec la chlorophylle et l'azote particulaire. . . . .	103
3.11	Relations des nitrates et de l'azote ammoniacal avec le potentiel de fertilité . . . . .	106
3.12	Relations entre le carbone, l'azote et le phosphore particulaire . . . . .	109
3.13	Relations du carbone, de l'azote et du phosphore particulaire avec la chlorophylle . . . . .	111
3.14	Relations du carbone, de l'azote et du phosphore particulaire avec les solides en suspension . . . . .	115

	<u>Page</u>	
3.15	Relations de l'azote (carbone) organique avec l'azote (carbone) particulaire, la chlorophylle et le carbone (azote) organique. . . . .	120
3.16	Relations de la chlorophylle avec la silice et le potentiel de fertilité. . . . .	123
3.17	Relation entre la chlorophylle active et les phaeopigments. . . . .	126
3.18	Relations non prévues lors de l'étude à priori . . . . .	128
4.1	Composition des classes obtenues par la C.A.H.: points observations . . . . .	140
4.2	Qualité de la représentation des points observations: contribution relative cumulée après six axes . . . . .	141
4.3	Contributions relatives les plus fortes des paramètres à la distance des classes du centre du nuage . . . . .	142
4.4	Effectif des classes de paramètres . . . . .	151
4.5	Qualité de la représentation des points paramètres . . . . .	152
4.6	Qualité de la représentation des points observations . . . . .	153
4.7	Composition des classes de points paramètres . . . . .	156
4.8	Contributions relatives des observations à l'éloignement des centres de gravité des classes (paramètres) au centre du nuage . . . . .	160
4.9	Composition des classes de points paramètres incluant le débit et la température . . . . .	167
4.10	Composition des classes de points observations . . . . .	169

## LISTE DES FIGURES

		<u>Page</u>
1.1	Bassin hydrographique de la Yamaska-Nord . . . . .	7
1.2	Profil en long de la rivière Yamaska-Nord. . . . .	8
1.3	Carte du lac Boivin et de la réserve de Granby-localisation des stations d'échantillonnage d'eau. . . . .	11
1.4	Débits journaliers enregistrés à Shefford Vale en 1975 . .	16
1.5	Débits journaliers enregistrés à Shefford Vale en 1976 . .	17
2.1	Modèle qualitatif de cheminement des substances nutritives	31
2.2	Schéma des transformations du carbone en rivière . . . . .	40
2.3	Schéma des transformations de la silice en rivière . . . . .	41
2.4	Schéma des transformations du phosphore en rivière . . . . .	42
2.5	Schéma des transformations de l'azote en rivière . . . . .	43
2.6	Importance des mécanismes de transformation selon la localisation des stations. . . . .	49
3.1	Exemple bidimensionnel d'axes ajustant bien un nuage de points. . . . .	70
3.2	C.A.H. sur les points paramètres: arbre hiérarchique obtenu avec quatre classes . . . . .	78

	<u>Page</u>	
3.3	Représentation des points paramètres dans le plan formé par les axes 1 et 2. . . . .	83
3.4	Représentation des points paramètres dans le plan formé par les axes 1 et 3. . . . .	85
3.5	Représentation simultanée des points paramètres et des points observations dans le plan formé par les axes 1 et 2. . . . .	88
3.6	Arbre hiérarchique obtenu en considérant cinq classes, débit et température inclus. . . . .	94
3.7	Exemple de corrélation fictive . . . . .	99
3.8	Relation $N_{part} - Chl_{o_a}$ , station 100, été 1976. . . . .	113
3.9	Relation $P_{part} - SS$ , station 103, été 1975 . . . . .	117
3.10	Relation $N_{part} - SS$ , station 101, été 1976 . . . . .	118
3.11	Relation $N_{org} - C_{org}$ , station 210, année 1975. . . . .	122
4.1	Arbre hiérarchique obtenu avec cinq classes de points observations . . . . .	139
4.2	Représentation simultanée des centres de gravité des classes d'observations et de paramètres dans le plan formé par les axes 1 et 2. . . . .	146
4.3	Arbre hiérarchique obtenu avec huit classes de points paramètres . . . . .	155
4.4	Chemins du carbone, de l'azote, du phosphore particulaire, de la chlorophylle, des nitrates, de la silice et du P.F. dans le plan des axes 1 et 2. . . . .	157
4.5	Arbre hiérarchique obtenu avec six classes de points paramètres avec le débit et la température comme paramètres supplémentaires . . . . .	166

4.6	Arbre hiérarchique obtenu avec huit classes de points observations. . . . .	168
-----	--------------------------------------------------------------------------------	-----

## INTRODUCTION

Les activités de plein air sont l'objet d'un intérêt de plus en plus marqué de nos jours, et dans ce contexte, les cours d'eau représentent un énorme potentiel récréatif. Malheureusement, les activités humaines entraînent une dégradation progressive de la qualité des eaux des lacs et rivières. Un des problèmes auxquels l'homme doit faire face est celui du vieillissement prématuré des plans d'eau, causé par la surabondance de substances nutritives telles que le carbone, l'azote et le phosphore. Ces éléments soutiennent la production des organismes autotrophes et hétérotrophes, et il en résulte un accroissement excessif de leur biomasse. Ceci nuit à la qualité récréationnelle et esthétique des cours d'eau ainsi qu'au maintien d'une vie aquatique équilibrée, et occasionne aussi certaines difficultés pour l'alimentation en eau potable.

Les rivières possèdent un certain pouvoir auto-épurateur, mais ce sont des systèmes très dynamiques, dont la production dépend des apports provenant du bassin versant. La qualité de leurs eaux varie grandement dans le temps, et une bonne connaissance du comportement des éléments nutritifs en rivière est nécessaire afin d'en suivre adéquatement l'évolution.

L'objet de ce travail est l'étude de la dynamique des substances nutritives en rivière. On s'intéresse d'abord aux relations existant entre

les variations de concentration de différents paramètres de qualité\* associés à ces substances. L'étude de ces relations permet d'obtenir des indications quant au comportement des éléments nutritifs en rivière et pourrait éventuellement conduire à l'abandon de la mesure de certains paramètres dans le cas de relations fortes. Il existe très peu de travaux portant sur les relations entre paramètres en rivière, la plupart des chercheurs s'étant plutôt intéressés aux relations concentration - débit. On sera amené ici à développer une méthodologie transposable pour l'identification de relations. On étudie ensuite la façon dont les concentrations de ces paramètres évoluent dans le temps, ce qui permet d'identifier les moments plus critiques pour la qualité de l'eau et conduit à une meilleure connaissance de la dynamique des substances nutritives. L'analyse de la variabilité temporelle des concentrations peut permettre un meilleur ajustement de la fréquence de mesure de chaque paramètre et entraîner ainsi une planification plus rationnelle des réseaux. Les formes inorganiques solubles de ces éléments sont celles qui sont le plus souvent étudiées, alors que les formes particulières ne semblent avoir été l'objet que d'un intérêt très limité. On s'intéresse ici aux formes inorganiques et organiques, solubles ou particulières de ces substances.

La rivière étudiée est la Yamaska-Nord, plus précisément le tronçon Waterloo-Granby. Plusieurs problèmes de qualité se posent sur ce tronçon, dus, entre autres, à un excès de substances nutritives. Ces problèmes se compliquaient, avant la mise en eau du réservoir Choinière, de difficultés d'approvisionnement en eau potable. En effet, le régime hydrologique de la Yamaska-Nord est caractérisé par des étiages d'été très prononcés. Durant les années 1975-1976, L'INRS-Eau procéda à un échantillonnage régulier de

---

\* On entend ici les paramètres reliés à la qualité de l'eau.

la rivière, en vue d'une étude de la dynamique des éléments nutritifs dans les eaux courantes ainsi que dans les réservoirs se trouvant le long du tronçon. Le réservoir Choinière n'a été mis en eau qu'en 1977.

On disposait donc de données validées, mesurées à cinq stations d'échantillonnage sur le tronçon pendant un an et demi en moyenne. Ces données se prêtaient bien au traitement statistique, puisqu'elles étaient fiables ayant été critiquées par les chercheurs de l'INRS, et présentaient relativement peu de valeurs manquantes. On a donc choisi de procéder à une étude statistique des relations entre paramètres et de la variabilité temporelle des concentrations, complétant ainsi les travaux de Campbell *et al.* (1979). Ces chercheurs se sont intéressés davantage à l'effet de l'emmagasinement d'eaux courantes sur la dynamique des éléments nutritifs à l'aide de bilans de débits massiques, et ont procédé à une étude de la variabilité temporelle des concentrations de ces substances en utilisant des courbes de concentrations en fonction du temps. On fera fréquemment référence à ces travaux qui servent de base à notre étude. L'approche statistique employée ici permet une analyse objective des données. De plus, les méthodes statistiques utilisées, l'analyse factorielle de correspondance (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.), permettent l'étude globale de grands tableaux de données. On peut ainsi obtenir une vue d'ensemble des phénomènes, ce qui est plus difficile dans le cas de l'approche station par station, paramètre par paramètre. L'A.F.C. et la C.A.H. conduisent au regroupement automatique de paramètres, d'observations ou de stations, selon les ressemblances qui existent entre eux, et présentent donc un intérêt certain pour l'étude des relations entre paramètres puisqu'ils permettent d'identifier les paramètres interreliés.

Dans ce travail, on cherche d'abord à caractériser les données

utilisées quant à leur provenance et à leur disponibilité. Ensuite, on procède à l'identification théorique des relations potentielles entre paramètres. On s'appuie alors sur la connaissance des éléments principaux qui affectent les concentrations des différents paramètres, pour en déduire des conditions de relations permettant de déterminer les liens probables entre ceux-ci. On effectue aussi une revue des relations identifiées lors d'autres recherches dans le cas d'autres rivières. Cette démarche permet d'orienter l'étude statistique des relations. Par la suite, on vérifie l'existence des relations possibles à l'aide de certaines techniques statistiques. En premier lieu, on procède à une étude globale grâce à des méthodes multivariées, soit l'analyse factorielle de correspondance (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.), qui permettent de mettre en évidence des similitudes de comportement pour l'ensemble des stations. On obtient ainsi une perception globale du comportement des paramètres aux différents sites. En second lieu, par des calculs de corrélation, on peut davantage quantifier les relations existant entre les paramètres à chacune des stations. On compare alors les relations prévues à celles effectivement observées. L'intérêt de la méthodologie développée ici pour la détermination des relations entre paramètres réside dans le fait qu'elle est transposable à d'autres bassins.

En dernier lieu, on s'intéresse à l'évolution temporelle des concentrations, utilisant encore une fois l'A.F.C. et la C.A.H. On effectue d'abord une analyse globale de cette évolution pour l'ensemble des stations d'échantillonnage. Cette analyse est complémentaire à celle entreprise dans le cas des relations entre paramètres. Enfin, on considère de façon plus détaillée les variations temporelles des concentrations à un site particulier, représentatif d'une station de rivière située en aval d'une agglomération urbaine.

## CHAPITRE I

### CARACTÉRISATION DES DONNÉES RETENUES

Les données utilisées dans ce travail ont été recueillies pour les fins d'un projet mené par l'INRS-Eau (Campbell *et al.*, 1979), dont cette étude se veut le complément. On reprendra donc ici certains aspects de ces travaux, cherchant à caractériser les données quant à leur provenance et leur disponibilité.

#### 1.1 Le bassin de la Yamaska-Nord

Le bassin versant de la rivière Yamaska-Nord, tronçon Granby-Waterloo, occupe une superficie de 221 km<sup>2</sup>. Il est borné à l'est par les bassins des rivières Noire et Yamaska-Centre, qui se prolongent aussi au nord et au sud, tandis qu'à l'ouest s'étend celui de la Yamaska proprement dite dont la Yamaska-Nord est une des branches.

##### 1.1.1 Physiographie

Du point de vue physiographique, le bassin est constitué de deux régions principales (Malo-Lalande, 1976):

- le piedmont qui constitue une zone de transition entre les basses-terres du St-Laurent et le plateau appalachien. Cette région, qui comprend la partie nord-ouest du bassin, est plutôt ondulée allant jusqu'à fortement vallonnée.
- le plateau appalachien, dans la partie sud-est du bassin, dont le relief est plus accidenté. On y trouve le mont Shefford, structure montérégienne, située au sud du bassin.

### 1.1.2 Réseau hydrographique

La rivière Yamaska-Nord coule d'est en ouest, présentant une dénivellation de 216 mètres pour une longueur de 34 kilomètres; la figure 1.1 illustre le réseau hydrographique de ce bassin. Ainsi que l'indique la figure 1.2, qui représente le profil en long de la rivière depuis Waterloo jusqu'à St-Alphonse, la pente est assez abrupte dans le tronçon Waterloo-Savage Mills, alors qu'elle est plus douce de Savage Mills à Granby.

Le bassin de la rivière Yamaska-Nord compte quatre plans d'eau importants (Campbell *et al.*, 1979):

- le lac Waterloo, situé à la tête du bassin, dont le niveau a été rehaussé. Le barrage situé à l'exutoire du lac est cependant dans un état de détérioration avancé (O.P.D.Q., 1976).
- le réservoir Choinière, créé dans le but d'assurer l'alimentation en eau de la ville de Granby par la régularisation du débit de la rivière. La mise en eau de ce réservoir remonte à 1977, et

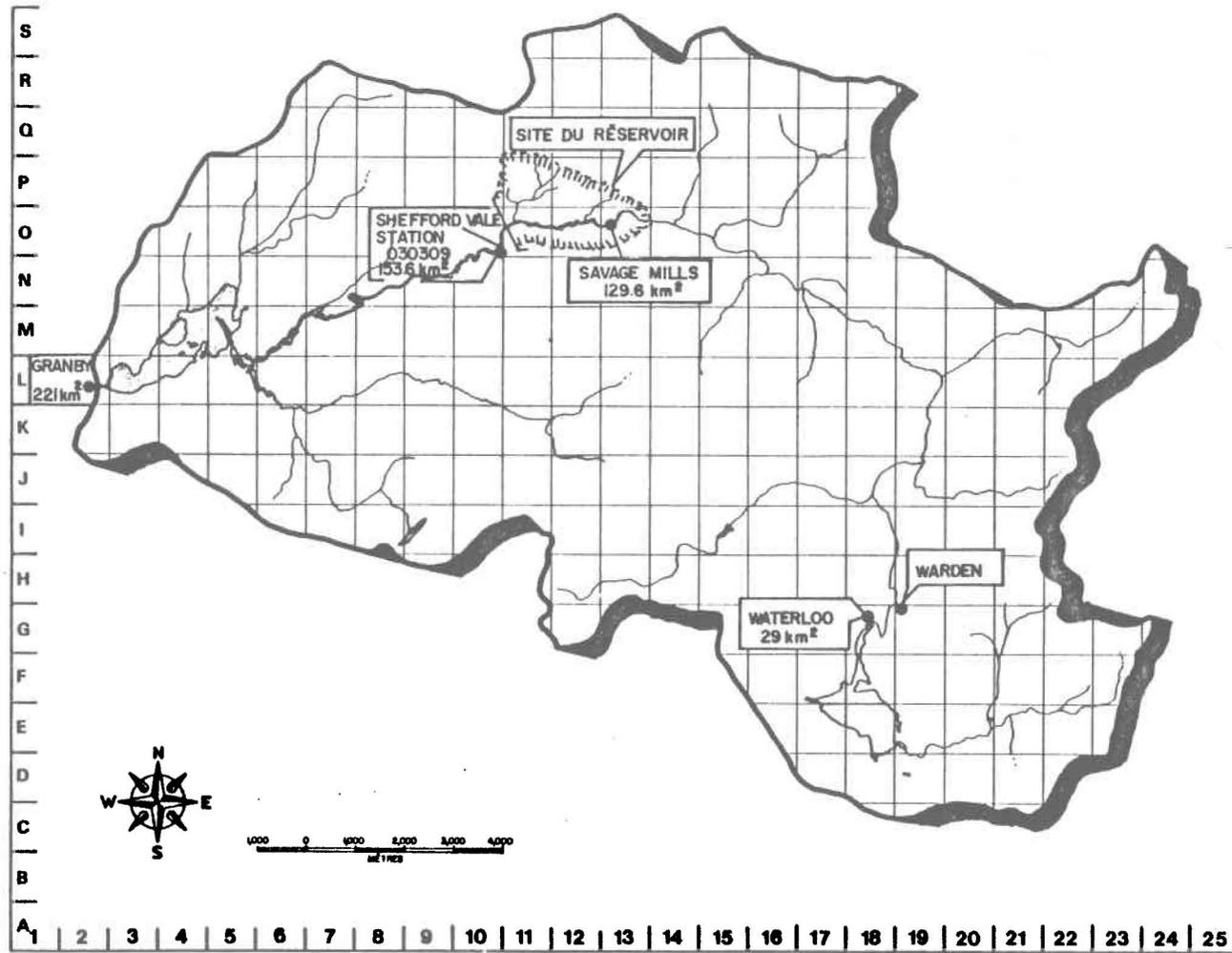


Figure 1.1. Bassin hydrographique de la Yamaska - Nord ( tiré de Campbell et al., 1979 ) .

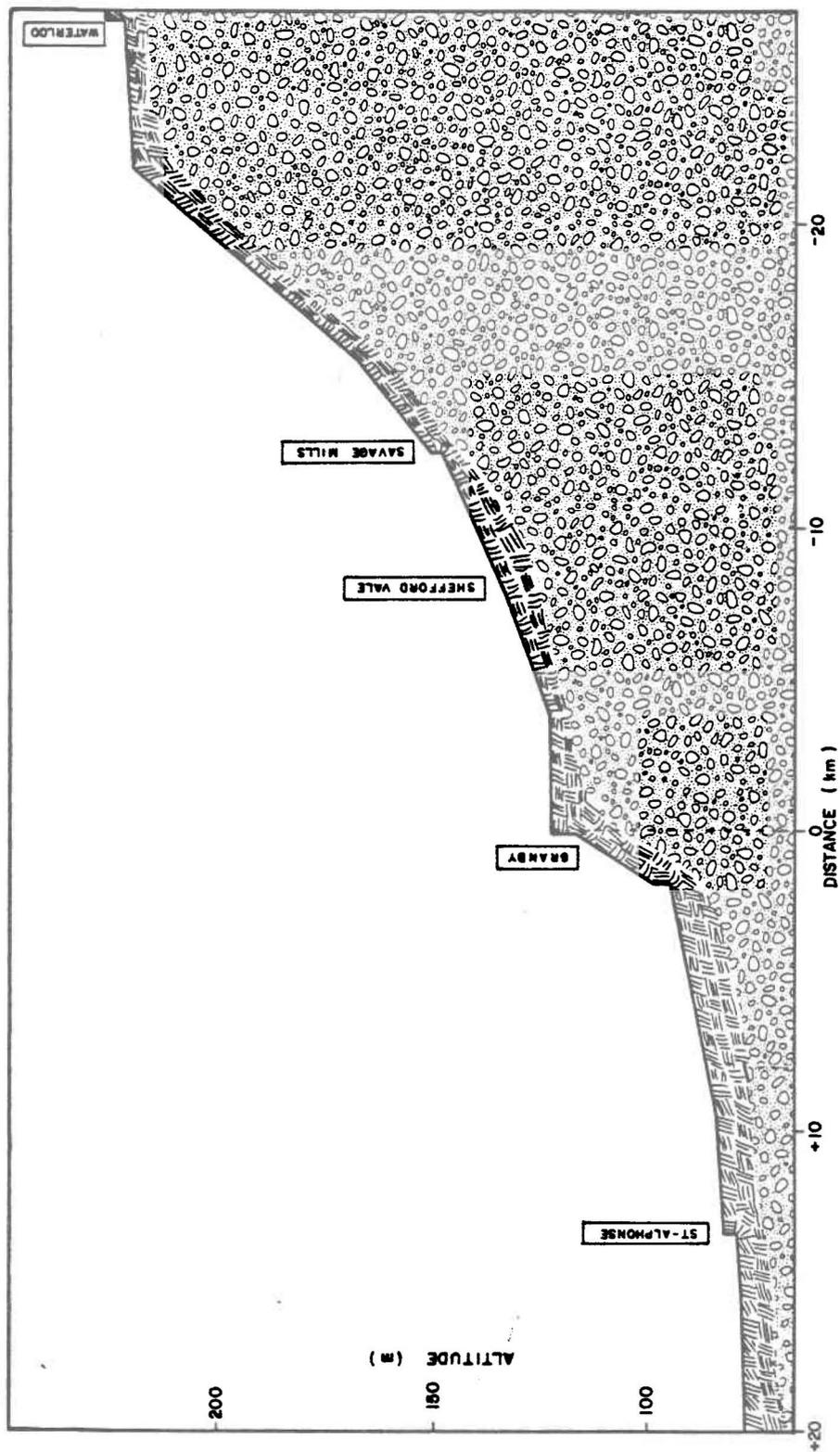


Figure .1.2. Profil en long de la rivière Yamaska- Nord ( tiré de Campbell et al., 1979 ).

est donc postérieure à la période étudiée.

- le lac Boivin, près de Granby, dont on a rehaussé le niveau des eaux en 1942 par la construction d'un barrage déversoir.

Les principales caractéristiques de ces lacs et réservoirs sont présentées au tableau 1.1.

## 1.2 Mesure des paramètres de qualité

Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies dans le cadre d'un projet de l'INRS-Eau (Campbell *et al.*, 1979), portant sur la dynamique des éléments nutritifs en rivière. La période de relevés s'étendait de janvier 1975 à octobre 1976 inclusivement, soit environ deux ans.

### 1.2.1 Stations d'échantillonnage

Cinq stations d'échantillonnage (figure 1.3) ont été visitées de façon régulière durant la période considérée (Campbell *et al.*, 1979):

- la station 100, située au pont de la route 241 en aval de Waterloo, établie en 1976 seulement.
- la station 101, au pont de Savage Mills près de l'entrée du réservoir en construction.
- la station 103, au pont du canton de Shefford à environ un kilomètre du nouveau barrage.
- la station 105, à l'entrée commune du lac Boivin et de la Réserve Granby.

TABLEAU 1.1 Caractéristiques physique des plans d'eau du bassin de la Yamaska-Nord (tiré de Campbell *et al.*, 1979).

CARACTÉRISTIQUES	LAC WATERLOO	RÉSERVOIR CHOINIÈRE	RÉSERVE DE GRANBY	LAC BOIVIN
Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> )	29.4	152.8	196	221
Superficie (km <sup>2</sup> )	1.5	5.3	0.2	1.8
Profondeur maximum (m)	5.2	17.9	6.5	7.3
Profondeur moyenne (m)	2.6	6.5	5.8	1.3
Longueur maximum (m)	2.9	5.8	0.8	3.4
Largeur maximum (m)	1.1	1.5	0.6	0.8
Volume (m <sup>3</sup> )	3.68 × 10 <sup>6</sup>	28.3 × 10 <sup>6</sup>	1.16 × 10 <sup>6</sup>	2.52 × 10 <sup>6</sup>
Temps de renouvellement:				
moyen annuel	56 jrs	130 jrs	25 jrs <sup>(†)</sup>	8 jrs
moyen en été <sup>(++)</sup>	123 jrs	- <sup>(+++)</sup>	- <sup>(+++)</sup>	23 jrs
Utilisation	-	régularisation du débit	alimentation en eau	alimentation en eau

(†)  $T_r$  dépend de la consommation d'eau de Granby, car il n'y a pas d'autre sortie.

(++) mois de juin, juillet et août.

(+++) données non disponibles.

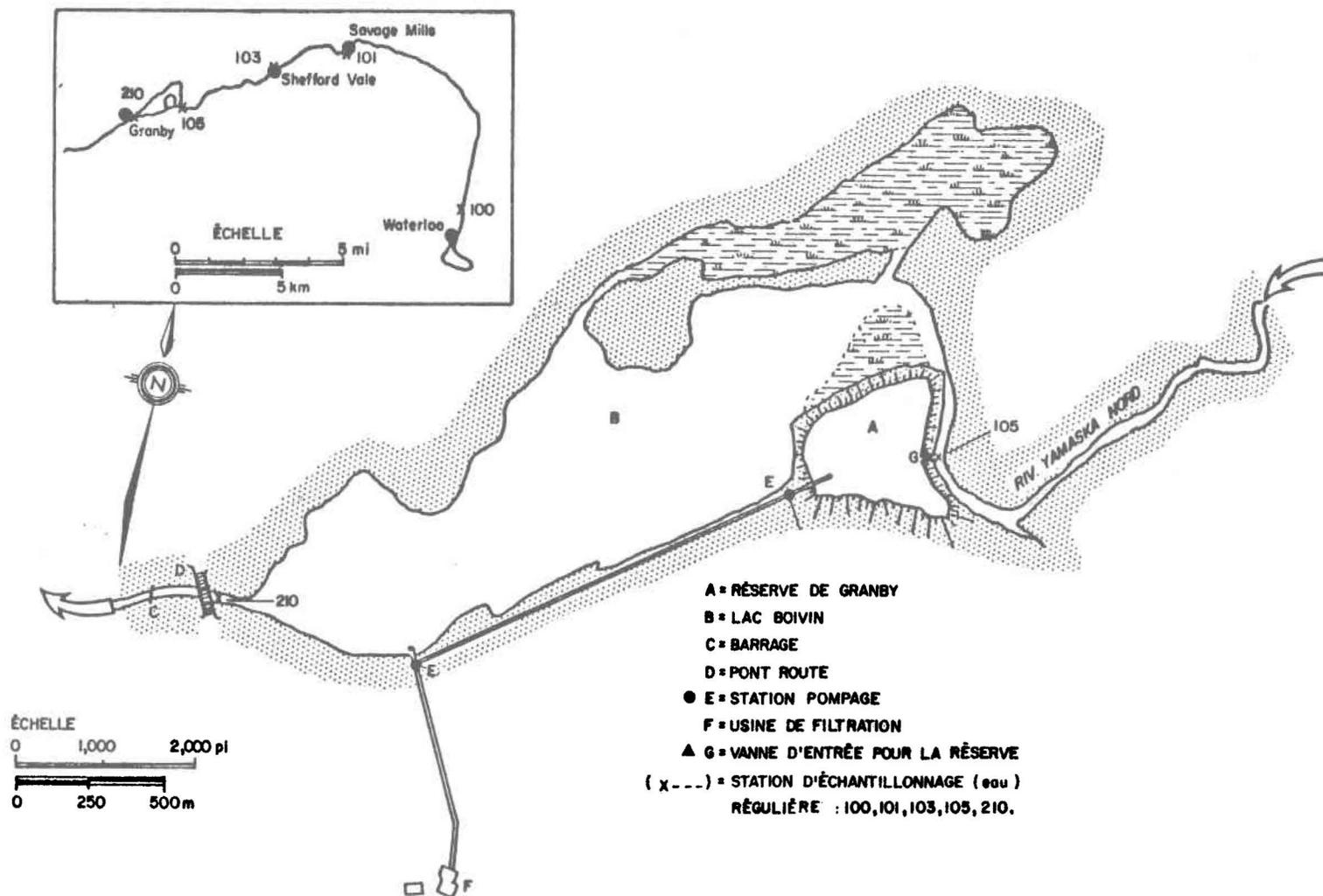


Fig. 1.3. Carte du lac Boivin et de la Réserve de Granby - localisation des stations d'échantillonnage d'eau (tiré de Campbell et al., 1979).

- la station 210, à la sortie du lac Boivin, un peu en amont du barrage.

Ces cinq stations se différencient tant par leurs caractéristiques hydrauliques que par les influences diverses qu'elles subissent, c'est-à-dire présence d'un barrage, d'un lac en amont ou d'un émissaire d'égoûts. Le tableau 1.2 montre en particulier que la station 100 est très influencée par les rejets de la ville de Waterloo, alors que la station 210 se situe presque en milieu lacustre. Les autres sites forment un ensemble plus homogène, bien que le barrage du lac Boivin influence l'écoulement à la station 105. La construction du barrage en 1976 est aussi susceptible d'avoir affecté la qualité des eaux à la station 103 en raison du déboisement de la cuvette du réservoir, de la présence de machinerie lourde et des rejets sanitaires occasionnels du chantier. Quant aux lacs Waterloo et Boivin, ils constituent des sources saisonnières de chlorophylle-a et de plancton pour les stations situées immédiatement en aval de ces lacs.

### 1.2.2 Fréquence de mesure

Les cinq sites ont été échantillonnés avec des fréquences variables selon la période de l'année:

- du 21/01/75 au 09/04/75, fréquence de une fois par deux semaines
- du 10/04/75 au 10/11/75, fréquence de une fois par semaine
- du 11/11/75 au 09/03/76, fréquence de une fois par deux semaines
- du 10/03/76 au 26/10/76, fréquence de une fois par semaine.

L'échantillonnage a débuté à des dates différentes selon les

TABLEAU 1.2 Caractéristiques des stations d'échantillonnage (Campbell *et al.*, 1979).

	STATION 101	STATION 101	STATION 103	STATION 105	STATION 210
LOCALISATION	pont de la route 241 en aval de Waterloo	pont de Savage Mills près de l'entrée du réservoir Choinière	pont du canton de Shefford Vale à 1 km en aval du nouveau barrage	entrée commune du lac Boivin et de la réserve de Granby	sortie du lac Boivin un peu en amont du barrage
CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES	milieu de rivière	milieu de rivière	milieu de rivière	milieu de rivière, ralentissement du courant par rapport aux stations en amont	milieu semi-lacustre
INFLUENCES	Influence du lac Waterloo en tant que source saisonnière de chlorophylle-a et de plancton. Influence des rejets de la ville de Waterloo et de ses industries qui se font dans la rivière sans traitement préalable.	Existence d'un tronçon de récupération* entre les stations 100 et 101. *section de rivière dont la morphométrie, l'écologie, la pente et le débit permettent une amélioration de la qualité de l'eau.	Influence de la construction du barrage en 1976, déboisement de la cuvette du réservoir, présence de machinerie lourde, rejets sanitaires occasionnels du chantier.	Influence mixte du barrage du lac Boivin en aval et de la rivière en amont.	Influence du lac Boivin et de la consommation d'eau de la ville de Granby qui s'effectue parfois à partir du lac Boivin.

stations. Ainsi, les relevés ont été effectués à partir du 21 janvier 1976 à la station 100, du 11 janvier 1975 à la station 101, du 22 avril 1975 à la station 105, et du 21 janvier 1975 aux stations 105 et 210.

### 1.2.3 Protocole d'échantillonnage et procédure analytique

Le prélèvement des échantillons a été effectué à l'aide de bouteilles de polyéthylène, de capacité d'un litre, insérées dans un hydrocapteur métallique. A chacun des sites, deux échantillons étaient prélevés et conservés sur glace fondante à une température inférieure à 4°C, jusqu'à ce qu'il y ait analyse au laboratoire de Québec. En 1975, les deux échantillons ont été analysés séparément, alors qu'en 1976 ils étaient composés avant l'analyse. Pour permettre l'intégration d'une section transversale de la rivière, on remplissait la moitié de la bouteille au premier tiers de la largeur de la rivière puis celle-ci était complétée au second tiers. L'hydrocapteur était descendu jusqu'au fond et remonté à vitesse constante (Campbell *et al.*, 1979). On trouve au tableau 1.3 la liste des paramètres déterminés sur les échantillons, ainsi qu'une description des techniques analytiques employées.

### 1.3 Mesures hydrologiques

Les deux années durant lesquelles il y a eu échantillonnage sont très différentes du point de vue hydrologique, l'année 1975 (figure 1.4) se caractérisant par un été particulièrement sec, tandis que l'année 1976 (figure 1.5), qui était plus humide que la moyenne, présentait des fluctuations rapides de débit dues aux nombreuses précipitations de l'été et de l'automne. Les étiages d'été prononcés sont une caractéris-

TABLEAU 1.3 Paramètres mesurés aux stations du bassin de la Yamaska-Nord  
(tiré de Campbell *et al.*, 1979).

PARAMÈTRE	TYPE D'ÉCHANTILLON <sup>†</sup>	MÉTHODE ANALYTIQUE	RÉFÉRENCE
C-inorganique dissous	F, NF	Acidification, chauffage, dosage CO <sub>2</sub> (Beckman Carbon Analyzer)	-
C-total dissous	F, NF	Oxydation catalytique, dosage CO <sub>2</sub> (Beckman Carbon Analyzer)	-
N-Kjeldahl	F	Acidification, digestion, colorimétrie (Technicon no 197-72W)	-
N-NH <sub>4</sub>	F, NF	Colorimétrie	Reardon <i>et al.</i> (1966)
N-NO <sub>2</sub>	F	Colorimétrie (Technicon No 102-70W)	-
N-NO <sub>3</sub>	F	Réduction, colorimétrie (Technicon No 100-70W)	-
P-soluble réactif	F	Colorimétrie (Technicon No 155-71W)	-
P-inorganique dissous	F	Hydrolyse, colorimétrie (Technicon No 93-70W)	-
P-total dissous	F	Acidification, digestion, colorimétrie (Technicon No 197-72W)	-
Si-réactive	NF	Colorimétrie (Technicon No 105-70W)	-
Conductivité	NF	Electrochimie	-
pH	NF	Electrochimie	-
Solides en suspension	R	Gravimétrie	Stainton <i>et al.</i> (1974)
C particulaire	R	Oxydation catalytique, dosage CO <sub>2</sub> (Hewlett Packard C-H-N Analyzer)	Stainton <i>et al.</i> (1974)
N particulaire	R	Oxydation catalytique, dosage N <sub>2</sub> (Hewlett Packard C-H-N Analyzer)	Stainton <i>et al.</i> (1974)
P Particulaire	R	Combustion, hydrolyse, dosage PO <sub>4</sub>	Stainton <i>et al.</i> (1974)
Fe	NF	Oxydation, colorimétrie (Technicon No 109-71W)	-
Mn	NF	Absorption atomique	-
Cl	NF	Colorimétrie (Technicon No 217-72W)	-
Potentiel de fertilité	NF-A	Bio-essai (Selinastrum capricornutum)	EPA (1971)
Pigments chlorophylliens	R	Extraction fluorométrie	Stainton <i>et al.</i> (1974)

<sup>†</sup> NF = non filtré; F = filtré (filtres Whatman GF/C, chauffés préalablement à 550°C); R = résidu sur filtre;  
NF-A = non-filtré et autoclavé.

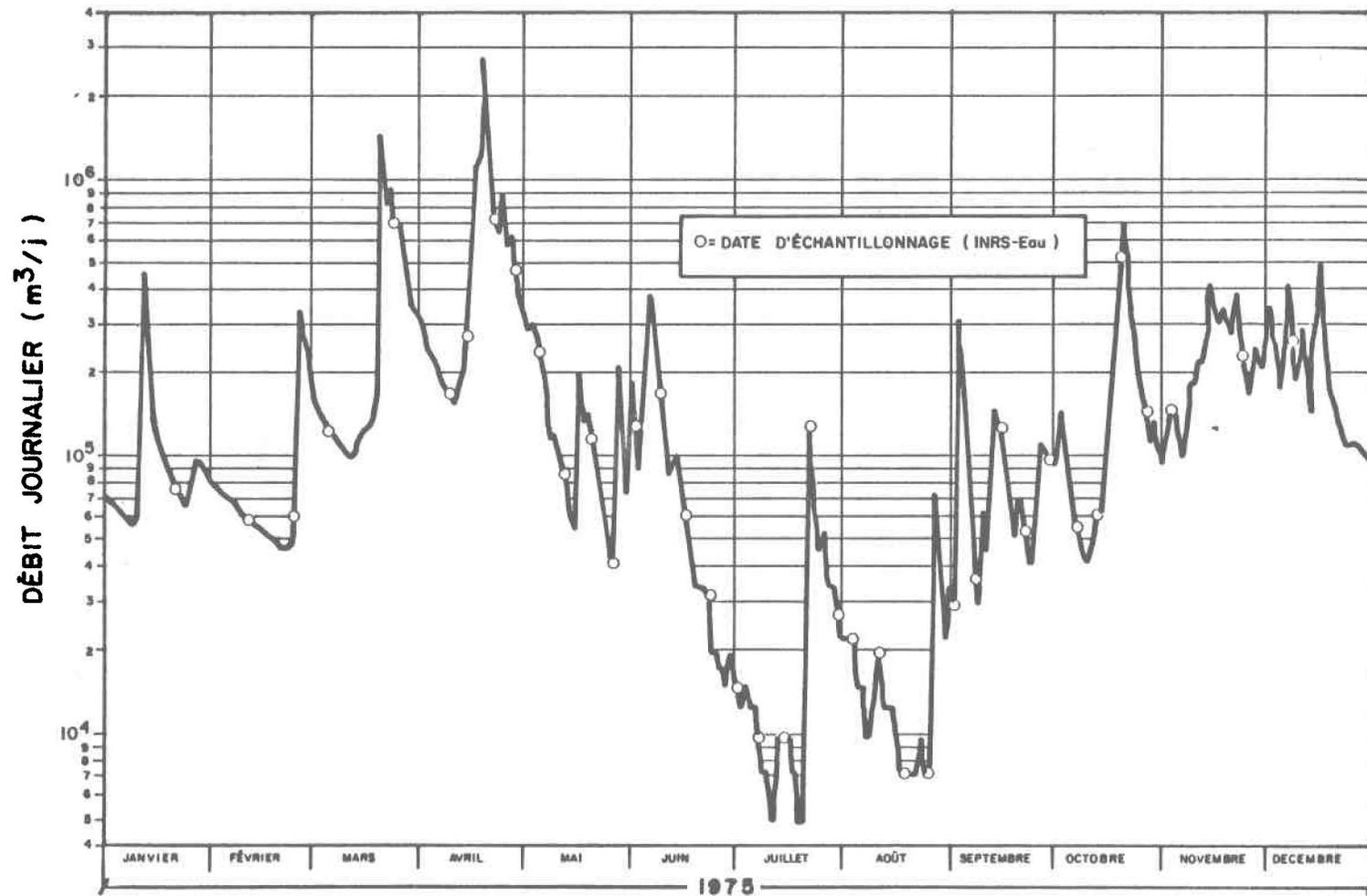


Figure 1.4 . Débits journaliers enregistrés à Shefford Vale ( station hydrométrique 030309) en 1975 ( tiré de Campbell et al., 1979 ).

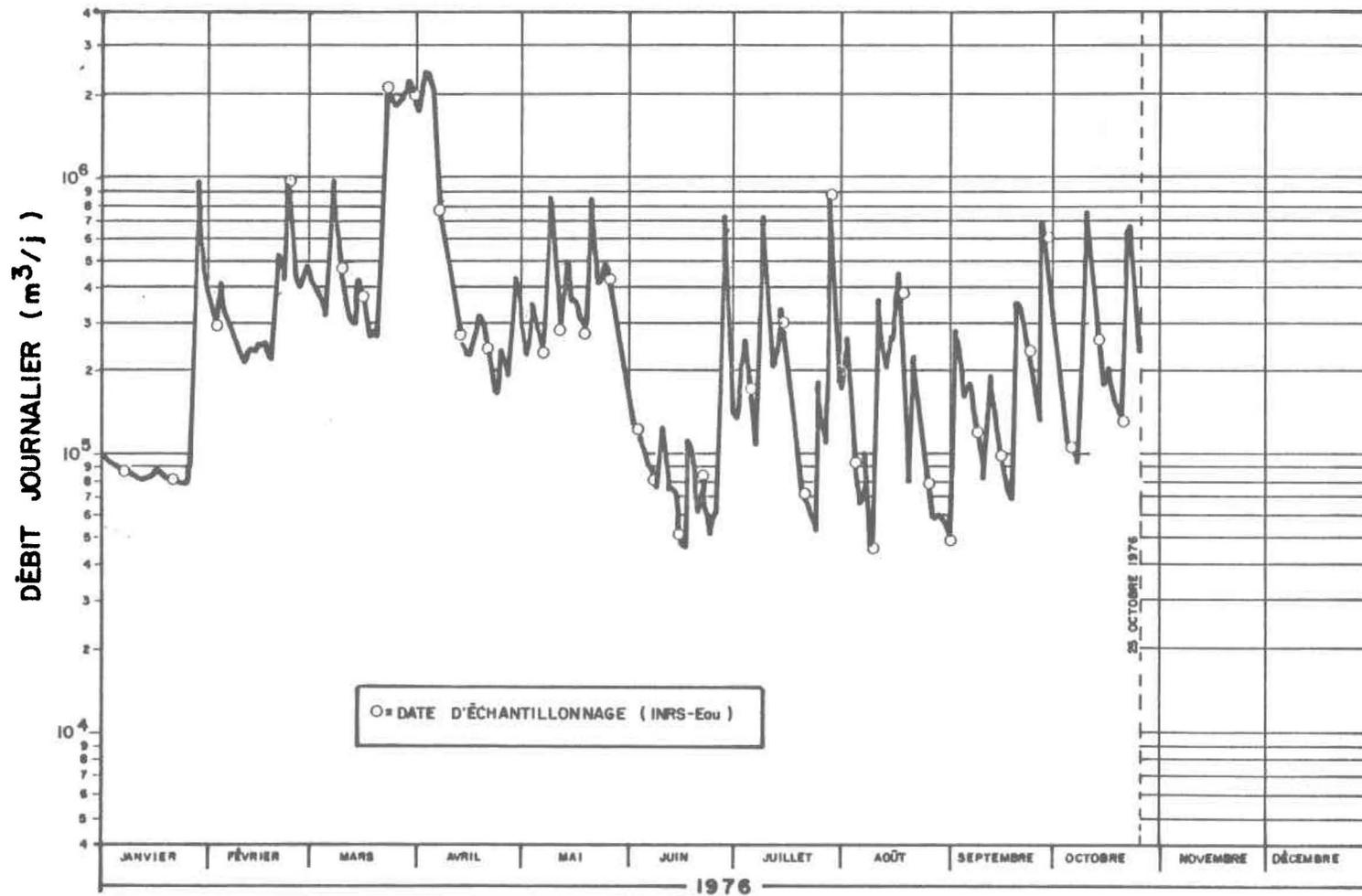


Figure 1.5. Débits journaliers enregistrés à Shefford Vale (station hydrométrique 030309) en 1976 (tiré de Campbell et al., 1979).

tique importante du régime hydrologique de cette région. Il faut noter de plus que durant l'été 1975, le lac Boivin a connu une période de stagnation prolongée, de la fin de juin à la mi-septembre, durant laquelle le sens de l'écoulement s'est parfois inversé pour passer du lac à la Réserve (Campbell *et al.* 1979).

### 1.3.1 Débits

A la station hydrométrique de Shefford Vale (#030309) les débits sont mesurés sur une base journalière depuis 1967 par le Ministère des Richesses Naturelles; à cette station, située à une centaine de mètres de la station 103 de mesure des paramètres de qualité, la surface drainée est de 153.6 km<sup>2</sup>. Ne disposant pas de mesures de débit aux stations 100, 101, et 105, celles-ci peuvent être obtenues par transposition des données de la station 103, les débits n'y étant régularisés que par le petit barrage du lac Waterloo. Les débits de Shefford Vale ont donc été transposés aux stations 100, 101, 105, en utilisant les rapports des surfaces drainées. Ainsi, on obtient (Campbell *et al.*, 1979):

- Station 100 (bassin de 43.5 km<sup>2</sup>) situé à Warden

$$\frac{\text{Débit à Warden}}{\text{Débit à Shefford Vale}} = \frac{\text{superficie du bassin à Warden}}{\text{superficie du bassin à Shefford Vale}} = 0.27$$

- Station 101 (bassin de 129.6 km<sup>2</sup>) situé à Savage Mills

$$\frac{\text{Débit à Savage Mills}}{\text{Débit à Shefford Vale}} = 0.84$$

- Station 105 (bassin de 196 km<sup>2</sup>) situé à l'entrée du lac Boivin

$$\frac{\text{Débit à l'entrée du lac Boivin}}{\text{Débit à Shefford Vale}} = 1.44 .$$

Etant donné la présence du barrage du lac Boivin en aval de la station 210 située à l'exutoire de ce lac, les débits à ce site sont plutôt reliés au niveau du lac Boivin.

### 1.3.2 Consommation d'eau

Durant la période qui nous concerne ici (janvier 1975 à octobre 1976) l'approvisionnement en eau de la ville de Granby s'est effectué à partir du lac Boivin ou de la Réserve de Granby. Le tableau 1.4 indique quel a été le point de prélèvement de l'eau selon la date considérée. D'après les relevés de l'usine municipale de filtration, la consommation moyenne était alors de 45,000 m<sup>3</sup>/jr (Campbell *et al.*, 1979).

## 1.4 Paramètres retenus pour l'étude

Une critique des données a déjà été effectuée pour les besoins de l'étude menée par l'INRS-Eau (Campbell *et al.*, 1979). Un examen approfondi a alors permis d'éliminer certaines valeurs aberrantes qui étaient soit beaucoup trop élevées ou beaucoup trop faibles. De plus, en raison de problèmes analytiques reliés à un changement de méthode d'analyse, les données d'azote organique pour l'année 1976 se sont avérées inutilisables. Il y eut aussi des problèmes occasionnels de contamination pour le carbone organique.

### 1.4.1 Choix des paramètres

Les paramètres choisis pour l'étude l'ont été, parmi ceux qui étaient disponibles, en fonction de la pertinence de l'information qu'ils fournissent quant à la dynamique des substances nutritives, c'est-à-dire

TABLEAU 1.4 Point de prélèvement de l'eau pour la consommation de la ville de Granby (tiré de Campbell *et al.*, 1979).

RÉSERVE DE GRANBY	LAC BOIVIN
du 21/01/75 au 12/02/75	du 13/02/75 au 15/05/75
du 16/05/75 au 26/06/75	du 27/06/75 au 6/07/75
du 7/07/75 au 6/11/75	du 7/11/75 au 7/07/76
du 8/07/76 au 26/10/76	

du carbone, de l'azote, du phosphore et de la silice. Les paramètres retenus sont énumérés au tableau 1.5, où l'on présente aussi les abréviations qui seront par la suite employées dans le texte.

S'intéressant plus particulièrement à la recherche de relations entre paramètres, on a éliminé de l'étude le fer, le manganèse, les chlorures et le pH car ils présentent peu d'intérêt en relation avec les éléments nutritifs. Le carbone inorganique n'a pas été retenu car ce paramètre présente peu d'intérêt du point de vue de la variabilité temporelle, ses variations étant habituellement tamponnées par les échanges gazeux avec l'atmosphère.

En 1976, on a cessé au laboratoire de faire la distinction entre les nitrates et nitrites, ces derniers n'étant présents qu'en faible quantité. Aussi a-t-on choisi d'utiliser plutôt l'azote nitrates et nitrites ( $N-NO_{2-3}$ ). A la suite d'un changement de laboratoire, les ortho-phosphates n'ont plus été mesurés en 1976. Comme le phosphore inorganique et le phosphore total soluble présentent, dans le cas de la Yamaska-Nord, des comportements semblables (Campbell *et al.*, 1979), et qu'il y a plusieurs valeurs manquantes de phosphore organique, on n'a retenu que le phosphore total soluble.

#### 1.4.3 Valeurs manquantes

Parmi les paramètres choisis, il en est certains pour lesquels il manque plusieurs valeurs (tableau 1.6). Ce sont l'azote organique et les solides en suspension en 1976; les phaeopigments dont la mesure a débuté qu'en septembre 1975, le potentiel de fertilité qui n'a pas

TABLEAU 1.5 Paramètres retenus pour l'étude

PARAMÈTRE	ABRÉVIATION UTILISÉE
Nitrates et Nitrites	N - NO <sub>2-3</sub>
Azote ammoniacal	N - NH <sub>4</sub>
Azote organique	N <sub>org</sub>
Azote particulaire	N <sub>part</sub>
Phosphore total soluble	P <sub>t</sub>
Phosphore particulaire	P <sub>part</sub>
Carbone organique	C <sub>org</sub>
Carbone particulaire	C <sub>part</sub>
Solides en suspension	S.S.
Silice réactive	SiO <sub>2</sub>
Chlorophylle-a (non corrigée)	Chlo <sub>a</sub>
Phaeopigments	P.P.
Potentiel de fertilité	P.F.

TABLEAU 1.6 Valeurs manquantes

- Station 100: Début de l'échantillonnage: 21/01/76

PÉRIODE	FRÉQUENCE D'É- CHANTILLON- NAGE	SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>org</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	C <sub>part</sub>	N <sub>part</sub>	P <sub>part</sub>	Chlo <sub>a</sub>	S.S.	P.P.	P.F.
21/01/75 au 09/04/75	1 fois par 2 semaines	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
10/04/75 au 10/11/75	1 fois par semaine	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31	31/31
11/11/75 au 09/03/76	1 fois par 2 semaines	3/7	7/7	3/7	7/7	3/7	3/7	3/7	3/7	3/7	3/7	5/7	3/7	3/7
10/03/76 au 26/10/76	1 fois par semaine	-	1/31	-	31/31	1/31	1/31	-	-	-	4/31	-	4/31	1/31

TABLEAU 1.6 Valeurs manquantes (suite)

- Station 101: Début de l'échantillonnage: 11/02/75

PÉRIODE	FRÉQUENCE D'É- CHANTILLON- NAGE	SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>org</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	C <sub>part</sub>	N <sub>part</sub>	P <sub>part</sub>	Chlo <sub>a</sub>	S.S.	P.P.	P.F.
21/01/75 au 09/04/75	1 fois par 2 semaines	1/6	4/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	2/6	6/6	3/6
10/04/75 au 10/11/75	1 fois par semaine	-	6/31	-	-	-	-	-	-	-	-	1/31	25/31	-
11/11/75 au 09/03/76	1 fois par 2 semaines	-	5/7	-	5/7	-	-	-	-	-	-	3/7	-	-
10/03/76 au 26/10/76	1 fois par semaine	-	1/31	-	31/31	1/31	1/31	-	-	-	2/31	1/31	2/31	-

TABLEAU 1.6 Valeurs manquantes (suite)

- Station 103: Début de l'échantillonnage: 22/04/75

PÉRIODE	FRÉQUENCE D'É- CHANTILLON- NAGE	SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>org</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	C <sub>part</sub>	N <sub>part</sub>	P <sub>part</sub>	Chlo <sub>a</sub>	S.S.	P.P.	P.F.
21/01/75 au 09/04/75	1 fois par 2 semaines	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
10/04/75 au 10/11/75	1 fois par semaine	2/31	9/31	2/31	2/31	2/31	4/31	2/31	2/31	2/31	2/31	3/31	25/31	31/31
11/11/75 au 09/03/76	1 fois par 2 semaines	-	5/7	-	5/7	-	-	-	-	-	-	3/7	-	7/7
10/03/76 au 26/10/76	1 fois par semaine	-	1/31	-	31/31	2/31	1/31	-	-	-	-	-	-	31/31

TABLEAU 1.6 Valeurs manquantes (suite)

- Station 105: Début de l'échantillonnage: 21/01/75

PÉRIODE	FRÉQUENCE D'É- CHANTILLON- NAGE	SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>org</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	C <sub>part</sub>	N <sub>part</sub>	P <sub>part</sub>	Chlo <sub>a</sub>	S.S.	P.P.	P.F.
21/01/75 au 09/04/75	1 fois par 2 semaines	-	1/6	-	-	-	-	-	-	-	-	1/6	6/6	3/6
10/04/75 au 10/11/75	1 fois par semaine	1/31	7/31	-	-	-	-	1/31	1/31	1/31	-	-	26/31	2/31
11/11/75 au 09/03/76	1 fois par 2 semaines	-	5/7	-	5/7	-	-	-	-	-	-	3/7	-	-
10/03/76 au 26/10/76	1 fois par semaine	-	1/31	-	31/31	1/31	1/31	-	-	-	-	1/31	1/31	-

TABLEAU 1.6 Valeurs manquantes (suite)

- Station 210: Début de l'échantillonnage: 21/01/75

PÉRIODE	FRÉQUENCE D'É- CHANTILLON- NAGE	SiO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>org</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	C <sub>part</sub>	N <sub>part</sub>	P <sub>part</sub>	Chlo <sub>a</sub>	S.S.	P.P.	P.F.
21/01/75 au 09/04/75	1 fois par 2 semaines	-	3/6	-	-	-	-	1/6	1/6	-	-	3/6	6/6	3/6
10/04/75 au 10/11/75	1 fois par semaine	1/31	6/31	-	-	-	-	-	-	-	1/31	-	26/31	2/31
11/11/75 au 09/03/76	1 fois par 2 semaines	-	5/7	-	5/7	-	-	-	-	1/7	1/7	3/7	1/7	-
10/03/76 au 26/10/76	1 fois par semaine	-	1/31	-	31/31	1/31	1/31	-	-	-	1/31	1/31	1/31	1/31

été déterminé à toutes les stations et le carbone organique en 1975 et 1976. En raison de ces contraintes, tous les paramètres ne peuvent être utilisés pour tous les traitements statistiques. Dans certains cas les données manquantes ont été reconstituées. Les méthodes utilisées pour effectuer cette reconstitution sont décrites en annexe (B).

## CHAPITRE II

### RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES: ASPECTS THÉORIQUES ET REVUE DE LITTÉRATURE

On s'intéresse ici aux relations entre les variations temporelles de concentration des paramètres. On cherche à identifier à priori et de façon théorique, les relations présentant le plus de potentiel. Pour ce faire, on définit en premier lieu le système générateur des concentrations, qui constitue l'ensemble des éléments dont l'action produit les concentrations observées. On s'attache ensuite plus particulièrement au comportement de ce système, afin d'en déduire des conditions de relation, ce qui permet de déterminer quels sont les liens potentiels entre paramètres. Puis, on procède à une revue des relations mises en évidence par d'autres recherches. Une telle démarche a pour but d'orienter l'étude statistique des relations entre paramètres, qui sera effectuée par la suite.

#### 2.1 Composantes du système générateur des concentrations

En rivière, le système de génèse des concentrations comprend trois éléments principaux:

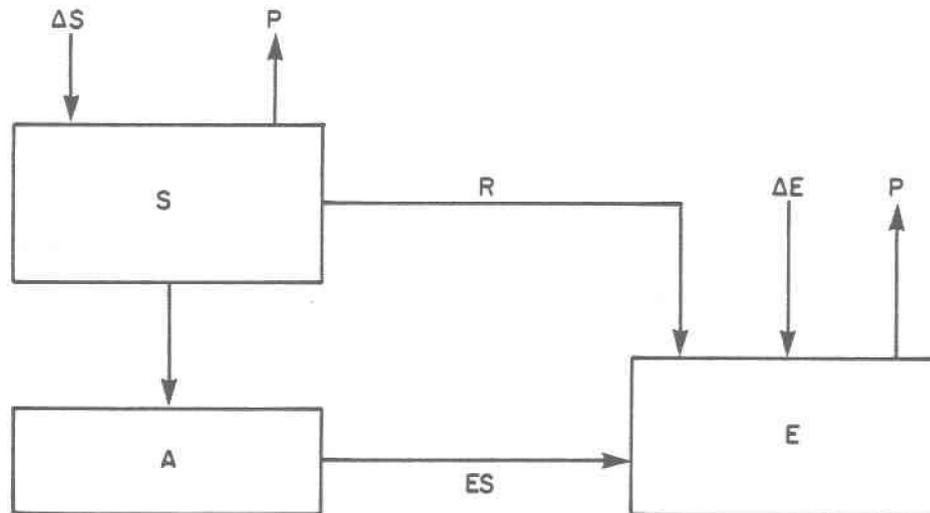
- les sources allochtones qui mettent en circulation des produits, par l'intermédiaire d'agents de transport tels que les eaux atmosphériques, les eaux d'égoûts, les eaux de ruissellement et les eaux souterraines;
- le débit du cours d'eau dans lequel ces produits se retrouvent;
- les mécanismes (biologiques, physiques ou chimiques) susceptibles de conduire à des transformations dans le cours d'eau.

On cherchera, dans les sections qui suivent, à établir l'importance de ces sources et mécanismes pour les paramètres considérés. On reprendra, pour ce faire, certains points des travaux de Malo-Lalande (1976), qui s'est intéressée plus particulièrement aux sources allochtones d'azote et de phosphore.

La figure 2.1 représente un modèle qualitatif du cheminement des substances nutritives (Woods, 1967), qui illustre la façon dont elles parviennent au cours d'eau. D'autres chercheurs (Cluis et Durocher, 1976) ont, quant à eux, développé un modèle permettant de relier les charges en azote et en phosphore d'un cours d'eau, à l'utilisation du territoire de son bassin. Le tableau 2.1 présente les apports spécifiques annuels moyens, de chaque classe d'utilisateur, selon ce modèle. Les caractéristiques principales de l'utilisation du territoire du bassin de la Yamaska-Nord sont décrites au tableau 2.2. On commentera ce tableau dans le texte qui suit.

#### 2.1.1 Apports atmosphériques

Selon Malo-Lalande (1976), les précipitations peuvent représenter des apports assez importants, en azote et en phosphore, dans les régions agricoles ou fortement industrialisées. Ces éléments s'y retrouvent surtout sous forme minérale ( $N-NH_4$ ,  $N-NO_{2-3}$ ,  $PO_4$ ). Il y a généralement très peu de silice dans les précipitations (Ceasar *et al.*, 1976).



**EXPLICATION DES SYMBOLES :**

- $\Delta S$  : Apports directs de substances nutritives sur le sol (précipitations, fertilisants, fumier) ;
- $\Delta E$  : Apports directs de substances nutritives dans l'eau (précipitations, égouts domestiques, urbains et industriels) ;
- P : Perte de substances nutritives (volatilisation, sédimentation) ;
- R : Transfert des éléments nutritifs par ruissellement ;
- ES : Transfert des éléments nutritifs par écoulement souterrain ;
- S : Sol
- A : Aquifère
- E : Eaux de surface

Figure 2.1 .Modèle qualitatif de cheminement des substances nutritives ( tiré de Woods , 1967 ).

TABLEAU 2.1 Apports spécifiques moyens annuels  
(tiré de Cluis et Durocher, 1976)

	PRODUCTEUR	TYPES D'APPORT*	APPORTS DE N	APPORTS DE P
Apports naturels	Lacs - pluie sur le lac	réels	2.1 kg/jour-km <sup>2</sup>	0.02 kg/jour-km <sup>2</sup>
	forêts - ruissellement	potentiels <sup>†</sup>	5.3 kg/jour-km <sup>2</sup>	0.6 kg/jour-km <sup>2</sup>
	marécages - ruissellement	réels	1.5 kg/jour-km <sup>2</sup>	
	sol nu - pluie sur sol nu	potentiels	2.1 kg/jour-km <sup>2</sup>	0.02 kg/jour-km <sup>2</sup>
Apports de la population humaine	population avec égout	réels	14 g/jour-habitant	1.8 g/jour-habitant
	population sans égout	potentiels	14 g/jour-habitant	1.8 g/jour-habitant
Apports de la population animale	bovins	potentiels	187 g/jour-animal	33.6 g/jour-animal
	porcs	potentiels	31 g/jour-animal	9.5 g/jour-animal
	moutons	potentiels	24 g/jour-animal	4.4 g/jour-animal
	poulets	potentiels	2 g/jour-animal	0.7 g/jour-animal
	chevaux	potentiels	159 g/jour-animal	23.1 g/jour-animal
Apports des engrais chimiques	blé	potentiels	15 kg/jour-km <sup>2</sup> -	9.4 kg/jour-km <sup>2</sup> -
	avoine	potentiels	4.6 " fertilisé	9.4 " fertilisé
	orge	potentiels	12 "	12 "
	fruits de vergers	potentiels	3.4 "	7.1 "
	petits fruits	potentiels	29 "	28 "
	pâturage défriché	potentiels	15.4 "	9.1 "
	foin cultivé	potentiels	15.4 "	9.1 "
	maïs-grain	potentiels	40 "	13 "
	tabac	potentiels	11 "	18 "
	patates	potentiels	25 "	23 "
	betteraves	potentiels	25 "	24 "
	légumes	potentiels	15 "	12 "
autres	potentiels	31 "	11 "	
Apports des industries	chacune des industries	réels	dépendant du nombre d'employés et du type d'industrie	

\* Apports réels: rejet direct dans le cours d'eau  
Apports potentiels: sources diffuses.

† La littérature donne des apports spécifiques réels (0.64 kg/jour-km<sup>2</sup> d'azote et 0.032 kg/jour-km<sup>2</sup> de phosphore); cependant, comme la forêt est une source diffuse, son apport est considéré comme potentiel par un artifice de calcul.

TABEAU 2.2 Utilisation du territoire du bassin versant de la rivière Yamaska-Nord selon le recensement de 1971 (adapté de Campbell *et al.*, 1979).

REGION*	Surface (km <sup>2</sup> )	% de la surface totale du bassin	Surface occupée par la forêt (km <sup>2</sup> )	% de surface occupée par la forêt	Sols nus (km <sup>2</sup> )	Sols nus, % de la surface	Sols cultivés (km <sup>2</sup> )	Sols cultivés, % de la surface	Sols engraisés (km <sup>2</sup> )	Sols engraisés, % de la surface
Amont de Warden	43.5	20%	26.2	60%	13.0	30%	2.1	5%	0.4	1%
Tronçon Warden-Savage Mills	75.5	34%	34.3	45%	17.7	23%	17.7	23%	4.6	6%
Tronçon Savage Mills - Granby	102.	46%	42.5	42%	34.7	34%	21.2	21%	2.4	2%

\* Les régions sont constituées des bassins résiduels\*\* de trois des stations d'échantillonnage: Warden (#100), Savage Mills (#101), Granby (#210).

\*\* Bassin résiduel: partie du bassin versant d'une station, qui n'est pas incluse dans celui de la station située plus en amont.

TABLEAU 2.2 (suite)

REGION	Population humaine reliée à l'égoût (pers.)	Population humaine non-reliée à l'égoût (pers.)	Nombre de bovins	Densité de population animale (bovins) tête/km <sup>2</sup>	Nombre de porcs	Densité de population animale (porcs) tête/km <sup>2</sup>	Nombre de poulets	Densité de population animale (poulets) tête/km <sup>2</sup>
Amont de Warden	4974	385	307	7.1	178	4.1	2118	48.7
Tronçon Warden-Savage Mills	-	1571	1968	26.1	1284	17.0	13487	179
Tronçon Savage Mills - Granby	-	1115	3307	32.4	2437	23.9	58043	569

Pour ce qui est de la Yamaska-Nord, une étude de la qualité des eaux atmosphériques, dans le bassin de la Yamaska (Lachance et Sasseville, 1976), a démontré que celles-ci contiennent des quantités appréciables d'azote et de phosphore, soit  $3.6 \text{ kg/jr} \cdot \text{km}^2$  d'azote et  $0.10 \text{ kg/jr} \cdot \text{km}^2$  de phosphore.

### 2.1.2 Apports géologiques

La roche en place influence la qualité des eaux qui entrent en contact avec elle (lessivage). Les quantités transférées varient selon le type de roche. Les apports en azote et en phosphore sont généralement plus élevés dans le cas de roches sédimentaires que dans celui de roches ignées (Dillon et Kirchner, 1975). Cependant, les teneurs en phosphore des eaux souterraines sont habituellement faibles. Selon Wetzel (1975a) la silice contenue dans les eaux souterraines provient, en majeure partie, de la dégradation des minéraux d'alumino-silicate, les concentrations les plus fortes étant trouvées dans les eaux en contact avec des roches volcaniques et plutoniques.

Dans le bassin de la Yamaska-Nord, la roche est de type très varié. On y trouve des roches sédimentaires: ardoises, grès, calcaires et "siltstone", quelques faciès de roches volcaniques, et dans la région du Mont Shefford, des roches ignées alcalines (Cann *et al.*, 1948).

### 2.1.3 Apports pédologiques

L'érosion et le lessivage des sols constituent des sources importantes d'éléments nutritifs et de solides en suspension. L'azote étant plus

mobile que le phosphore dans les sols, il est plus facilement emporté lors des pluies. Le phosphore se présente dans les sols sous forme organique ou inorganique. Quant à l'azote, la majeure partie de cet élément se trouve sous forme organique (Vollenveider, 1968). Il semble d'après Beckwith et Reeve (1964), que la silice contenue dans les eaux de ruissellement provienne de sa désorption des sols, plutôt que de la dissolution des composés de silice. Pour ce qui est du potentiel d'érosion des sols, il est relié à leur contenu relatif en sable, "silt" et argile, à la proportion de matière organique, au pH, à leur structure et à la pente. Le type et le mode de culture ont aussi une grande influence (Malo-Lalande, 1976).

Les sols, dans le bassin de la Yamaska-Nord, se sont surtout développés à partir de "till" appalachien et de matériaux sédimentaires. On y rencontre aussi des sols organiques et dans les plaines d'inondation, des sables alluvionnaires. Le drainage des terres s'effectue en général assez bien (Cann *et al.*, 1948).

#### 2.1.4 Apports forestiers

Les apports forestiers varient beaucoup d'un bassin à l'autre, selon le type de sol, la végétation et la pente. De façon générale, la forêt mature est un milieu peu propice à l'érosion, qui capte et recycle la plupart des éléments nutritifs apportés par les eaux atmosphériques (Bormann *et al.*, 1974).

La superficie occupée par la forêt représente près de 50% de la surface totale du bassin de la Yamaska-Nord. La région située en amont

de Warden, en particulier, est caractérisée par un fort pourcentage de couvert forestier (tableau 2.2).

#### 2.1.5 Apports agricoles

Les pratiques agricoles (élevage, épandage d'engrais et de fumier, culture intensive) influencent profondément les charges en substances nutritives des cours d'eau. L'élevage intensif entraîne des problèmes majeurs de disposition des déchets animaux et ceux-ci sont alors susceptibles d'enrichir les eaux soit par ruissellement de surface, soit par infiltration dans les eaux souterraines. Les problèmes d'entreposage sont surtout liés aux volumes insuffisants des fosses, à leur non-étanchéité, ou à l'absence de fosse tout simplement. L'épandage de fumier augmente de plus les risques de perte d'éléments nutritifs par ruissellement, si les doses d'application ne sont pas respectées. Il y a aussi parfois déversement volontaire des fumiers liquides dans les cours d'eau. Les engrais chimiques constituent aussi des sources importantes de phosphates, d'azote ammoniacal et de nitrates. Comparativement à ceux-ci, le fumier est plutôt pauvre en phosphore, riche en carbone organique, et l'azote s'y présente sous forme organique et ammoniacal (Malo-Lalande, 1976). Les nitrates sont les substances les plus susceptibles de percoler à travers le sol et d'atteindre les eaux souterraines, car ils sont très solubles et peu retenus par les sols, alors que l'azote ammoniacal et les phosphates s'y adsorbent plus facilement. La majeure partie des phosphates qui atteignent les cours d'eau sont adsorbés sur les particules de sol perdues par érosion. Les terres cultivées de façon intensive sont d'ailleurs plus facilement érodables. Une certaine quantité d'azote et de

carbone organique particulaire est aussi perdue par érosion (Lunen, 1971).

On trouve peu de sols cultivés dans la région située en amont de Warden (tableau 2.2) et la densité de population animale y est faible. Dans le reste du bassin, les sols exploités représentent environ 20% de la surface. Cependant, une faible proportion de ces sols sont engraisés. L'élevage de porcs, de volailles et de bovins se pratique principalement dans cette dernière région, surtout dans le tronçon Savage Mills-Granby (tableau 2.2). Les chiffres rapportés au tableau 2.2 datent de 1971. D'après une étude effectuée par les Services de Protection de l'Environnement dans le bassin de la Yamaska-Nord (Massé, 1978), le nombre de porcs dans cette région a beaucoup augmenté entre 1971 et 1978. Ceci est dû au fait que cinq porcheries d'importance se sont installées dans les environs immédiats du réservoir Choinière à partir de 1977.

#### 2.1.6 Apports domestiques et industriels

Les rejets domestiques contribuent souvent de façon importante à l'enrichissement des eaux de surface en azote, phosphore et carbone sous formes particulières et organiques ( $N_{part}$ ,  $N_{org}$ ,  $N-NH_4$ ,  $PO_4$ ,  $P_{part}$ ,  $C_{org}$ ,  $C_{part}$ ). Selon Malo-Lalande (1976), les industries alimentaires, celles des fertilisants ainsi que celles des détergents sont parmi les plus susceptibles de rejeter dans le milieu aquatique des quantités appréciables d'éléments nutritifs ( $N_{org}$ ,  $C_{org}$ ,  $PO_4$ ,  $N-NO_3$ ,  $N-NH_4$ ). En ce qui concerne les apports domestiques et industriels de silice, il semble qu'ils soient assez limités, et que les teneurs en silice des effluents ne soient pas beaucoup plus élevées que celles des eaux d'approvisionnement. Des persilicates sont contenus dans certains détergents domestiques et sont aussi

utilisés pour certains procédés de l'industrie du textile comme agents de blanchiment (Owens, 1970).

Quant aux eaux de ruissellement urbain, collectées généralement par des égouts pluviaux séparés des égouts domestiques, elles représentent aussi une source non négligeable de substances nutritives, bien que les concentrations retrouvées soient moindres que dans les égouts domestiques (Malo-Lalande, 1976).

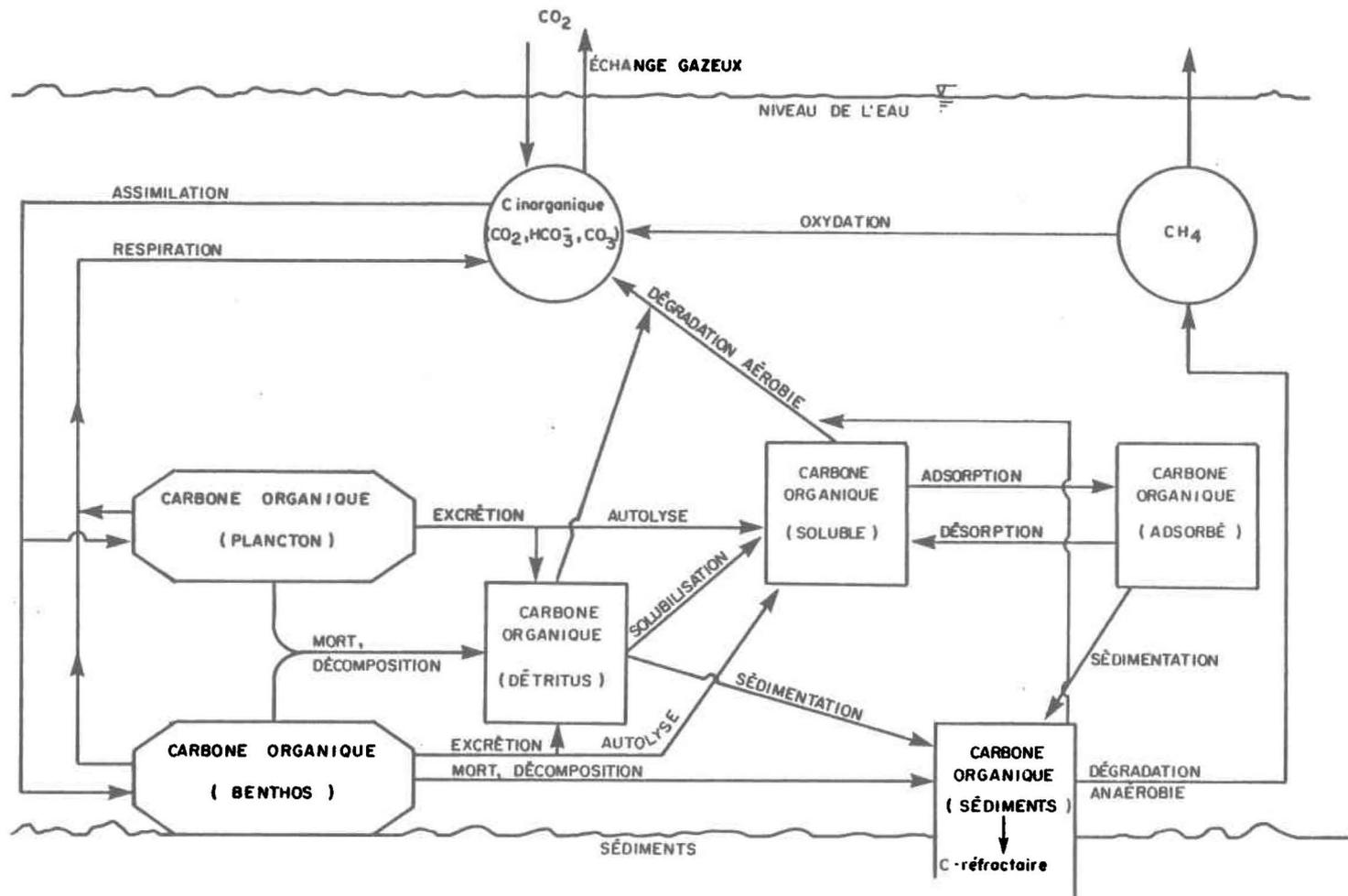
On trouve deux centres urbains dans le bassin de la Yamaska-Nord:

- Granby, d'une population de 37,132 personnes (Statistiques Canada, 1977). C'est la zone la plus industrialisée du bassin. Les rejets municipaux s'effectuent cependant en aval du lac Boivin et n'affectent pas la qualité de l'eau du tronçon étudié.
- Waterloo, d'une population de 4,936 personnes (Statistiques Canada, 1977). Le lac Waterloo reçoit les égouts des chalets riverains et ceux d'un secteur de la ville non reliés au collecteur municipal. En aval du lac Waterloo, la rivière reçoit les égouts non épurés de la ville, des industries (alimentaires, métallurgiques et du meuble) et du village de Warden (OPDQ, 1976).

Pour ce qui est du reste du bassin, la population n'est pas reliée à un égout (Tableau 2.2) et la densité est faible (inférieure à 30 h/km<sup>2</sup>).

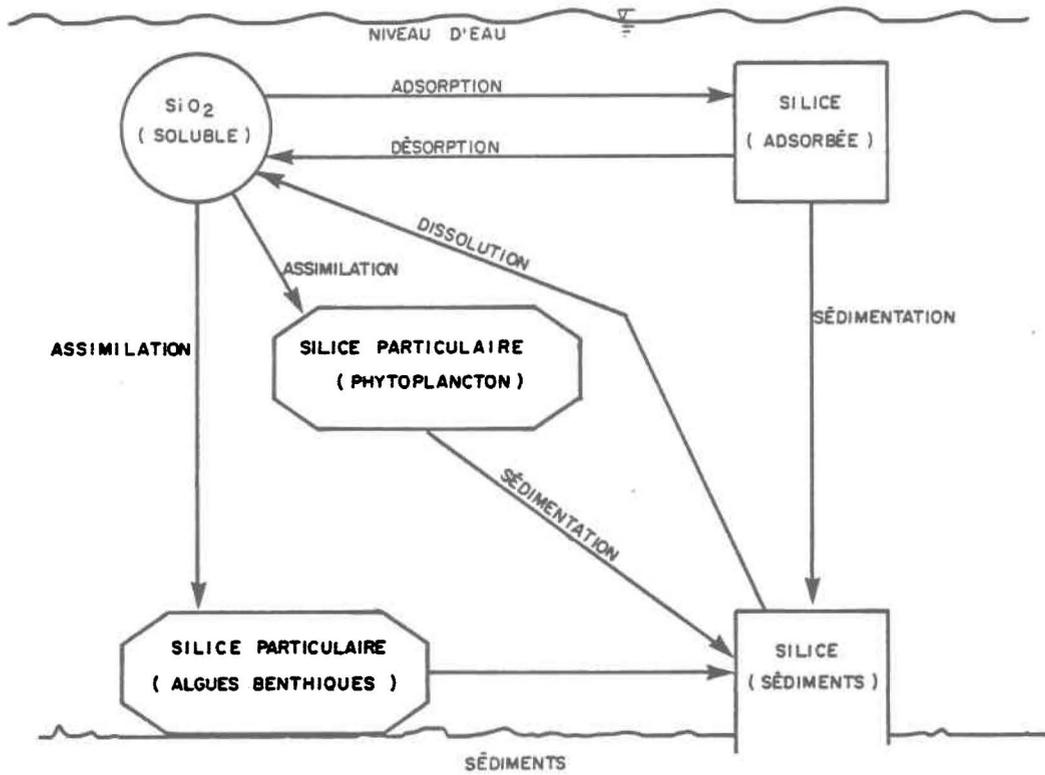
#### 2.1.7 Mécanismes de transformation

Les figures 2.2 à 2.5 illustrent respectivement les cycles du carbone, de la silice, du phosphore et de l'azote en rivière. Afin de ne pas alourdir inutilement ces figures, on n'y a indiqué que les mécanismes



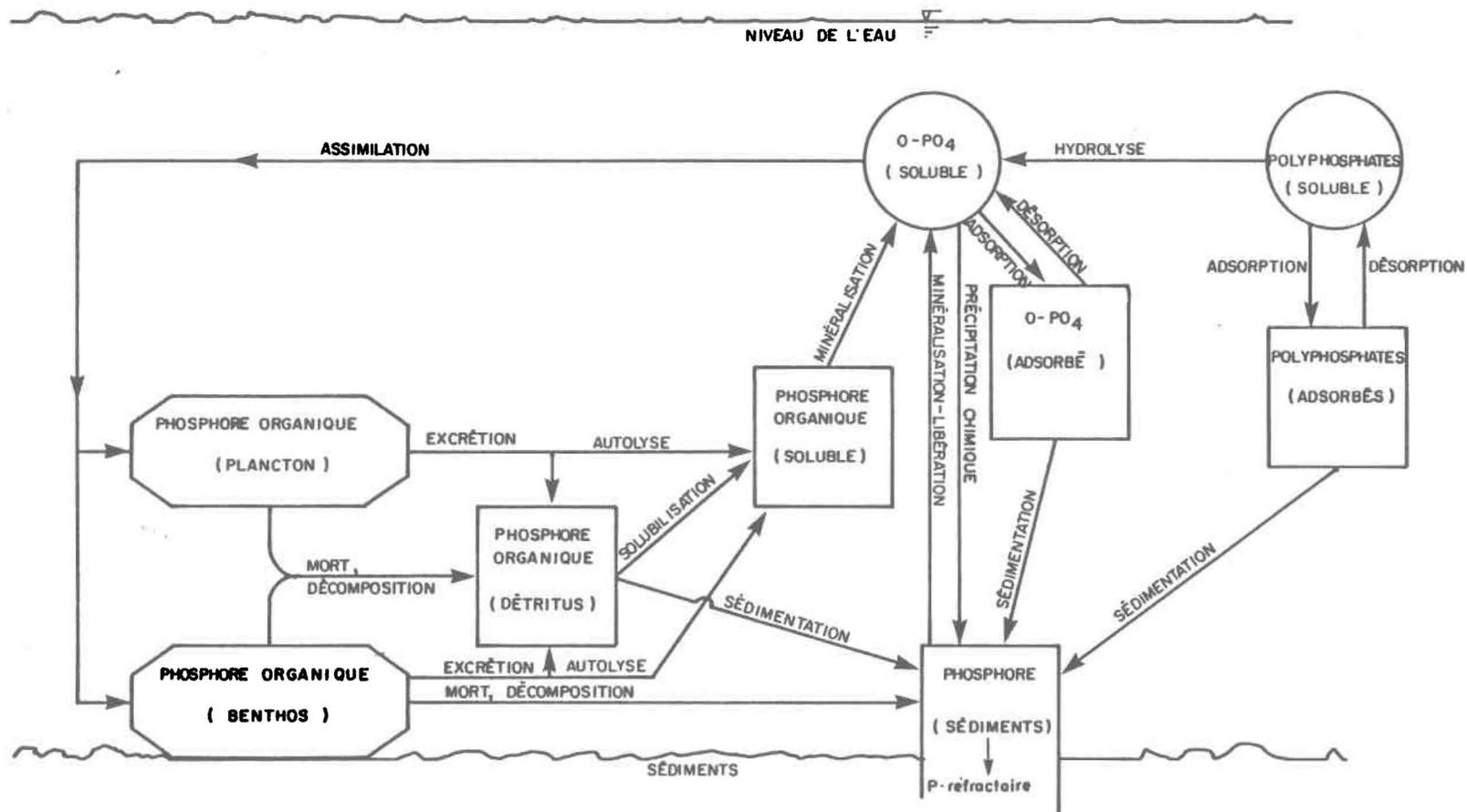
(1) Les flèches indiquant la sédimentation sous-entendent aussi la possibilité de remise en suspension.

Figure 2.2. Schéma des transformations du carbone en rivière (adapté de Wetzel 1975 a ; Kerr et al, 1972).



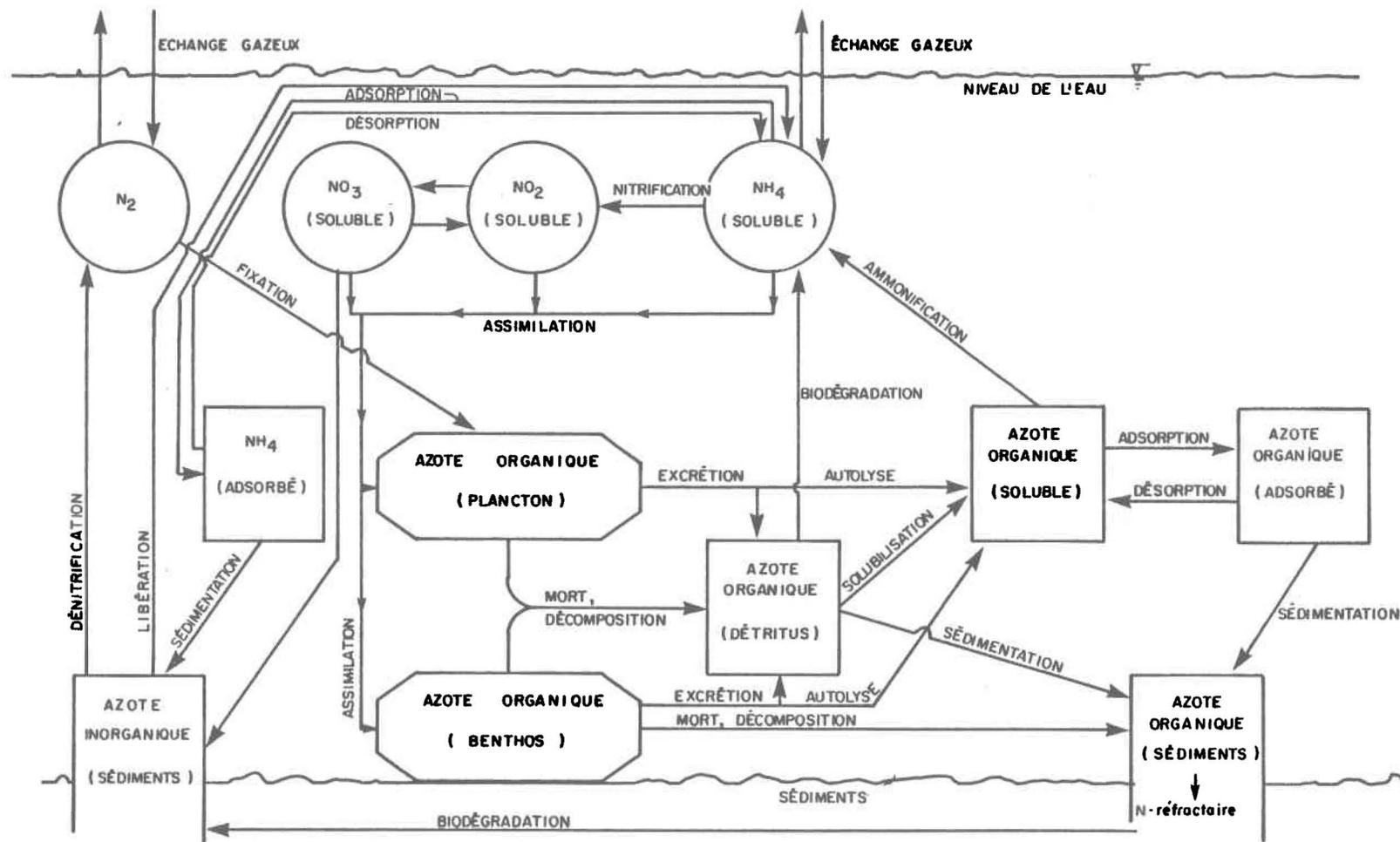
(1) Les flèches indiquant la sédimentation sous-entendent aussi la possibilité de remise en suspension.

Figure 2. 3 . Schéma des transformations de la silice en rivière  
( adapté de Wetzel , 1975 ) .



(1) Les flèches indiquant la sédimentation sous-entendent aussi la possibilité de remise en suspension.

Figure 2.4. Schéma des transformations du phosphore en rivière ( adapté de Rigler , 1973 ) .



(1) Les flèches indiquant la sédimentation sous-entendent aussi la possibilité de remise en suspension .

Figure 2.5 . Schéma des transformations de l'azote en rivière (adapté de Brezonik , 1972 ).

les plus importants. Il faut noter de plus que ces cycles sont interreliés puisque ces substances sont combinées dans la matière vivante ou morte. Les transformations que subissent ces éléments sont pour la plupart associées à l'activité biologique; cependant on retrouve également des phénomènes de précipitation chimique dans le cas du phosphore, de sédimentation et de remise en suspension pour les formes particulières des éléments nutritifs, et des réactions d'adsorption et de désorption qui affectent surtout les formes inorganiques du phosphore et l'azote ammoniacal, et à un degré moindre, les formes organiques d'azote, de phosphore et de carbone, ainsi que la silice. De plus, certains paramètres (azote ammoniacal, phosphates et silice), sont influencés par les échanges s'effectuant à l'interface sédiments-eau.

## 2.2 Comportement du système générateur des concentrations

L'évolution temporelle des concentrations dépend du comportement du système générateur des concentrations, c'est-à-dire de la combinaison des comportements de chacun de ses éléments. Comme on cherche ici à comparer les variations temporelles de concentration des paramètres, il apparaît intéressant de s'attacher surtout aux différences existant entre les systèmes de genèse qui leur sont associés.

A une station donnée, les changements de débit sont les mêmes quel que soit le paramètre. Ce qui peut différer, ce sont les sources allochtones et les mécanismes de transformation. On s'intéressera donc plus particulièrement à ceux-ci. L'action des sources étant intimement liée à celle des agents de transports, on en discute par type d'agents de transport.

### 2.2.1 Précipitations

La figure 2.1 illustre bien la façon dont les eaux atmosphériques parviennent au cours d'eau: précipitation directe sur les surfaces d'eau libre, ruissellement, infiltration dans les sols puis écoulement souterrain. Dans la région des Appalaches, il semble qu'une bonne partie des eaux atteigne le cours d'eau par écoulement hypodermique et par ruissellement (Carson et Sutton, 1971). Le rôle joué par les précipitations directes est d'autant moins important que le pourcentage de superficie du bassin, occupée par les plans d'eau, est faible. Dans le cas de la Yamaska-Nord, ce pourcentage est de 1.6%.

### 2.2.2 Eaux souterraines

La qualité des eaux souterraines varie généralement peu dans le temps et leur charge est assez constante. En rivière, on observe souvent, pour certains ions majeurs (calcium, magnésium, bicarbonates et sulfates) affectés surtout par les apports géologiques, des diminutions de concentration lors des augmentations de débit (Ex: Swertz *et al.*, 1971). Ceci peut sans doute s'expliquer par une dilution des eaux souterraines par les eaux superficielles moins minéralisées.

### 2.2.3 Eaux de ruissellement

Les quantités charroyées par les eaux de ruissellement (sources diffuses) varient selon la saison, le couvert végétal et le volume de ruissellement. De nombreux chercheurs (Campbell *et al.*, 1976a; Casey et Newton, 1972; Delfino et Byrnes, 1975; Edwards, 1973; Johnson et Likens, 1969) rapportent avoir observé lors des pluies, des augmentations des

charges et parfois même des concentrations des paramètres très influencés par des sources diffuses.

Le ruissellement urbain est un cas particulier. Les apports varient selon l'utilisation du sol, la saison et la fréquence des pluies et le nettoyage des rues (Malo-Lalande, 1976). Bien que ces rejets soient ponctuels, le comportement de ce type de source s'apparente beaucoup à celui des sources diffuses, puisque dans les deux cas, il y a augmentation des charges lors des augmentations de débit.

#### 2.2.4 Eaux d'égoûts

Les sources associées aux eaux d'égoûts (sources ponctuelles) déversent dans le cours d'eau des charges relativement constantes dans le temps. Aussi les paramètres que ces sources influencent, subissent des effets de dilution et de concentration: teneurs faibles en période de débit élevé et fortes en temps d'étiage (Edwards, 1973).

#### 2.2.5 Mécanismes de transformation

L'importance des mécanismes de transformation varie selon les saisons, les facteurs physiques tels que la luminosité, la température, le débit, la turbulence, étant de première importance en rivière (Campbell *et al.*, 1976a). L'influence des mécanismes se fera sentir surtout en été, période où les conditions sont les plus favorables à l'activité biologique.

Les phénomènes de sédimentation et de remise en suspension sont reliés aux fluctuations du débit. La précipitation chimique se

produit surtout lorsque les concentrations sont élevées, le pH ayant aussi une certaine influence. Quant aux échanges sédiments-eau, leur vitesse dépend des conditions de température, de pH et d'oxygénation (Kamp-Nielsen, 1975) et également de facteurs hydrodynamiques (Lee, 1969).

### 2.3 Relations potentielles

Afin d'identifier les relations présentant le plus de potentiel, on déduit de l'étude du système générateur des concentrations, des conditions pouvant conduire à des relations. On procède aussi à la revue des relations rapportées dans la littérature. Cette démarche permettra d'identifier à priori les relations possibles et de les comparer aux relations déjà connues et mises en évidence par d'autres chercheurs.

#### 2.3.1 Conditions d'existence de relations

On peut distinguer deux types d'actions des sources en fonction du comportement du débit: l'un tend à causer une augmentation des concentrations lors des augmentations de débit et l'autre une diminution des concentrations lors des accroissements de débit. La plupart du temps, les paramètres subissent à la fois l'influence de ces deux types d'action des sources et celle des mécanismes de transformation. Les effets se combinant, le résultat est alors difficile à prévoir en détail, et il vaut mieux utiliser la notion de dominance: c'est-à-dire dominance de l'effet d'un type de source ou d'un mécanisme.

Deux cas extrêmes peuvent se présenter selon l'importance relative des sources et des mécanismes:

Cas 1

Les mécanismes de transformation ont peu d'impact sur les concentrations, et l'effet des sources devient donc prépondérant. Il pourra alors exister une relation entre deux paramètres si l'action de leurs sources dominantes est de même type.

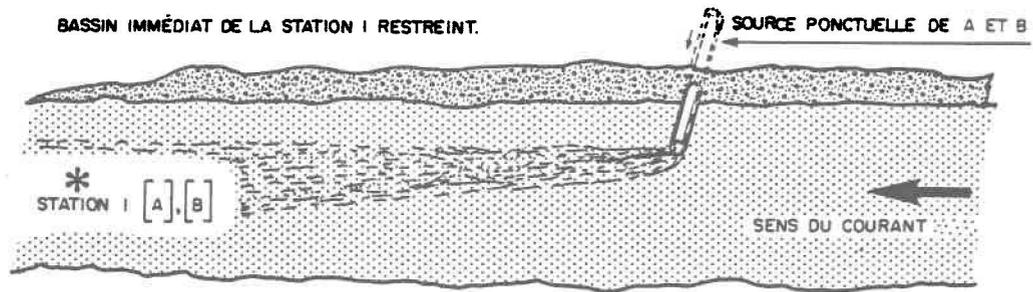
La figure 2.6 illustre une situation de ce genre. Une source ponctuelle rejette dans un cours d'eau certaines quantités des éléments A et B. Le bassin immédiat de la station d'échantillonnage située en aval étant assez restreint et le temps de parcours plutôt court, les mécanismes de transformation influencent très peu les concentrations de A et B en ce point, dont les variations seront plutôt modulées par les changements de débit.

Cas 2

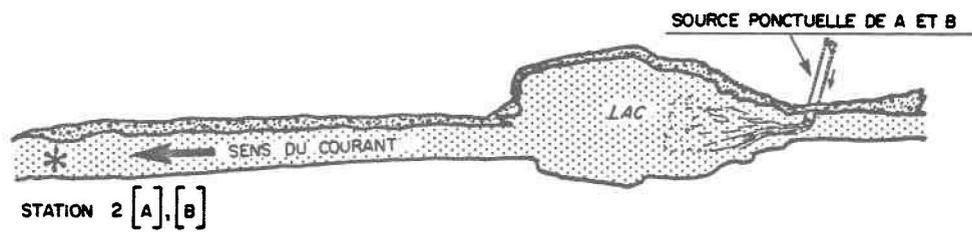
L'impact des mécanismes de transformation sur les variations de concentration est important, l'action des sources n'étant alors que secondaire. Il pourra y avoir relation entre les paramètres si ceux-ci sont influencés par un facteur commun, comme dans le cas de:

- paramètres reliés par un mécanisme dominant,
- mécanismes dominants semblables,
- mécanismes dominants associés.

Plusieurs situations peuvent accentuer l'effet des mécanismes. Une température élevée renforce l'action des mécanismes d'ordre biologique. De plus, un long temps de séjour dans le cours d'eau, dû à l'éloignement des sources, à un débit faible, à la présence d'un lac en amont



Cas 1. Mécanismes de transformation peu importants .



Cas 2. Mécanismes de transformation importants .

Figure 2.6 . Importance des mécanismes de transformation selon la localisation des stations .

ou encore à un élargissement de la rivière, permet aussi aux mécanismes d'influencer davantage les paramètres. La figure 2.6 illustre une situation où les mécanismes de transformation seront importants. Une source ponctuelle, éloignée de la station d'échantillonnage, déverse une certaine quantité des éléments A et B à l'entrée d'un lac. Le temps de séjour de A et B dans le cours d'eau sera alors assez long et s'il n'y a pas d'autres sources importantes ou de tributaires qui rejettent les éléments A et B dans le cours d'eau, les changements de concentration seront alors explicables par l'action conjointe du débit et des mécanismes.

Quant aux paramètres qui pourraient être reliés par les mécanismes, mais dont le type de source est différent, l'existence d'une relation entre eux dépend de la force relative de l'action des mécanismes et de celles des sources, force qui varie selon les saisons et l'emplacement des stations.

### 2.3.2 Relations potentielles: bassin de la Yamaska-Nord

En rivière, l'identification sur une base théorique de relations entre paramètres est un problème complexe et jusqu'à présent peu étudié. En plus des mécanismes de transformation, il faut tenir compte des variations de débit qui influencent très fortement les concentrations. En rivière, le mouvement spatial se traduit par une évolution temporelle des concentrations (Campbell *et al.*, 1976b).

On ne peut donc affirmer avec certitude qu'il y aura relation entre tel et tel paramètre, trop de facteurs intervenant dans la genèse

des concentrations. On peut cependant tenter de déterminer s'il peut y avoir des relations, en utilisant les conditions précédemment énoncées. Pour ce faire, on a établi le tableau 2.3 qui présente certaines caractéristiques importantes des paramètres telles que leur nature (organique ou non), la forme sous laquelle on les trouve (particulaire ou dissoute), le type de sources et les mécanismes qui les influencent. Les mécanismes "sources" sont ceux dont l'action entraîne une augmentation de concentration, alors que les "puits" causent plutôt une diminution de concentration. Les types de sources identifiés au tableau 2.3 sont spécifiques au bassin de la Yamaska-Nord, mais leur importance peut changer selon les stations. Au tableau 2.4, les paramètres sont regroupés selon les mécanismes qui les influencent.

En comparant ces tableaux aux conditions de relation, on a pu identifier les cas semblant présenter le plus de potentiel, qui sont présentés au tableau 2.6 (section 2.3.3). Il est bon de se rappeler que cette démarche n'assure en aucun cas que les relations potentielles seront observées en réalité, mais seulement qu'il y a une certaine probabilité de les mettre en évidence. Cette démarche permettra par la suite, de faciliter l'interprétation des relations obtenues.

Dans ce qui suit, on examine en détail les relations potentielles.

$$\frac{N_{org}}{N_{part}}$$

La production primaire et l'excrétion d'azote organique sont des mécanismes associés. En effet une augmentation de la densité d'algues devrait entraîner une plus forte excrétion, du moins de produits de

TABLEAU 2.3 Caractéristiques des paramètres

PARAMÈTRE	FORME	*TYPE DE SOURCES	MÉCANISMES "SOURCES"	MÉCANISMES "PUITS"
N <sub>organique</sub>	dissoute, organique	ponctuelles surtout	excrétion, lyse, solubilisation des détritrus	ammonification, adsorption
N - NO <sub>2-3</sub>	dissoute, inorganique	diffuses	nitrification	dénitrification, production primaire, échange sédiments-eau
N - NH <sub>4</sub>	dissoute, inorganique	diffuses et surtout ponctuelles	ammonification, échanges sédiments-eau	production primaire, nitrification, échange gazeux avec atmosphère
N <sub>particulaire</sub>	particulaire, surtout organique	ponctuelles et diffuses	production primaire, remise en suspension	biodégradation, solubilisation des détritrus, sédimentation
P <sub>total</sub>	dissoute, organique et inorganique	ponctuelles surtout	excrétion, lyse, solubilisation des détritrus, biodégradation, échanges sédiments-eau	production primaire, précipitation chimique, adsorption
P <sub>particulaire</sub>	particulaire, à composante inorganique non négligeable	ponctuelles et diffuses	production primaire, remise en suspension, adsorption du phosphore soluble	solubilisation des détritrus, biodégradation, sédimentation
C <sub>organique</sub>	dissoute, organique	ponctuelles surtout	excrétion, lyse, solubilisation des détritrus	biodégradation, adsorption
C <sub>particulaire</sub>	particulaire, surtout organique	ponctuelles et diffuses	production primaire, remise en suspension	solubilisation des détritrus, biodégradation, sédimentation
Potentiel de fertilité (PF)	représente les formes disponibles des éléments nutritifs et surtout du facteur limitant la production primaire		Le comportement du PF est en principe semblable à celui du facteur limitant	
Chlorophylle-a non corrigée	paramètre représentant la biomasse des algues (mortes ou vivantes) présentes dans le seston			
Phaeopigments (p.p.)	forme dégradée de la chlorophylle-a. Représente la biomasse d'algues mortes présente dans le seston			
S.S.	particulaire, organique et non-organique	ponctuelles et diffuses	production primaire, remise en suspension, érosion détritrique	biodégradation, sédimentation
SiO <sub>2</sub>	dissoute	diffuses et eaux souterraines	réactions de désorption, lyse, dissolution à l'interface sédiments-eau	production primaire, réactions d'adsorption suivie d'une sédimentation

\* Dans le cas de la Yamaska-Nord.

TABLEAU 2.4 Mécanismes influençant les paramètres

MÉCANISME	PARAMÈTRES INFLUENCÉS PAR LE MÉCANISME	
	SOURCE	PUITS
sédimentation (puits) remise en suspension; érosion (source)	S.S. $C_{part}$ $N_{part}$ $P_{part}$ $Chlo_a$ p.p.	S.S. $C_{part}$ $N_{part}$ $P_{part}$ $Chlo_a$ p.p.
adsorption (puits) désorption (source)	$C_{org}$ $N_{org}$ $N-NH_4$ $P_t$ $SiO_2$	$C_{org}$ $N_{org}$ $N-NH_4$ $P_t$ $SiO_2$
échanges sédiments-eau	$P_t$ $SiO_2$ $N-NH_4$	$N-NO_3$ $P_t$
précipitation chimique		$P_t$
production primaire	$Chlo_a$ $C_{part} (org)$ $N_{part} (org)$ $P_{part} (org)$ S.S. (org)	$N-NO_{2-3}$ $N-NH_4$ $P_t$ $SiO_2$ (diatomées)
excrétion	$C_{org}$ $N_{org}$ $P_t$	
mort des cellules d'algues	p.p.	
nitrification	$N-NO_{2-3}$	$N-NH_4$
lyse et solubilisation des détritrus	$C_{org}$ $N_{org}$ $P_t$ $SiO_2$	$C_{part} (org)$ $N_{part} (org)$ $P_{part} (org)$ S.S. (org)
biodégradation	$N-NH_4$ $P_t$	$C_{part} (org)$ $C_{org}$ $N_{part} (org)$ $N_{org}$ $P_{part} (org)$ S.S. (org)

de poids moléculaire élevé. Les algues constituant en fait de l'azote particulaire, il pourrait exister une relation directe entre ces deux formes d'azote.

$$\underline{N_{org} - C_{org}}$$

Il se peut que les concentrations en azote organique et carbone organique varient en concordance, ces paramètres étant tous deux très influencés par les sources ponctuelles. De plus ils sont produits in situ par excrétion, lyse ou solubilisation des détritrus.

$$\underline{N_{org} - \text{Chlorophylle}_a}$$

Il existe un lien direct entre la production de chlorophylle-a et l'excrétion d'azote organique. Etant donné l'influence des sources allochtones d'azote organique, la relation entre ces paramètres n'est susceptible d'être observée qu'en période d'activité biologique (mai à octobre).

$$\underline{NO_3 - NH_4}$$

Les nitrates et l'azote ammoniacal sont tous deux assimilés par les producteurs primaires, ce qui indique une possibilité de relation directe entre eux. Cependant, par la nitrification, l'azote ammoniacal se transforme en nitrates ce qui pourrait causer une relation inverse. De plus, les nitrates sont très influencés par les sources diffuses alors qu'il peut y avoir des apports ponctuels importants d'azote ammoniacal.

$$\underline{NO_3 - N_{part}}$$

La production primaire est une source d'azote particulaire et

un puits de nitrates. Il pourrait donc en exister une relation inverse entre ces paramètres.

NO<sub>3</sub> - PF

Le potentiel de fertilité étant un indice de la disponibilité des éléments nutritifs pour les producteurs primaires, son comportement devrait suivre assez bien celui des nitrates puisque l'azote inorganique est le facteur chimique le plus susceptible<sup>\*</sup> de limiter la production primaire dans la rivière Yamaska-Nord (Campbell *et al.*, 1979).

NO<sub>3</sub> - Chlorophylle<sub>a</sub>

La production primaire étant une source de chlorophylle-a et un puits de nitrates, les concentrations de ces paramètres pourraient varier de façon inverse en période d'activité biologique. Cette relation pourrait être amoindrie par le fait qu'il s'agit ici de chlorophylle totale (phaeopigments + chlorophylle active).

NH<sub>4</sub> - N<sub>part</sub>

Pour la même raison que dans le cas des nitrates et de l'azote particulaire, il pourrait y avoir relation entre ce dernier et l'azote ammoniacal.

NH<sub>4</sub> - PF

Il pourrait exister entre ces paramètres, une relation directe comme pour les nitrates et le PF.

\* La croissance des producteurs primaires est limitée par l'élément chimique qui est le moins disponible. Dans les cellules des algues, le rapport N/P (atomique) varie entre 10 et 16. Si dans les eaux ce rapport ... (suivre à la page suivante)

NH<sub>4</sub> - Chlorophylle<sub>a</sub>

La relation entre ces paramètres devrait être de même nature que celle entre les nitrates et la chlorophylle-a.

N<sub>part</sub> - P<sub>part</sub>

Ces paramètres sont tous deux fortement influencés par les phénomènes de sédimentation, érosion et remise en suspension. Cependant, le phosphore particulaire a une composante inorganique assez importante alors que l'azote particulaire est surtout organique, et leurs sources allochtones peuvent donc différer. Il existe donc une possibilité de relation directe entre eux, relation plus évidente en période d'activité biologique, durant laquelle la production primaire vient renforcer le lien entre ces paramètres.

N<sub>part</sub> - Chlorophylle<sub>a</sub>

La production primaire étant une source à la fois de chlorophylle-a et d'azote particulaire il est possible que les concentrations de ces paramètres soient reliées de façon directe en période d'activité biologique.

N<sub>part</sub> - Solides en suspension

Les arguments supportant l'existence d'une relation entre l'azote particulaire et les solides en suspension sont les mêmes que pour l'azote particulaire et le phosphore particulaire. De plus, l'azote particulaire représente une partie des solides en suspension.

\*

... est très différent, c'est qu'une des substances est en excès et ne pourra pas être complètement utilisée. L'autre élément est alors le facteur limitant chimique de la production primaire (Chiandani et Vighi, 1974). Les rejets ponctuels des égouts de la ville de Waterloo consti-  
... (suivre à la page suivante)

P<sub>part</sub> - C<sub>part</sub>

On peut utiliser ici les mêmes arguments que dans le cas du lien entre l'azote particulaire et le phosphore particulaire, le carbone particulaire étant surtout de nature organique.

P<sub>part</sub> - Chlorophylle<sub>a</sub>

La production primaire étant une source de chlorophylle-a et de phosphore particulaire, leurs concentrations pourraient varier en concordance en période d'activité biologique, quoique le phosphore particulaire ne soit pas constitué uniquement d'algues, étant entre autres, associé à l'érosion.

P<sub>part</sub> - Solides en suspension

Il est fort possible que le phosphore particulaire et les solides en suspension se comportent de façon semblable puisqu'ils sont tous deux reliés à l'érosion (sources diffuses), influencés par les phénomènes de sédimentation et de remise en suspension, et que le phosphore particulaire est inclus dans la mesure des solides en suspension.

C<sub>org</sub> - Chlo<sub>a</sub>

S'il existe un lien entre ces paramètres, il devrait être surtout dû au mécanisme "production primaire" puisque celui-ci représente une source de chlorophylle-a et que le carbone organique est produit (entre autres) par excrétion. On pourrait observer cette relation directe en période d'activité biologique.

\* ... tuant une source majeure de phosphore comparativement à l'azote qui provient surtout de sources diffuses, c'est ce dernier paramètre qui devient donc souvent le moins disponible.

C<sub>org</sub> - C<sub>part</sub>

Pour la même raison que dans le cas de l'azote organique et de l'azote particulaire, il pourrait exister une relation entre ces paramètres, tous deux provenant de plus en grande partie de sources ponctuelles.

C<sub>part</sub> - Chlorophylle<sub>a</sub>

Bien qu'il existe d'importantes sources allochtones de carbone particulaire, les variations de concentration de ce paramètre pourraient être liées de façon directe à celle de la chlorophylle-a, la production primaire constituant une source importante de ces deux paramètres.

C<sub>part</sub> - Solides en suspension

Les arguments supportant l'existence de cette relation sont les mêmes que dans le cas de l'azote particulaire et des solides en suspension.

PF-Chlorophylle<sub>a</sub>

Le PF étant un indice de la disponibilité des éléments nutritifs, il devrait être lié à la chlorophylle-a comme les formes inorganiques d'azote (N-NO<sub>2-3</sub>, N-NH<sub>4</sub>).

Chlorophylle-a - phaeopigments

Les phaeopigments étant inclus dans la mesure de la chlorophylle-a, les concentrations de ces paramètres pourraient varier de façon directe. Il serait cependant plus intéressant de comparer la chlorophylle-a active aux phaeopigments en période d'activité biologique.

### Chlorophylle<sub>a</sub> - SiO<sub>2</sub>

La silice soluble est assimilée par certains producteurs primaires tels que les diatomées benthiques et planctoniques. Les concentrations de silice et de chlorophylle-a sont donc susceptibles de varier de façon inverse durant la période où ces producteurs sont très actifs.

#### 2.4 Relations connues en rivière

Il existe peu d'études concernant les relations entre paramètres en rivière. La plupart des travaux portent plutôt sur les relations entre les concentrations et le débit, ainsi que sur le développement de modèles permettant de prédire les concentrations de certains paramètres à partir de la connaissance des principaux facteurs qui les influencent. Malcom et Durum (1976) rapportent avoir trouvé de bonnes corrélations entre les débits massiques de carbone organique dissous et particulaire. Etant donné que chacun des paramètres corrélés est fonction du débit, ces corrélations peuvent cependant être fictives et en traduire aucune relation significative.

On trouve au tableau 2.5 une liste des interrelations déjà observées. Seules les relations quantifiées par des corrélations y ont été notées. On y indique quels sont les paramètres corrélés, la valeur du coefficient de corrélation ( $r$ ) et le nombre de données utilisées pour le calcul, l'endroit pour lequel cette relation est valable, ainsi que la période d'observation et quelques remarques au sujet du calcul des coefficients de corrélation.

TABLEAU 2.5 Relations notées dans la littérature

PARAMÈTRES CORRÉLÉS	COEFFICIENTS DE CORRÉLATION $r$	NBRE DE DONNÉES UTILISÉES POUR LE CALCUL DE $r$	RIVIÈRE	PÉRIODE D'OBSERVATION	REMARQUES	RÉFÉRENCE
Phosphore total et solides en suspension	$r = .99$	8	Missouri	mai à décembre	Il semble que les valeurs utilisées pour les corrélations soient les moyennes des concentrations de plusieurs stations à une date donnée.	Delfino et Byrnes, 1975
Carbone organique total et solides en suspension	$r = .94$	8				
Azote organique total et solides en suspension	$r = .80$	8				
Azote kjeldahl et azote ammoniacal	$r = .74$	174	Saguenay	juin à août	Corrélations calculées en utilisant les valeurs de toutes les stations sur la rivière	Bisson et al., 1978
Azote kjeldahl et phosphore total soluble	$r = .77$	174				
Azote kjeldahl et potentiel de fertilité	$r = .81$	174				
Azote ammoniacal et phosphore total soluble	$r = .83$	174				
Azote ammoniacal et phaeopigments	$r = .86$	175				
Azote ammoniacal et chlorophylle-a corrigée	$r = .76$	175				
Azote ammoniacal et potentiel de fertilité	$r = .81$	116				
Phosphore total soluble et phaeopigments	$r = .82$	174				
Phosphore total soluble et chlorophylle-a corrigée	$r = .74$	174				
Phosphore total soluble et potentiel de fertilité	$r = .85$	116				
Phaeopigments et chlorophylle-a corrigée	$r = .91$	177				
Ortho-phosphates et potentiel de fertilité	$r = .999$	$n = 6$	Expérience de laboratoire réalisée à partir d'un milieu de culture auquel on fait certains ajouts		Relation valide quand le phosphore est le facteur limitant la production primaire	Shiroyama et al., 1973
Azote inorganique et potentiel de fertilité	$r = .999$	$n = 5$			Relation valide quand l'azote est le facteur limitant la production primaire	
Phosphore total et turbidité	$r = .79$ $r = .71$	?	Bighorn Shoshore	Année complète	Coefficients de corrélation significativement différents de 0 au niveau .01	Soltero et al., 1973
Azote total et turbidité	$r = .66$	?	Bighorn			

De tels résultats sont cependant difficilement transposables, le comportement des paramètres variant avec l'utilisation du territoire dans le bassin considéré, les conditions hydrologiques et la période d'observation.

La première série de relations a été observée pour la rivière Missouri dans la région sud-est du Nebraska par Delfino et Byrnes (1975). Ce bassin se compare difficilement à celui de la Yamaska-Nord car les débits de la rivière Missouri sont beaucoup plus élevés que ceux de la rivière Yamaska-Nord (moyenne pour la période mai-décembre: 57,000 pi<sup>3</sup>/sec). Selon Delfino et Byrnes (1975) la région étudiée est essentiellement agricole, et il existe plusieurs réservoirs le long de cette rivière, permettant d'en régulariser le débit. Selon ces auteurs il y a une bonne corrélation entre les valeurs de phosphore total, de carbone organique total et d'azote organique total et celles des solides en suspension ce qui vient renforcer la possibilité de relations entre le phosphore particulaire et les solides en suspension. Il est à noter cependant que ces corrélations n'ont été calculées qu'à partir de huit données et qu'une valeur élevée du coefficient de corrélation n'est pas forcément indicative d'une relation réelle en raison de la petite taille de l'échantillon; on peut en effet montrer qu'un coefficient de corrélation de .91 n'est pas significativement différent de 0 au niveau 0.05 lorsque N = 8.

La deuxième série de relations mises en évidence par Bisson *et al.* (1978) s'applique à la rivière Saguenay, dont le débit est aussi beaucoup plus important que celui de la Yamaska-Nord. La qualité des eaux de la rivière Saguenay est influencée par les activités agricoles qui se pratiquent sur ce bassin, par les apports domestiques des villes

d'Alma, Kénogami, Jonquière, Arvida et Chicoutimi ainsi que par les apports de plusieurs industries alimentaires et des pâtes et papiers. Les coefficients de corrélation indiqués sont significativement différents de zéro au niveau 0.001. On remarque que ces chercheurs ont trouvé une relation directe entre l'azote ammoniacal et la chlorophylle-a active. Lors de l'étude à priori on a plutôt prévu une relation inverse entre ces paramètres; les auteurs n'offrent pas d'explication.

Les deux relations suivantes au tableau 2.5 concernent l'azote inorganique, les ortho-phosphates et le potentiel de fertilité. Selon Shiroyama *et al.* (1973), le potentiel de fertilité d'un échantillon d'eau est proportionnel à son contenu en éléments nutritifs, azote ou phosphore selon le facteur limitant. Cette relation, valide en absence de substances toxiques, a été vérifiée par Miller *et al.* (1974) pour 62 lacs et 35 rivières et les résultats indiquent aussi une bonne corrélation, ces chercheurs ayant trouvé un accord à 20% près entre les valeurs prédites et les valeurs observées. Les échantillons étant autoclavés avant la mesure du potentiel de fertilité, la teneur en phosphore disponible pour la croissance est plus élevée que la concentration d'ortho-phosphates mesurée par ailleurs et correspond peut-être davantage au phosphore total soluble.

Les deux dernières relations indiquées au tableau 2.5 ont été observées pour les rivières Bighorn et Shoshone, par Soltero *et al.* (1973). Ces auteurs ont noté que le phosphore et l'azote total étaient bien corrélés avec la turbidité. Ce dernier paramètre étant habituellement relié très fortement aux solides en suspension, on peut penser qu'il existait aussi une bonne relation entre le phosphore et l'azote total et les solides en suspension.

Il est à noter aussi que Wang et Evans (1969) ont observé que les concentrations en silice dissoute et le nombre de cellules de diatomées étaient reliés selon une fonction hyperbolique inverse. La période d'observation s'étendait de mars à octobre et la relation était significative au niveau .01. Ceci confirme en partie la possibilité de l'existence d'une corrélation significative entre les concentrations de silice et de chlorophylle-a, ce dernier paramètre étant intimement lié au nombre de cellules d'algues présentes dans l'échantillon analysé. Weber et Moore (1967) rapportent, quant à eux, une absence de corrélation significative ( $r = -.061$ ,  $n = 28$ ) entre le carbone organique soluble et le volume de phytoplancton ( $\text{mm}^3/\ell$ ), paramètre dont la signification est très proche de celle de la chlorophylle-a. Il s'agit dans ce cas d'un bassin surtout agricole.

Pour fins de comparaison, le tableau 2.6 présente à la fois les relations dont il a été question dans cette section et celles dont l'existence a paru possible lors de l'examen du système de genèse des concentrations (section 2.3.1). Ces derniers occupent la partie supérieure du tableau alors que les relations déjà observées par d'autres chercheurs se retrouvent dans la partie inférieure.

On remarque en consultant ce tableau, qu'il apparaît des relations "nouvelles", non prévues par l'étude à priori. Rappelons que seules les relations qui ont semblé les plus probables pour la Yamaska-Nord, compte tenu du contexte spécifique de ce bassin, sont inscrites à ce tableau et que des relations qui paraissaient moins probables peuvent quand même exister. La plupart des relations "nouvelles" ont été observées dans le cas du bassin de la rivière Saguenay. La corrélation  $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{Kjeldahl}}$

YAMASKA NORD REVUE DE LITTERATURE	N <sub>org</sub>	N <sub>org total</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub>	N <sub>Kjeldahl</sub>	N <sub>part</sub>	N <sub>total</sub>	P <sub>total soluble</sub>	P <sub>part</sub>	P <sub>total</sub>	C <sub>org</sub>	C <sub>org total</sub>	C <sub>part</sub>	P.F.	Chlo <sub>a</sub>	p.p.	Chlo <sub>a</sub> corrigée	S.S.	SiO <sub>2</sub>
N <sub>org</sub>							A +					A +				A.B. +				
N <sub>org total</sub> *																				
NO <sub>3</sub>				A +			A -								A +	A.B. -				
NH <sub>4</sub>							A -								A +	A.B. -				
NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub>																				
N <sub>Kjeldahl</sub> *				A.B. +																
N <sub>part</sub>										A.B. +				A.B. +		A.B. +			A.B. +	
N <sub>total</sub>																				
P <sub>total soluble</sub>				A.B. +		A.B. +														
P <sub>part</sub>														A.B. +		A.B. +			A +	
P <sub>total</sub>																				
C <sub>org</sub>														A.B. +						
C <sub>org total</sub> *																				
C <sub>part</sub>																A.B. +			A.B. +	
P.F.				A.B. +	A +	A.B. +			A.B. +							A.B. -				
Chlo <sub>a</sub>																		A.B. +		A.B. -
p.p.				A.B. +					A.B. +											
Chlo <sub>a</sub> corrigée				A.B. +					A.B. +									A.B. +		
S.S.		A.B. +						A +						A.B. +						
SiO <sub>2</sub>																				A.B. -

+ = relation directe

A.B. = relation plus évidente ou observée durant la période d'activité biologique (mai à octobre inclusivement)

- = relation inverse

A = relation observable ou observée durant toute l'année

\* note: N<sub>organique total</sub> ~ N<sub>org</sub> + N<sub>part</sub>N<sub>Kjeldahl</sub> = N<sub>org</sub> + NH<sub>4</sub>C<sub>organique total</sub> ~ C<sub>org</sub> + C<sub>part</sub>

TABLEAU 2.6: RELATIONS POTENTIELLES

indique une relation entre l'azote ammoniacal et l'azote organique puisque  $N_{\text{Kjeldahl}} = N_{\text{org}} + \text{NH}_4$ . Cette relation et celle qui existe entre l'azote ammoniacal et le phosphore total soluble sont probablement dues à des apports provenant de sources communes, ce qui pourrait se produire, dans le cas de la Yamaska-Nord, à la station 100 qui est influencée par des sources ponctuelles d'azote ammoniacal et de phosphore. Le phosphore total soluble et l'azote ammoniacal sont corrélés avec les mêmes paramètres. Des apports importants de chlorophylle, d'azote et de phosphore par les tributaires agricoles du Saguenay pourraient peut-être expliquer les relations directes trouvées entre la chlorophylle, l'azote ammoniacal et le phosphore total soluble. Dans le bassin de la Yamaska-Nord, qui est peu agricole, l'azote est le principal facteur limitant ce qui exclut la possibilité de relation du phosphore avec la chlorophylle et le potentiel de fertilité. Lors de l'étude à priori, on a considéré la relation chlorophylle totale-phaeopigments plutôt que chlorophylle corrigée-phaeopigments.

Les corrélations trouvées par Delfino et Byrnes (1975) entre les solides en suspension et l'azote et le carbone organique total peuvent indiquer des relations avec l'azote et le carbone organique soluble ou particulaire, selon la spécification de l'azote et du carbone organique. L'existence des relations solides en suspension - azote et carbone particulaire a déjà été discutée lors de l'étude à priori (section 2.3.1).

Bien que plusieurs des relations identifiées comme probables pour la Yamaska-Nord ne soient pas mentionnées dans la littérature, ceci ne signifie pas nécessairement que ces interrelations n'existent pas. Il est possible qu'on n'ait jamais tenté de les quantifier. Comme on l'a

déjà mentionné, il peut aussi y avoir une bonne corrélation entre certains paramètres pour un bassin donné et aucune pour un autre bassin. La revue de littérature ne permet donc pas de rejeter les hypothèses énoncées précédemment, et celles-ci doivent être vérifiées par d'autres techniques puisque l'identification à priori des relations était adaptée au bassin de la Yamaska-Nord.

## CHAPITRE III

### RELATIONS ENTRE PARAMÈTRES: APPROCHE STATISTIQUE

Après avoir identifié à priori les relations pouvant exister entre les différents paramètres, on vérifie ici ces hypothèses par l'emploi de certaines techniques statistiques qui permettent une analyse objective des données. La connaissance de ces interrelations engendre en particulier une meilleure compréhension du comportement de ces paramètres en rivière.

On cherchera d'abord à brosser un portrait général des liens existant entre les paramètres aux différentes stations du bassin de la Yamaska-Nord, ceci afin de mettre en évidence les particularités reliées à leur localisation. On dispose pour ce faire d'une masse importante de données qui peuvent difficilement être analysées de manière séparée (paramètre par paramètre, station par station) si l'on désire décrire de façon globale les possibilités de relation. C'est pourquoi on utilise ici des méthodes multivariées, permettant de prendre en compte l'ensemble des données et d'en arriver à une perception globale du comportement des paramètres aux

différents sites d'échantillonnage. Les deux techniques employées, l'analyse factorielle de correspondance (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.) sont complémentaires et particulièrement adaptées à un tel traitement des données.

En second lieu, on établira par des calculs de corrélation, quelles sont les relations (linéaires) qui existent entre les paramètres, et ce à chacune des stations, et on les comparera aux relations potentielles précédemment identifiées (section 2.3), ce qui constituera la base de l'interprétation. Enfin, on cherchera à faire ressortir l'influence des conditions hydrologiques et de la localisation des stations.

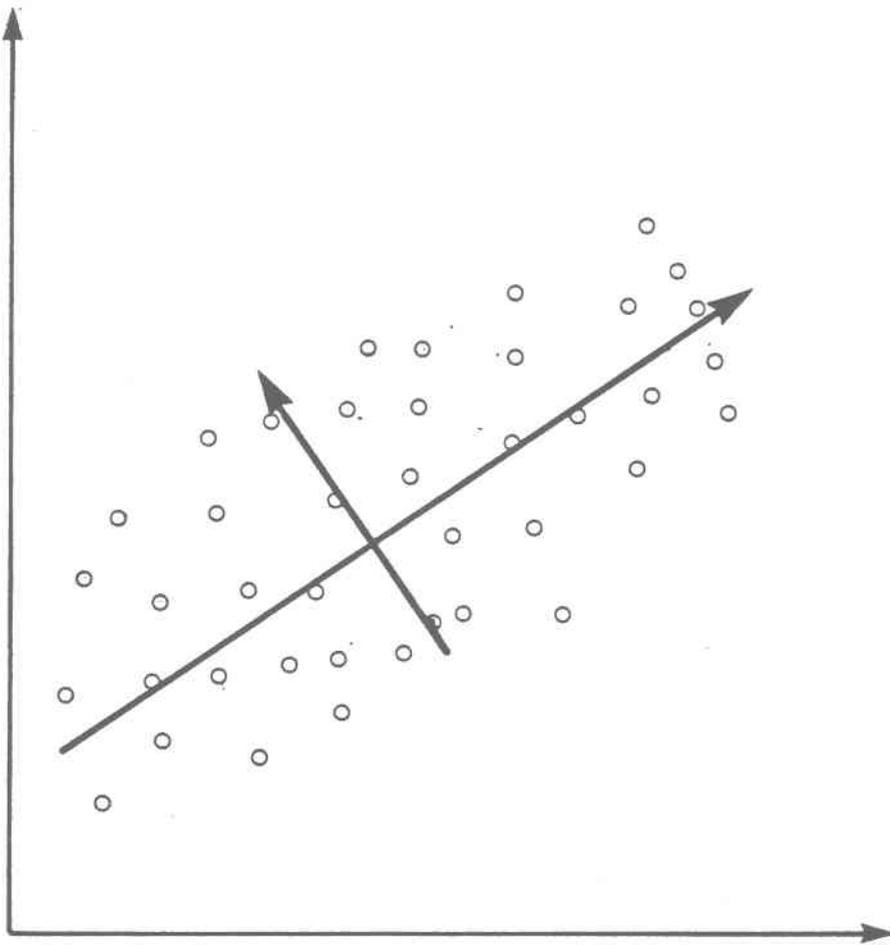
### 3.1 Analyse factorielle de correspondance et classification ascendante hiérarchique appliquées à l'identification des relations entre paramètres

L'analyse factorielle des correspondances (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.) ont été appliquées à un tableau de données recueillies durant les mois d'avril 1975 à octobre 1976, aux stations 101, 103, 105 et 210. Dans ce qui suit, on décrit brièvement les principales caractéristiques et l'esprit général des méthodes employées (une présentation plus détaillée est effectuée à l'annexe A) ainsi que la composition du tableau de données auquel les méthodes ont été appliquées. On présente ensuite les résultats obtenus par l'A.F.C. et la C.A.H., c'est-à-dire le regroupement des paramètres en classes. On obtient ainsi un aperçu global de leur comportement et on peut en déduire des relations probables entre paramètres.

### 3.1.1 Description sommaire des méthodes employées

L'analyse factorielle de correspondance est une technique développée par Benzecri (1973), permettant la description globale de grands tableaux de données et l'identification de similitudes de comportement pour les paramètres, les observations ou encore les stations. Les tableaux sont constitués de  $n$  colonnes et  $p$  lignes, correspondant par exemple à  $p$  observations de  $n$  paramètres. A chaque paramètre est associé un vecteur comprenant  $p$  observations de ce paramètre. Ce vecteur peut être représenté par un point dans l'espace à  $p$  dimensions des observations, la coordonnée sur l'axe  $p$  étant égale à la valeur mesurée lors de l'observation  $p$ . On peut de la même façon représenter les points (vecteurs) observations dans l'espace des  $n$  paramètres. Le nombre élevé de dimensions de l'espace des observations ou des paramètres ne permet pas la visualisation des nuages de points qui y sont représentés.

L'analyse factorielle de correspondances permet la représentation d'un nuage de points dans un espace de dimensions réduites contenant l'essentiel de l'information. Elle est en fait une analyse en composantes principales effectuée sur des données transformées et c'est cette transformation qui lui confère des propriétés particulières. Cette technique, dont Lebart et Fénélon (1973) présentent plusieurs exemples d'application, consiste d'abord en la recherche des axes principaux décrivant le mieux le nuage de points (figure 3.1). On calcule ensuite les coordonnées des points dans le nouveau système d'axes. Ce système étant mieux ajusté au nuage de points que les axes originaux, on peut utiliser un nombre réduit d'axes et obtenir tout de même une très bonne représentation des points. Il est possible d'observer les similitudes de comportement puisque des vecteurs aux composantes



**Figure 3.1 . Exemple bidimensionnel d'axes ajustant bien un nuage de points .**

proportionnelles (comportement similaire) sont représentés par des points confondus, à cause des transformations mathématiques qui ont été effectuées sur le tableau initial. La proximité de points paramètres dans cet espace suggère donc une relation directe entre les paramètres, alors que des points opposés peuvent signifier plutôt une relation inverse. Comme il existe une correspondance entre les représentations dans l'espace des observations et celui des paramètres, on peut aussi obtenir une représentation simultanée des deux nuages, ce qui permet de caractériser des groupes d'observations par des paramètres et vice versa.

En pratique il est important d'effectuer le regroupement des points paramètres ou des points observations en classes de comportement semblable, ce qui peut être effectué à partir de la projection des points du nuage dans le plan des deux premiers axes principaux. Cette méthode présente deux inconvénients:

- le regroupement est subjectif puisqu'effectué visuellement;
- il est partiel puisqu'on ne tient compte que des projections des points sur deux axes, qui, même s'ils expliquent une bonne partie de la dispersion globale, ne représentent pas l'ensemble du phénomène étudié.

C'est pourquoi il est préférable d'effectuer le regroupement par une méthode qui pallie ces deux difficultés. On utilise ici la classification ascendante hiérarchique qui considère la projection des points sur un nombre fixé, aussi grand que désiré, d'axes principaux du nuage et l'on calcule la distance euclidienne entre toutes les paires possibles de points (observations ou paramètres selon le cas). Cette distance est plus représentative puisqu'elle tient compte d'un nombre d'axes principaux aussi grand que désiré. La clas-

sification faite à partir de ces distances est objective puisqu'elle utilise un critère d'agrégation qui sera ici la maximisation du moment centré d'ordre 2 (variance) de la partition. Jambu (1972) s'est intéressé particulièrement à l'interprétation mutuelle des résultats fournis par l'A.F.C. et ceux de la C.A.H. qui sont en effet complémentaires. Le programme utilisé ici pour procéder à la C.A.H. est d'ailleurs celui de Jambu (1974), alors que celui de l'A.F.C. a été adapté par des chercheurs de l'INRS-Eau (Lachance et Boucher, 1979). On obtient par la C.A.H. une hiérarchie de classes, dont l'examen donne un aperçu des relations existant entre les paramètres ou les observations. Cependant, il faut noter que ces classes sont constituées à partir d'un nombre limité d'axes factoriels et ne représentent pas exactement la réalité. Il faut donc être prudent avec les résultats obtenus pour les paramètres dont la variabilité est peu expliquée par les axes choisis. La C.A.H. permet aussi d'expliquer les classes de paramètres (observations) en fonction des observations (paramètres).

### 3.1.2 Tableau de départ

L'application de l'A.F.C. exige un tableau de départ complet. Les valeurs manquantes peuvent être reconstituées par différentes méthodes, mais on risque d'introduire des biais dans l'analyse lorsque trop de données sont fictives. Aussi, afin d'utiliser le maximum d'information disponible, on n'a traité que les paramètres pour lesquels peu de données manquaient. On n'a donc pas inclus dans le tableau de départ, l'azote et le carbone organique, les phaeopigments ainsi que les données relatives à la station 100 (tableau 1.6). Les paramètres suivants ont été analysés par l'A.F.C. et la C.A.H.:

- la silice
- l'azote ammoniacal
- les nitrites et nitrates
- le phosphore total soluble
- le carbone particulaire
- l'azote particulaire
- le phosphore particulaire
- la chlorophylle-a totale
- les solides en suspensions
- le potentiel de fertilité.

Les colonnes du tableau correspondent aux quatre groupes de dix ou neuf paramètres (1 groupe par station), soit trente-neuf colonnes, et les lignes aux soixante et cinq tournées d'échantillonnage qui s'échelonnent du 22 avril 1975 au 26 octobre 1976, l'échantillonnage n'ayant débuté qu'à la fin d'avril à certaines stations. On a choisi de considérer le tableau sous cette forme puisqu'on cherche à mettre en évidence les relations entre paramètres à chacune des stations. On a aussi utilisé comme variables supplémentaires le débit et la température mesurés à la station 103 (Shefford Vale), car ces paramètres jouent un rôle majeur dans la variabilité des concentrations de certains paramètres. Le tableau 3.1 présente les codes utilisés pour l'identification des paramètres. On décrit à l'annexe B la façon dont ont été reconstituées les valeurs manquant au tableau.

### 3.1.3 Axes factoriels

L'analyse factorielle des correspondances a été appliquée au tableau décrit précédemment. Les deux premiers axes principaux expliquent 48% de la variabilité du nuage de points, et après six axes la variabilité expliquée atteint un palier de 82.1%, les axes suivants expliquant chacun peu de variabilité. On a donc appliqué la C.A.H. en utilisant les coordonnées sur les

TABLEAU 3.1 Codes utilisés pour l'identification  
des paramètres dans l'A.F.C. et la C.A.H.

PARAMÈTRE	CODE UTILISÉ*
Silice	SI
Azote ammoniacal	NH
Nitrites + Nitrates	NO
Phosphore soluble total	PT
Carbone particulaire	CP
Azote particulaire	NP
Phosphore particulaire	PP
Chlorophylle totale	CH
Solides en suspension	SS
Potentiel de fertilité	PF

\* Ces codes sont précédés de celui de la station:

1 pour station 101

3 pour station 103

5 pour station 105

0 pour station 210

ainsi ISI est le paramètre silice mesuré à la station 101.

six premiers axes seulement. Le tableau 3.2 indique les contributions relatives cumulées de chacun des paramètres en considérant les six premiers axes principaux. Cette contribution, définie à l'annexe A, est un indice de la qualité de la représentation des paramètres. La plupart des paramètres sont bien représentés par les six premiers axes (contribution relative cumulée  $\geq 60\%$ ) mais ce n'est pas le cas du phosphore total soluble (PT) aux quatre stations, des solides en suspension (SS) aux stations 101, 105 et 210, de la chlorophylle (CH) aux stations 101 et 103 et du phosphore particulaire (PP) à la station 101, ce qui indique que leur comportement est particulier par rapport à l'ensemble des paramètres. Les similitudes observées en considérant les six premiers axes peuvent ne plus exister lorsqu'on tient compte d'un plus grand nombre d'axes, dans le cas des paramètres plus ou moins bien représentés.

#### 3.1.4 Regroupement des paramètres en classes (C.A.H.)

On s'intéresse ici au regroupement des paramètres en classes afin d'identifier ceux qui peuvent être interreliés. L'examen de la représentation graphique des points dans les plans des premiers axes permet une certaine classification des paramètres, mais celle-ci risque d'être trop subjective et partielle. C'est pourquoi on a utilisé la C.A.H. qui tient compte des coordonnées sur les six premiers axes principaux (82% de la variabilité totale).

La C.A.H. fournit une hiérarchie de classes. Le nombre de classes à considérer est fonction des différences existant entre les classes et de leur stabilité; si on considère un nombre trop grand de classes il peut être difficile de donner un sens physique à la séparation en sous-clas-

TABLEAU 3.2 Qualité de la représentation des paramètres:  
contribution relative cumulée en considérant  
les six premiers axes principaux.

PARAMÈTRE	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION (%)
1SI	86.5
1NH	81.8
1NO	62.3
1PT*	43.3
1CP	80.6
1NP	89.9
1PP*	39.4
1CH*	30.3
1SS*	30.2
1PF	82.9

PARAMÈTRE	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION (%)
3SI	82.3
3NH	79.1
3NO	73.2
3PT*	44.7
3CP	73.6
3NP	97.1
3PP	79.0
3CH*	53.2
3SS	94.1

PARAMÈTRE	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION (%)
5SI	83.2
5NH	80.9
5NO	80.5
5PT*	37.4
5CP	76.8
5NP	90.8
5PP	66.1
5CH	66.2
5SS*	52.8
5PF	90.7

PARAMÈTRE	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION (%)
0SI	82.5
0NH	81.1
0NO	82.1
0PT*	38.4
0CP	85.5
0NP	96.3
0PP	63.6
0CH	70.5
0SS*	42.2
0PF	93.7

\* Contribution relative cumulée < 60%.

ses, alors que dans le cas inverse, l'analyse reste globale et peut ne pas être suffisamment discriminante.

En ce qui nous concerne ici, en considérant quatre classes on explique 61% de la variabilité sur les six premiers axes. Si l'on conserve un nombre plus élevé de classes, le regroupement des paramètres est moins facilement interprétable. La figure 3.2 représente l'arbre hiérarchique obtenu et le tableau 3.3 décrit la composition de chacun des groupes.

Le premier niveau, qui sépare nettement les classes 74 et 73 des classes 70 et 68 (figure 3.2), oppose d'une part les paramètres sous forme particulaire (CP, NP, PP, CH, SS) mesurés aux stations 101, 103 et 105 et d'autre part ceux de la station 210 ainsi que les paramètres sous forme soluble (NO, NH, PF\*, SI, PT) mesurés à toutes les stations à l'exception du phosphore total (PT) aux stations 101 et 103 qui se retrouve dans la classe 74 au lieu de 68. Ce paramètre étant d'ailleurs mal représenté par l'A.F.C., son appartenance à une classe donnée n'est pas forcément très significative.

Le second niveau sépare les paramètres sous forme particulaire à la station 210 (classe 70) de ceux sous forme soluble à toutes les stations (classe 68).

Le troisième niveau oppose les classes 74 et 73 et sépare les paramètres sous forme particulaire mesurés à la station 101, le phosphore particulaire à la station 103 et les solides en suspension aux stations 103 et 105 (classe 73), du carbone, de l'azote particulaire et de la

---

\* Le potentiel de fertilité étant en fait un indice de la disponibilité des substances nutritives est considéré ici comme un paramètre qui se présente sous forme soluble, bien que ce ne soit pas tout à fait exact.

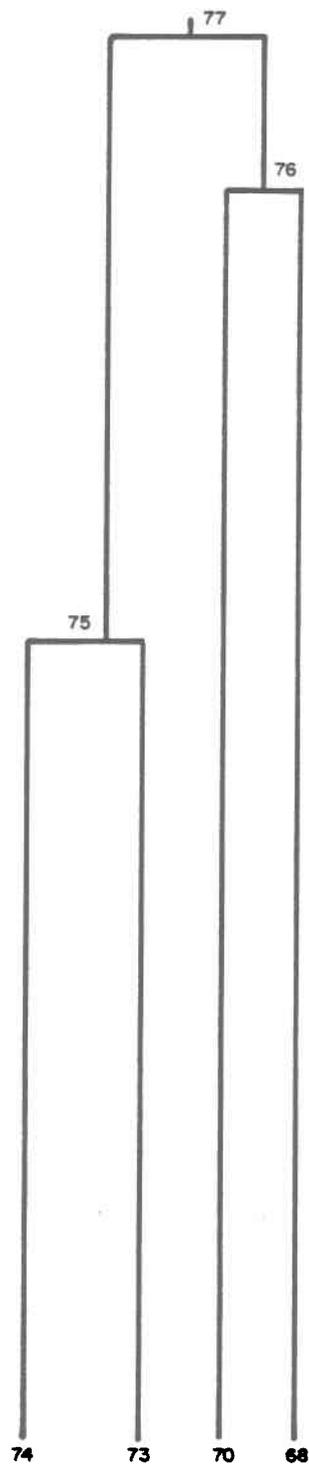


Figure 3.2. C.A.H. sur les points paramètres : arbre hiérarchique obtenu avec 4 classes .

TABLEAU 3.3 C.A.H. sur les points paramètres:  
composition des classes \*

CLASSE 74	CLASSE 73	CLASSE 70	CLASSE 68
1PT	1CP	0CP	1SI
3PT	1NP	0NP	1NH
3CP	1PP	0PP	1NO
3NP	1CH	0CH	1PF
3CH	1SS	0SS	3SI
5CP	3PP		3NH
5NP	3SS		3NO
5PP	5SS		5SI
5CH			5NH
			5NO
			5PT
			5PF
			0SI
			0NH
			0NO
			0PT
			0PF

\* Les classes formées sont numérotées de  $j + 1$  à  $2(j - 1)$  pour une hiérarchie construite sur  $j$  éléments (Jambu, 1976).

chlorophylle mesurés aux stations 103 et 105 et du phosphore particulaire à la station 105 (classe 74). Le phosphore total soluble des stations 101 et 103 appartient aussi à la classe 73.

### 3.1.5 Contribution des axes factoriels à la séparation des classes

Le tableau 3.4 présente les contributions relatives des axes factoriels à la variabilité expliquée par chacune des classes. On décrit à l'annexe A comment ces contributions peuvent être calculées. Ces contributions indiquent les axes principaux qui contribuent fortement à la division des classes. Plus la valeur se rapproche de 100, plus la séparation entre classes se fait dans la direction de l'axe. Connaissant de plus l'importance de chaque paramètre dans la définition des axes principaux (tableau 3.5) et le signe de leur contribution (signe de leur coordonnée sur l'axe), il est alors possible de comprendre comment s'est effectué le regroupement des paramètres en classes.

Ainsi la classe 77 (premier niveau) se divise en 76 et 75 dans la direction des axes 2 et 1. En consultant le tableau 3.5 et la figure 3.3 qui est la représentation des points paramètres dans le plan formé par les axes 1 et 2, on constate que l'axe 2 oppose les formes particulières de la station 210 (OCP, ONP, OPP, OCH, OSS) à certaines formes particulières des stations 101 et 103 et que l'axe 1 sépare les formes solubles (PF surtout) des formes particulières (NP surtout) des stations 101, 103 et 105. On a aussi représenté à la figure 3.3 les centres de gravité des classes 77, 76 et 75 et on les a rejoint par des droites.

La classe 76 (deuxième niveau) se divise en 70 et 68 dans la di-

TABLEAU 3.4 Contribution relative (%) des axes à la variabilité expliquée par chacune des classes.

Axes Classes	1	2	3	4	5	6
77	24.0	74.4	0.8	0.4	0.1	0.2
76	69.4	20.1	2.4	7.2	0.5	0.4
75	14.8	6.2	67.1	0.1	11.6	0.1

TABLEAU 3.5 Paramètres contribuant fortement à la définition des axes factoriels.

Axe 1	Contributions positives: Contributions négatives:	OPF***, 5PF**, 1PF**, 0Si*, 3SS* 5NP*, 3NP*, 1NP*
Axe 2	Contributions positives: Contributions négatives:	1CP*, 1NP*, 3SS*, 3PP* 0NP***, 0CP***, 0CH*, 0PP*
Axe 3	Contributions positives: Contributions négatives:	5NP***, 5PP**, 5CP* 1NP***, 1CP*, 0NP*, 3SS*

\*\*\* contributions relatives  $\geq 20\%$

\*\* 20% > contributions relatives  $\geq 10\%$

\* 10% > contributions relatives  $> 3\%$  .

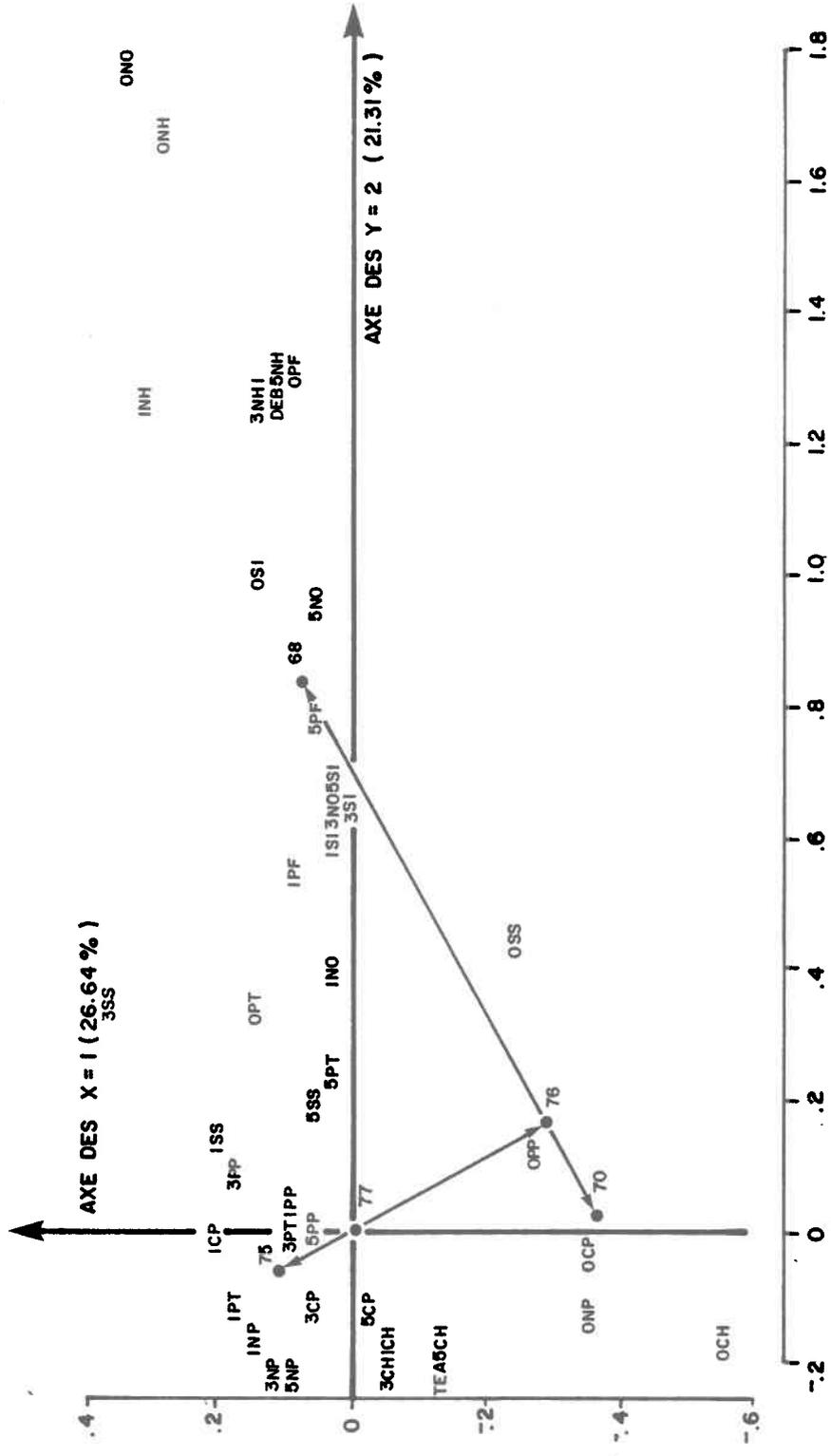


Figure 3.3 . Représentation des points paramètres dans le plan formé par les axes 1 et 2 .

rection des axes 1 et 2. Les formes solubles (classe 68) ont une contribution fortement positive sur l'axe 1 alors que celle des formes particulières de la station 210 (classe 70) est plus faible. Sur l'axe deux c'est l'inverse, les paramètres de la classe 70 ont une forte contribution négative alors que ceux de la classe 68 sont faiblement positifs (figure 3.3).

La classe 75 (troisième niveau) se divise en 74 et 73 dans la direction des axes 3 et 1. L'axe 3 (figure 3.4) sépare les formes particulières des stations 105 et 103 (sauf 3SS) de celles de la station 101 tandis que l'axe 1 sépare les solides en suspension des stations 103 et 105 et le phosphore particulière de la station 103 des autres paramètres de forme particulière de ces stations.

Cet examen fait bien apparaître le rôle joué par les trois premiers axes factoriels qui rendent compte de l'essentiel de la variabilité.

### 3.1.6 Contribution des points observations à la formation des classes

Il est intéressant de connaître les observations (dates d'échantillonnage) qui caractérisent chaque classe de paramètres. Les observations qui contribuent fortement à éloigner le centre de gravité d'une classe du centre du nuage, sont celles qui sont discriminantes pour la classe. En effet, plus une classe est éloignée du centre du nuage, plus les paramètres qui la constituent sont différents des autres. Le tableau 3.6 présente les observations qui ont les contributions relatives les plus importantes pour chacune des classes ainsi que la distance du centre de gravité des classes au centre du nuage ( $\rho^2$ ). Les contributions fortement positives (négatives)

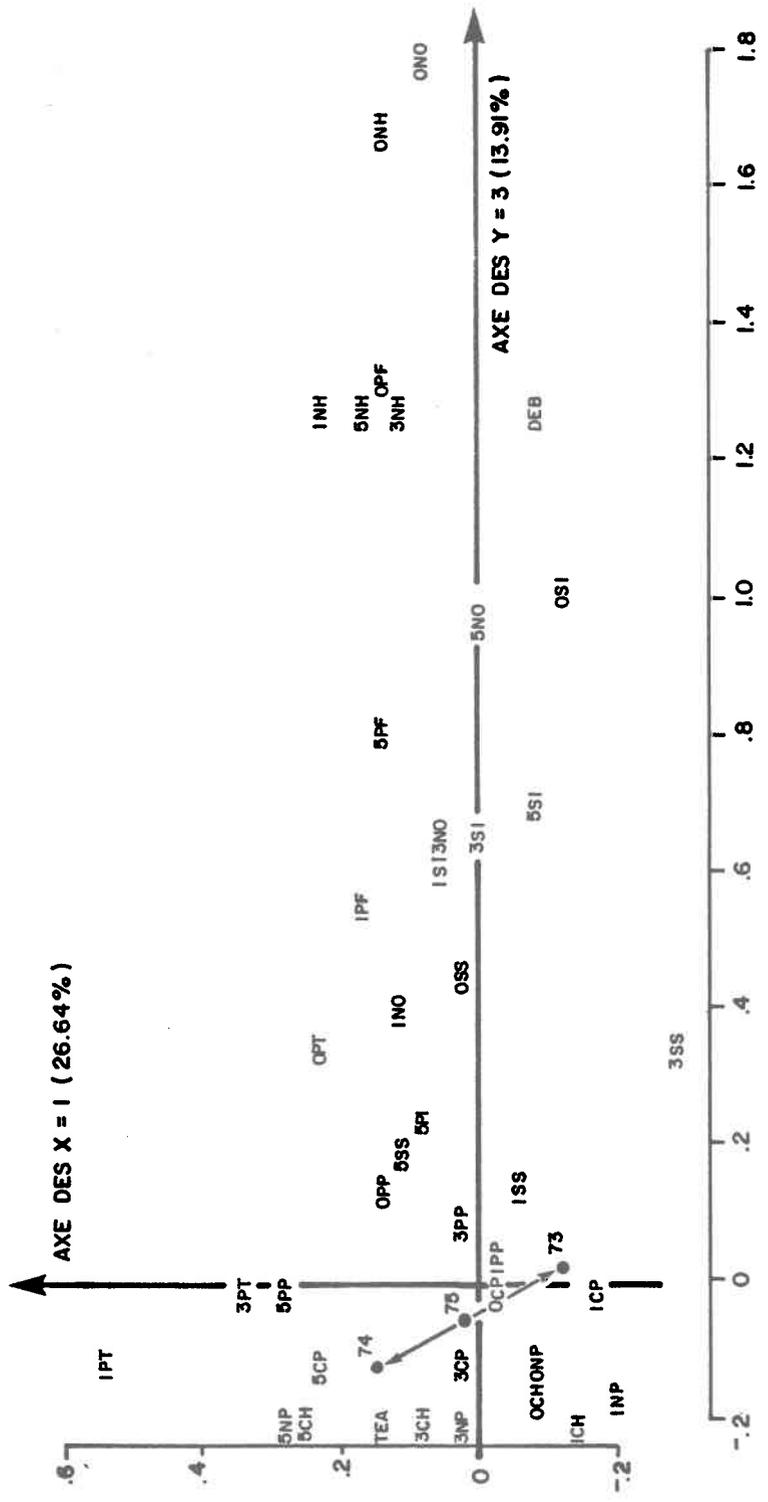


Figure 3.4. Représentation des points paramètres dans le plan formé par les axes 1 et 3.

TABLEAU 3.6 Contribution relatives des observations\*  
à la distance des classes du centre du  
nuage.

Classe $\rho^2$	76	75	74	73	70	68
Observations	.11	.01	.04	.05	.14	.78
7				.05		
12			.09			
26				.21		
30	.05	-.05				
31			-.05	.09		
32						.19
33						.17
34						.15
36						.13
39	.08	-.08			.05	
48				-.05		
50	.05	-.05	-.08		.07	
53	.06	-.06	-.05		.09	
55	.07	-.07			.10	
60			-.05			

\* La correspondance entre les numéros d'observations et les dates d'échantillonnage est donnée au tableau 3.7.

indiquent que l'ensemble des paramètres de la classe prennent des valeurs relativement élevées (faibles) à ces dates. La représentation simultanée, dans le plan des premiers axes factoriels, des points observations et des points paramètres (figure 3.5) permet aussi de caractériser des classes par des observations, puisqu'un groupe de points paramètres s'explique, en gros, par les points observations qui lui sont proches (Jambu, 1976). Le tableau 3.7 donne la correspondance entre les numéros des observations et les dates d'échantillonnage.

#### Classes 68 et 70

Les paramètres qui constituent la classe 68 (paramètres sous forme soluble) ont un comportement très différent de celui des autres paramètres, puisque le centre de gravité de cette classe est assez éloigné du centre du nuage ( $\rho^2 = .78$ ). D'après le tableau 3.6, les concentrations de ces paramètres sont fortes aux dates d'échantillonnage correspondant aux observations numéros 32, 33, 34 et 36, soit les 2 et 23 février 1976 et le 9 et 23 mars de la même année qui sont des dates d'hiver et du début du printemps. L'examen de la figure 3.4 confirme le fait que les concentrations de P.F., de nitrates, d'azote ammoniacal et de silice sont élevées en hiver comparativement au reste de l'année, puisque la classe 68 est située à proximité des observations numéros 31, 32, 33, 34, 35, 36 et 37, qui correspondent à des dates d'échantillonnage allant du 20 janvier 1976 au 30 mars 1976. Les paramètres constituant la classe 70 (forme particulière, station 210) ont aussi un comportement assez particulier quoique cette classe soit moins éloignée du centre du nuage que la classe 68. Ces paramètres sont plus ou moins caractérisés, d'après le tableau 3.6, par les observations numéros 55, 53, 50 et 39, soit les dates du 17 et du 4 août



TABLEAU 3.7 Correspondance entre les numéros des observations et les dates d'échantillonnage.

OBSERVATION	DATE D'ÉCHAN- TILLONNAGE (1975)	OBSERVATION	DATE D'ÉCHAN- TILLONNAGE (1976)
1	22/4	31	20/1
2	12/5	32	2/2
3	20/5	33	23/2
4	26/5	34	9/3
5	2/6	35	15/3
6	9/6	36	22/3
7	16/6	37	30/3
8	23/6	38	6/4
9	1/7	39	12/4
10	7/7	40	20/4
11	14/7	41	6/5
12	22/7	42	11/5
13	30/7	43	18/5
14	4/8	44	25/5
15	11/8	45	2/6
16	18/8	46	7/6
17	25/8	47	14/6
18	1/9	48	21/6
19	8/9	49	5/7
20	15/9	50	14/7
21	22/9	51	20/7
22	29/9	52	28/7
23	7/10	53	4/8
24	13/10	54	9/8
25	20/10	55	17/8
26	27/10	56	25/8
27	3/11	57	31/8
28	10/11	58	8/9
29	24/11	59	15/9
30	8/12	60	23/9
		61	28/9
		62	28/9
		63	5/10
		64	13/10
		65	26/10

1976, du 14 juillet et du 12 avril 1976, dates auxquelles on retrouve, en consultant le tableau initial de données, des valeurs intermédiaires de carbone, d'azote et de phosphore particulaires, ainsi que de chlorophylle et de solides en suspension. On trouve par contre des concentrations relativement faibles de ces paramètres aux dates caractérisant la classe 68. La figure 3.4 montre de plus que les paramètres de la classe 70 sont situés près d'observations correspondant en majeure partie à la période d'activité biologique de 1976, alors que les concentrations de carbone, d'azote et de phosphore particulaires ainsi que celles de chlorophylle, étaient fort élevées à la station 210. Ceci est confirmé par l'examen des contributions de ces observations qui, bien qu'intervenant à un niveau moins fort que celles déjà énumérées, sont pour la plupart positives.

#### Classes 74 et 73

Les classes 74 et 73 (forme particulière, stations 101, 103 et 105) ont un profil moyen ( $\rho^2 = .04$  et  $.05$ ) et se distinguent moins nettement l'une de l'autre que les classes 70 et 68. D'après le tableau 3.6 l'observation 26 est assez caractéristique de la classe 73. A cette date, le 27 octobre 1975, on retrouve une concentration assez forte d'azote particulaire et une teneur intermédiaire en carbone particulaire à la station 101. Quant à la classe 74 elle se caractérise davantage par l'observation 12, soit le 22 juillet 1975 (crue d'été) date à laquelle les concentrations des paramètres de cette classe sont assez élevées. On remarque à la figure 3.4 que les paramètres de ces deux groupes sont situés près d'observations faites durant les étés 1975 et 1976. Ceci est particulièrement vrai pour la classe 74 (été 1975 surtout) alors qu'on remarque une tendance vers les observa-

tions d'hiver pour la classe 73. Ceci est confirmé par l'examen des contributions relatives intermédiaires.

### 3.1.7 Interprétation des classes obtenues

Le regroupement des paramètres en classes permet d'identifier des types de comportements particuliers. Ainsi, on remarque que les paramètres qui se présentent sous forme soluble se distinguent très nettement des autres et ceci à toutes les stations. D'après la section 3.1.6, ceci semble être dû au fait que leurs concentrations sont en général plus élevées en hiver que durant le reste de l'année, contrairement aux autres paramètres. Ceci confirme les travaux de Campbell *et al.* (1979). Le phosphore total soluble ne montre pas une tendance aussi marquée, peut-être parce qu'il est recyclé très rapidement et surtout parce qu'il ne limite pas la production primaire. Campbell *et al.* (1979) notent d'ailleurs que ce paramètre ne suit pas de cycle annuel évident. De toutes façons, le phosphore total est mal expliqué par les six premiers axes, et ceci à toutes les stations (tableau 3.2), ce qui est dû à un comportement particulier ou erratique par rapport à l'ensemble des paramètres.

On peut, par ailleurs, distinguer trois groupes parmi les paramètres qui se présentent sous forme particulière. Comme on l'a mentionné à la section précédente, les paramètres mesurés à la station 210 (classe 70) se comportent de façon particulière. Ceci n'a rien d'étonnant, cette station étant située à l'exutoire du lac Boivin (figure 1.3). Les fluctuations dues au débit y sont amorties par le lac, alors que les paramètres mesurés aux autres stations sont davantage influencés par les changements de débit, ces stations étant vraiment situées en rivière. De plus, dans un lac, la

production primaire peut être plus forte qu'en rivière<sup>†</sup>, les conditions physiques (débit turbulence) y étant plus favorables. Or, les paramètres particuliers, dont il est question ici, sont très influencés par ce mécanisme, qui tend à augmenter leurs concentrations en période d'activité biologique. Ceci contribue à différencier les formes particulières de la station 210 de celles des autres stations, particulièrement en été, ce qui se produit clairement en 1976.

Si l'on considère maintenant la séparation de la classe 75 en 74 et 73, on constate que les paramètres mesurés à la station 101 semblent se comporter un peu différemment de ceux des stations 103 et 105, à l'exception des solides en suspension aux stations 103 et 105 et du phosphore particulière à la station 103. Ceci est quelque peu surprenant. On se serait en effet attendu à ce que les paramètres se comportent de façon assez semblable aux stations 101 et 103, et de manière plus différente à la station 105, puisqu'il semble exister plus de similitudes entre les tronçons 100-101 et 101-103 qu'entre 101-103 et 103-105. Les tronçons 100-101 et 101-103 sont en effet des milieux lotiques alors que le tronçon 103-105 est plutôt un milieu lentique où la production primaire est favorisée. Le regroupement trouvé pourrait être attribuable à l'influence des rejets ponctuels de Waterloo qui pourrait s'étendre jusqu'à la station 101 en hiver. Il faut noter cependant que plusieurs des paramètres appartenant aux classes 73 et 74 (LPP, LSS, LCH, 3CH, 5SS) sont mal représentés par les six premiers axes que considère uniquement la C.A.H. Le regroupement en classes aurait pu être différent si on avait considéré un plus grand nombre d'axes, les axes non pris en compte contribuant à expliquer la variabilité de ces paramètres. On remarquera d'ailleurs que lorsqu'on introduit le débit et la

---

<sup>†</sup> surtout en ce qui concerne le phytoplancton.

température dans la classification (tableau 3.8), le classement de ces paramètres est différent ce qui indique une certaine instabilité.

On a porté en points supplémentaires le débit et la température mesurés à la station 103. Etant donné le mode de reconstitution utilisé (section 1.3.1), les fluctuations de débit sont les mêmes à toutes les stations sauf 210, puisque les débits sont proportionnels. Comme on l'a déjà mentionné, des vecteurs aux composantes proportionnelles sont représentés par des points confondus. Une seule mesure de débit était donc suffisante pour les stations de rivière. Quant aux changements de température, ils se suivent d'assez près à ces stations, mais pas à celle du lac Boivin. Ces points supplémentaires n'affectent pas la détermination des axes factoriels puisqu'ils ont un poids nul dans l'analyse (cf. annexe A). On remarque à la figure 3.3 que la classe 68 se situe près du débit dans le plan des deux premiers axes principaux, ce qui indique que les paramètres de cette classe (forme soluble) sont influencés de façon directe par les changements de débit.

Les centres de gravité des autres classes sont assez éloignés du débit, sans y être vraiment opposés, ce qui pourrait indiquer que les formes solubles sont plus en relation avec le débit que les formes particulières. On a aussi appliqué la C.A.H. aux points paramètres en incluant le débit et la température, et les classes obtenues indiquent que le débit se comporte de façon très différente des autres paramètres puisqu'il forme une classe complètement à part (figure 3.6, tableau 3.8). Ceci s'explique par le fait qu'il a un poids très fort dans la classification, comparativement aux autres paramètres.

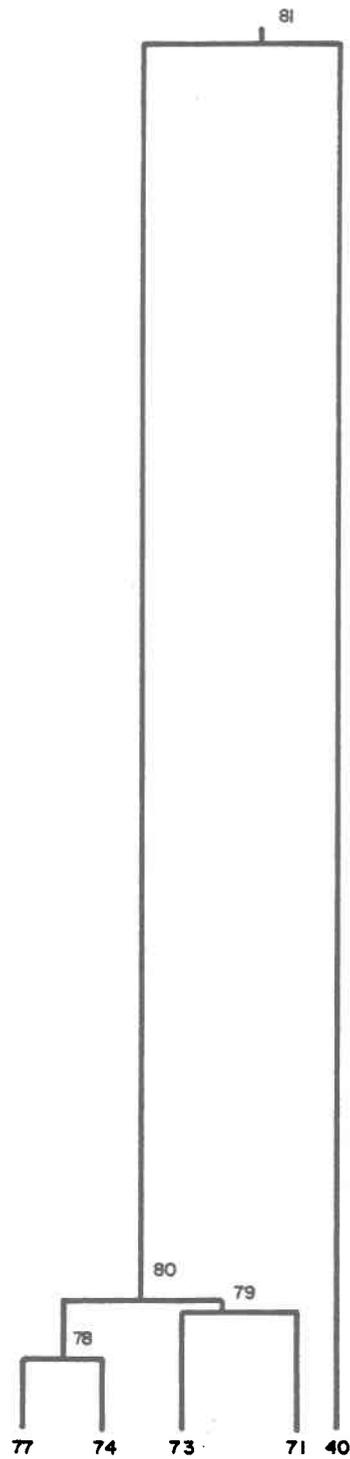


Figure 3.6 . Arbre hiérarchique obtenu en considérant 5 classes , débit et température inclus .

TABLEAU 3.8 C.A.H. sur les points paramètres incluant le débit et la température: composition des classes.

CLASSE 77	CLASSE 74	CLASSE 73	CLASSE 71	CLASSE 40
1CP	1PT	0CP	1SI	DEB*
1NP	3PT	0NP	1NH	
1PP	3CH	0PP	1NO	
1CH	5CP	0CH	1PF	
1SS	5NP	0SS	3SI	
3CP	5PP		3NH	
3NP	5CH		3NO	
3PP	TEA**		5SI	
3SS			5NH	
5SS			5NO	
			5PT	
			5PF	
			0SI	
			0NH	
			0NO	
			0PT	
			0PF	

\* DEB: débit

\*\* TEA: température.

Pour ce qui est de la température, la C.A.H. conduit au regroupement de ce paramètre avec 5CP, 5NP, 5CH, 3CH, 3PT, 1PT. Si on compare le tableau 3.8 au tableau 3.3 on remarquera que le classement est différent. Le carbone, l'azote et le phosphore particulaire ainsi que la chlorophylle à la station 105 semblent suivre davantage les changements de température qu'aux stations 101 et 103 (vitesse du courant ralentie d'où production primaire favorisée). Il est à noter que la chlorophylle à la station 103 est mal expliquée par les six premiers axes. Les paramètres mesurés à la station 210 ne peuvent suivre les changements de température observés à la station 103 puisque les fluctuations sont moins rapides à la station 210, à cause de l'inertie thermique de la masse d'eau du lac Boivin. On remarque à la figure 3.4 que les paramètres de forme soluble (classe 68) occupent des positions opposées à celle de la température dans le plan des axes 1 et 2, ce qui indique une relation inverse, donc des concentrations fortes en hiver et faibles en été. Le regroupement obtenu en incluant le débit et la température est cependant plus ou moins significatif puisque ces paramètres sont mal expliqués par les six premiers axes (43.7% et 38.8%), n'ayant pas influencés la détermination des axes puisqu'ils étaient portés en points supplémentaires.

### 3.1.8 Relations entre paramètres

L'analyse globale effectuée par l'A.F.C. et la C.A.H. met en évidence le comportement particulier des paramètres à la station 210, située à l'exutoire du lac Boivin, du moins en ce qui concerne ceux qui se présentent sous forme particulaire. Ceci est probablement dû au fait qu'il s'agit là d'un milieu lacustre où l'influence du débit est minimum et les conditions physiques particulièrement favorables à la production autotrophe.

Il existe des similitudes entre les comportements des paramètres qui se présentent sous forme soluble (silice, nitrates, azote ammoniacal, potentiel de fertilité) mesurés à toutes les stations, sauf en ce qui concerne le phosphore total soluble au sujet duquel on ne peut conclure, mais qui semble se comporter de façon différente des autres. Ces ressemblances paraissent dues au fait que dans le cas de ces paramètres on observe des concentrations faibles en été et fortes en hiver.

L'analyse factorielle de correspondance et la C.A.H. appliquées aux données des stations 101 à 210, indiquent de plus qu'il peut exister des liens entre les variations de concentration des paramètres sous forme soluble à tous les sites (sauf  $P_t$ ), ce qui est aussi le cas des paramètres de forme particulaire aux stations 101 et 210. Au site 103, le carbone, l'azote particulaire et la chlorophylle pourraient aussi être reliés entre eux, alors que le phosphore particulaire semble mieux suivre le comportement des solides en suspension. A la station 105, le carbone, l'azote, le phosphore particulaire et la chlorophylle pourraient être interreliés.

Rappelons cependant que l'on s'est limité à un niveau assez élevé dans la hiérarchie des classes et que la C.A.H. appliquée à un nombre important de paramètres (39) fait alors ressortir surtout les différences et les similitudes les plus importantes. De plus, le fait d'effectuer des rapprochements dans un espace à six dimensions seulement peut masquer des dissemblances plus fines qui apparaissent sur les axes dont on n'a pas tenu compte. Ceci est particulièrement vrai pour les paramètres qui sont mal représentés par les six premiers axes (section 3.1.3, tableau 3.2).

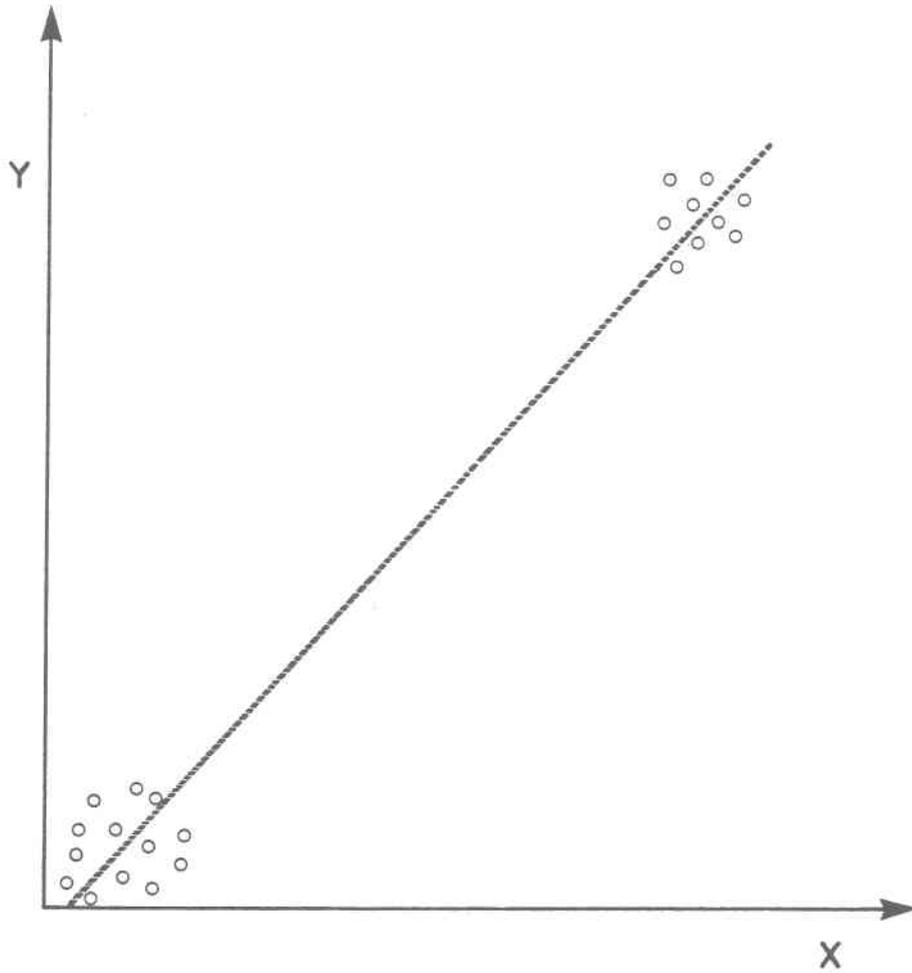
A la section suivante (3.2), on étudiera plus en détail ces re-

lations par des calculs de corrélation, et ce à chacune des stations, ce qui permettra de préciser les tendances dégagées ici.

### 3.2 Etude des relations entre paramètres par calculs de corrélation

On procède ici à l'identification des relations entre paramètres pris deux à deux, en calculant les coefficients de corrélation qui existent entre chaque paire. Les périodes considérées sont d'une part les années 1975 et 1976 soit de janvier ou avril 1975 selon les stations jusqu'à la fin d'octobre 1976, et d'autre part, les périodes d'activité biologique plus intense de 1975 et 1976. On a défini comme période d'activité biologique les mois de mai à octobre inclusivement. On a dû traiter de façon distincte les étés 1975 et 1976, car on trouvait peu de corrélation en les considérant ensemble. Ceci est sans doute dû aux conditions hydrologiques qui étaient très différentes. Dans ce qui suit, il sera question de la période appelée "années 1975-1976" et des deux périodes d'activité biologique nommées aussi "été 1975" et "été 1976".

Plusieurs difficultés sont inhérentes à la méthode employée. D'abord, par corrélation on ne tient compte que des relations linéaires. D'autres types de relations (logarithmique ou exponentielle par exemple) ne peuvent être envisagées qu'après transformation des variables, ce qui nécessite certaines études préliminaires concernant la distribution des variables en question. Compte tenu de l'envergure de ce travail, on s'est limité ici aux relations linéaires. Un autre point à considérer est la possibilité de l'existence de corrélations fictives; ce cas se produit en particulier lorsque les points expérimentaux se divisent en groupes distincts (figure 3.7). On peut aussi trouver des relations qui ont peu



**Figure 3.7. Exemple de corrélation fictive .**

de sens physique, et sont dues à des phénomènes qui n'ont aucun lien entre eux mais produisent des effets similaires. Des corrélations réelles peuvent aussi être détruites par quelques valeurs beaucoup trop fortes ou trop faibles, survenant à cause d'erreurs d'échantillonnage ou d'analyse. Un examen graphique des relations trouvées s'avère donc nécessaire avant d'en arriver à des conclusions définitives. Etant donné le nombre considérable de relations considérées ici, on se limitera à tenter de faire ressortir certaines tendances générales, permettant de mettre en évidence des traits caractéristiques du comportement des paramètres en rivière. On ne traitera donc que des relations les plus fortes, c'est-à-dire ayant des coefficients de corrélation élevés ( $r > 0.60$ ), afin d'éviter les relations présentant peu de sens physique. Un examen graphique a aussi été effectué afin d'éliminer les corrélations fictives.

Les figures 2.2 à 2.5 (chapitre II) nous rappellent que beaucoup de facteurs influencent les concentrations. Non seulement certains cycles sont complexes en plus d'être interreliés, mais il faut penser aussi aux changements de température, de conditions hydrologiques et à ce qui se produit sur le bassin. Les corrélations observées sont donc le produit de la combinaison des effets d'un ensemble de facteurs. On procédera ici à l'interprétation des résultats en examinant chacune des relations prévues lors de l'étude à priori (section 2.3.2), discutant des cas pour lesquels elles ont été observées et des conditions pouvant nuire à la relation. Il sera aussi question des relations observées mais non prévues à priori: on cherchera alors à expliquer leur existence. En dernier lieu on traitera de l'influence des conditions hydrologiques et de la localisation des stations sur les relations entre paramètres. On comparera alors les corrélations

trouvées durant les étés 1975 et 1976 et on s'intéressera à l'évolution des relations en fonction de l'emplacement des stations. Le tableau 3.9 présente, pour des fins de comparaison, les moyennes et écarts-type des concentrations de chacun des paramètres à chacune des stations, pour les deux périodes d'activité biologique. On y fera référence à l'occasion dans les textes qui suivent.

### 3.2.1 Relations prévues: cas des nitrates et de l'azote ammoniacal

On a vu à la section 2.3.2 que les nitrates et l'azote ammoniacal pouvaient être en relation directe entre eux puisqu'ils sont tous deux assimilés par les producteurs primaires, et aussi, en relation inverse avec la chlorophylle et l'azote particulaire. En fait, ces relations sont rarement observées (tableau 3.10). Les nitrates et la chlorophylle sont inversement corrélés à la station 210 durant les années 1975 et 1976 ( $r = -.59$ ) et la période d'activité biologique (P.A.B.) de 1976 ( $r = -.84$ ). Il n'existe par contre que de très faibles corrélations entre l'azote ammoniacal et la chlorophylle. Il n'est donc pas très surprenant que les nitrates soient en relation inverse avec l'azote particulaire à la station 210 durant ces mêmes périodes (années 1975-1976:  $r = -.68$ ; P.A.B. 1976:  $r = -.64$ ) et que l'azote ammoniacal et particulaire ne soient que très faiblement corrélés. Ces relations, dues à l'action des producteurs primaires, sont plus évidentes en milieu lacustre qu'en rivière, puisqu'en lac les conditions physiques favorisent la production autotrophe planctonique et que l'influence du débit et des apports allochtones de nitrates et d'azote ammoniacal est moindre qu'en eaux courantes. De plus, en lac la production est assurée en grande partie par le phytoplancton alors qu'en rivière que le périphyton (algues attachées) y joue souvent un rôle plus important, particulièrement dans les petites ri-

TABLEAU 3.9 Concentrations moyennes ( $\bar{x}$ ) et écart-types ( $\sigma$ ) pour les périodes d'activité biologique de 1975 et 1976 aux différentes stations.

PARAMÈTRES	PÉRIODE D'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE 1975						PÉRIODE D'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE 1976											
	101		103		105		210		100		101		103		105		210	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
SiO <sub>2</sub> (ppm)	3.2	1.3	3.1	1.6	2.6	1.6	1.1	1.0	3.3	1.7	3.3	0.9	3.2	1.1	2.9	1.2	2.1	1.2
C <sub>org</sub> (ppm)	9.2	3.1	9.9	3.3	9.8	3.2	9.4	3.0	12.2	3.8	10.8	3.9	9.9	2.6	10.1	2.7	10.8	3.1
N <sub>org</sub> (ppm)	0.46	0.20	0.51	0.17	0.49	0.18	0.49	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> (ppm)	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.02	0.02	0.80	0.64	0.04	0.02	0.05	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03
NO <sub>2-3</sub> (ppm)	0.42	0.24	0.30	0.20	0.16	0.16	0.05	0.10	0.32	0.22	0.37	0.18	0.31	0.14	0.22	0.18	0.09	0.08
PT (ppm)	0.28	0.23	0.16	0.08	0.08	0.04	0.08	0.05	0.54	0.41	0.07	0.04	0.06	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03
C <sub>part</sub> (ppb)	1189	499	878	291	968	353	713	244	3697	2177	984	563	911	474	933	543	1023	490
N <sub>part</sub> (ppb)	208	73	179	81	209	91	157	62	912	518	195	125	168	96	145	94	198	111
P <sub>part</sub> (ppb)	85	29	78	35	76	42	45	21	312	182	65	35	62	27	50	17	54	15
Chl <sub>a</sub> (ppb)	11.2	4.5	9.3	3.7	11.3	7.0	8.6	4.4	39	33	15.1	8.1	13.2	9.0	12.5	9.1	19.4	12.0
SS (ppm)	15.1	8.2	19.2	26.8	12.7	10.7	4.9	3.1	16.9	8.6	8.8	7.8	15.1	17.7	10.2	6.9	7.9	3.2
pp (ppb)	-	-	-	-	-	-	-	-	14.3	11.1	6.4	2.9	6.0	4.2	5.8	4.3	9.5	5.5
PF (ppm)	23.4	12.6	-	-	13.2	7.9	5.8	3.5	44.8	19.5	18.8	8.5	-	-	11.4	7.1	9.1	6.7

TABLEAU 3.10 Relations des nitrates et de l'azote ammoniacal entre eux et avec la chlorophylle et l'azote particulaire (coefficients de corrélation).

RELATIONS	Années 1975-1976					Période d'activité biologique 1975					Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	105	210	101	103	105	210	100	101	103	105	210	
NO <sub>3</sub> - Chl <sub>a</sub>			-.38 <sup>***</sup>		-.59 <sup>***</sup>	.46 <sup>**</sup>	-.45 <sup>*</sup>					.38 <sup>*</sup>		-.84 <sup>***</sup>	
NH <sub>4</sub> - Chl <sub>a</sub>	-.46 <sup>***</sup>	-.31 <sup>**</sup>	-.35 <sup>***</sup>		-.35 <sup>***</sup>										
NO <sub>3</sub> - N <sub>part</sub>		-.37 <sup>***</sup>	-.47 <sup>***</sup>		-.68 <sup>***</sup>				-.46 <sup>**</sup>					-.64 <sup>***</sup>	
NH <sub>4</sub> - N <sub>part</sub>	-.32 <sup>**</sup>	-.37 <sup>***</sup>	-.34 <sup>**</sup>		-.47 <sup>***</sup>					-.39 <sup>*</sup>				-.34 <sup>*</sup>	
NO <sub>3</sub> - NH <sub>4</sub>	.32 <sup>**</sup>	.59 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>		.69 <sup>***</sup>		.59 <sup>***</sup>	.38 <sup>*</sup>		.72 <sup>***</sup>	.70 <sup>***</sup>	.67 <sup>***</sup>		.43 <sup>*</sup>	

Coefficients de corrélation significativement différents de zéro au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$

\*\*  $\alpha = 0.01$

\*  $\alpha = 0.05$

vières où le courant est assez rapide (Brehmer *et al.*, 1969). Lors de la mesure de la chlorophylle et de l'azote particulaire, on ne tient compte du périphyton que lorsque celui-ci est arraché du fond par l'effet abrasif du courant, ce qui nuit aux relations  $\text{NO}_3 - \text{N}_{\text{part}}$ ,  $\text{NO}_3 - \text{Chlo}_a$ ,  $\text{NH}_4 - \text{N}_{\text{part}}$  et  $\text{NH}_4 - \text{Chlo}_a$ .

On n'observe aucune relation en 1975 entre les nitrates et la chlorophylle à la station 210 (exutoire du lac Boivin). En 1975, les concentrations de nitrates étaient très faibles à cet endroit, et il est possible qu'il y ait alors eu fixation d'azote atmosphérique par des algues bleues-vertes. En effet, selon Wetzel (1975a), il y a souvent une relation inverse entre le taux de fixation d'azote atmosphérique par les algues bleues-vertes et les concentrations d'azote inorganique dans les eaux lacustres. Ceci expliquerait l'absence de relation entre les nitrates et la chlorophylle. En 1976, les concentrations étaient plus élevées.

Durant la période globale 1975-1976, les nitrates et l'azote ammoniacal sont davantage corrélés à la station 210 qu'aux autres sites d'échantillonnage ( $r = .69$ ) ce qui indique probablement une plus grande similitude entre leurs cycles annuels en milieu lacustre, lesquels y sont plus évidents selon Campbell *et al.* (1979). Cette relation est aussi observée durant la période d'activité biologique de 1976 aux stations 103 et 105 ( $r = .70, .67$ ), ce qui est peut-être dû à l'influence de sources diffuses de nitrates et d'azote ammoniacal dans cette région. La corrélation trouvée à la station 100 durant la période d'activité biologique de 1976 n'a pas de sens physique évident. En effet, cette station est très influencée par les rejets ponctuels de la ville de Waterloo. Le tronçon Waterloo-Station 100 devrait donc être caractérisé par une production hétérotrophe plutôt qu'autotrophe. La rela-

tion ne devrait donc pas être due à l'assimilation de l'azote inorganique par les producteurs primaires, ni à la nitrification ( $\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_3$ ) qui causerait plutôt une relation inverse. L'examen graphique de la relation indique qu'elle est réelle. De plus, le coefficient de corrélation trouvé est très significativement différent de zéro.

### 3.2.2 Relations prévues entre l'azote inorganique et le potentiel de fertilité

On trouve de bonnes corrélations entre les nitrates et le potentiel de fertilité aux stations 101, 105 et 210 durant les années 1975-1976 et durant la période d'activité biologique de 1975 aux stations 101 et 105 (tableau 3.11). Le potentiel de fertilité n'a pas été mesuré à la station 103. Ces paramètres sont moins bien corrélés durant la période d'activité biologique de 1976, l'azote inorganique étant alors moins souvent limitant qu'en 1975. En effet, les apports de nitrates par ruissellement étaient plus importants en 1976, à cause des nombreuses pluies de l'été. Il n'y a que très peu de relations entre l'azote inorganique ( $\text{NO}_3$  ou  $\text{NH}_4$ ) et le P.F., à la station 100, probablement à cause de la présence de toxiques (métaux lourds) en provenance des usines de placage de Waterloo (Auger *et al.*, 1976). Ces substances inhiberaient en effet la croissance de l'algue utilisée pour le test de fertilité (*Selenastrum Capricornutum*).

La relation  $\text{NH}_4$ -PF est observée surtout aux stations 105 et 210 (années 1975-1976) où les cycles annuels de ces paramètres sont plus marquées qu'aux autres stations. Les nitrates semblent mieux corrélés avec le P.F. que l'azote ammoniacal, peut-être parce que l'azote inorganique est habituellement composé en majeure partie de nitrates.

TABLEAU 3.11 Relations des nitrates et de l'azote ammoniacal avec le potentiel de fertilité† (coefficients de corrélation).

RELATIONS	Années 1975-1976			Période d'activité biologique 1975			Période d'activité biologique 1976			
	101	105	210	101	105	210	100	101	105	210
NO <sub>3</sub> - PF	.72***	.70***	.76***	.87***	.68***			.49**	.59***	
NH <sub>4</sub> - PF	.46***	.70***	.76***		.48**		.43*		.63***	

Coefficients de corrélation significativement différents de 0 au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$

\*\*  $\alpha = 0.01$

\*  $\alpha = 0.05$

† non disponible à la station 103.

Durant les périodes d'activité biologique, on ne trouve aucune corrélation entre l'azote inorganique ( $\text{NO}_3$  ou  $\text{NH}_4$ ) et le potentiel de fertilité à la station 210. Ceci s'expliquerait par la méthode analytique employée pour la mesure du potentiel de fertilité. Les échantillons sont autoclavés sans filtration préalable. Lors de cette étape, il y a libération partielle de substances nutritives contenues dans les algues indigènes, comme le mentionnent d'ailleurs Miller *et al.* (1974). En été, les concentrations de nitrates et d'azote ammoniacal sont très faibles à la station 210 (tableau 3.9) et en conséquence on devrait théoriquement obtenir un potentiel de fertilité très faible. Si des substances nutritives ont été libérées par l'autoclave, le potentiel de fertilité sera plus élevé qu'il se doit. Il est possible de plus que le fait d'autoclaver les échantillons rende plus facilement utilisable, l'azote organique soluble qui y est contenu. En été les concentrations d'azote organique sont beaucoup plus importantes que celles d'azote inorganique à la station 210. On note d'ailleurs l'existence d'une corrélation entre le potentiel de fertilité et l'azote organique durant l'été 1975 à cet endroit ( $r = 0.65$ ). On ne dispose pas de données concernant ce dernier paramètre en 1976, à cause de problèmes analytiques.

Enfin, le phosphore total soluble n'est pas ou très peu corrélé avec le potentiel de fertilité, ce qui indique que c'est effectivement l'azote qui limite (chimiquement) le plus la production autotrophe dans la Yamaska-Nord.

### 3.2.3. Relations prévues entre le carbone, l'azote et le phosphore particuliers

On a vu à la section 2.3.2 que le carbone, l'azote et le phosphore

particulaires étaient des paramètres susceptibles de se comporter de façon analogue puisqu'il existe beaucoup de similitudes entre les mécanismes et, à un degré moindre, les sources qui les influencent; en effet le carbone, l'azote et le phosphore particuliers sont réunis dans les organismes morts ou vivants. Dans l'ensemble, ces paramètres sont effectivement assez bien corrélés entre eux (tableau 3.12), et dans tous les cas les coefficients de corrélation sont significativement différents de zéro au niveau 1%. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du carbone et de l'azote particuliers pour lesquels les coefficients sont élevées quelle que soit la période ou la station considérée. A la station 100, la relation est surtout due à l'influence des rejets ponctuels de Waterloo. Les relations  $N_{part} - P_{part}$  et  $C_{part} - P_{part}$ , à ce site, s'expliquent aussi de la même manière.

Le phosphore particulier est par contre moins bien corrélé avec le carbone et l'azote. Ces derniers sont essentiellement de nature organique alors qu'une partie du phosphore est inorganique et associée à l'érosion, ce qui peut expliquer que ce paramètre se comporte un peu différemment.

En général les corrélations sont plus faibles aux stations 103 et 210 qu'aux autres sites d'échantillonnage. Le bassin immédiat du tronçon 101-103 semble assez propice à l'érosion, les pentes y sont d'ailleurs plutôt fortes. La faiblesse de la relation à la station 210 (milieu lacustre) est peut-être due au fait que le phosphore organique est plus rapidement solubilisé (minéralisé) que l'azote et le carbone. Il est peu probable que la présence de phosphore particulier inorganique diminue l'intensité de la relation dans ce cas, puisqu'en milieu lacustre la production de phosphore

TABLEAU 3.12 Relations entre le carbone, l'azote et le phosphore particuliers  
(coefficients de corrélation).

RELATIONS	Années 1975-1976					Période d'activité biologique 1975					Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	210		101	103	105	210		100	101	103	105	210
N <sub>part</sub> -C <sub>part</sub>	.84 <sup>***</sup>	.89 <sup>***</sup>	.84 <sup>***</sup>	.85 <sup>***</sup>		.74 <sup>***</sup>	.89 <sup>***</sup>	.83 <sup>***</sup>	.78 <sup>***</sup>		.81 <sup>***</sup>	.88 <sup>***</sup>	.87 <sup>***</sup>	.82 <sup>***</sup>	.79 <sup>***</sup>
N <sub>part</sub> -P <sub>part</sub>	.75 <sup>***</sup>	.62 <sup>***</sup>	.74 <sup>***</sup>	.63 <sup>***</sup>		.72 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.70 <sup>***</sup>	.57 <sup>***</sup>		.64 <sup>***</sup>	.82 <sup>***</sup>	.63 <sup>***</sup>	.62 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>
C <sub>part</sub> -P <sub>part</sub>	.68 <sup>***</sup>	.62 <sup>***</sup>	.70 <sup>***</sup>	.67 <sup>***</sup>		.55 <sup>**</sup>	.47 <sup>**</sup>	.87 <sup>***</sup>	.56 <sup>***</sup>		.77 <sup>***</sup>	.76 <sup>***</sup>	.65 <sup>***</sup>	.67 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>

Coefficients de corrélation significativement différents de 0 au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$

\*\*  $\alpha = 0.01$

particulaire organique devrait être assez forte et que les berges du lac Boivin ne semblent pas facilement érodables.

#### 3.2.4 Relations prévues entre la chlorophylle, le carbone, l'azote et le phosphore particuliers

Plus le carbone, l'azote et le phosphore particuliers auront été produits par des organismes autotrophes (algues benthiques ou planctoniques) plus ces paramètres seront bien corrélés avec la chlorophylle-a totale. La présence de détritus ou de matière vivante non-associés à la chlorophylle diminuera l'intensité de ces relations.

Le tableau 3.13 indique les coefficients de corrélation qui ont été trouvés dans chacun des cas ainsi que leur niveau de signification. On remarque que les corrélations sont plus fortes en 1976 qu'en 1975. L'azote inorganique étant davantage disponible en 1976, la production autotrophe semble avoir été plus forte, particulièrement dans le lac Boivin (station 210). Le niveau moyen des teneurs en chlorophylle est plus élevé en 1976 (tableau 3.9), mais les concentrations fluctuent aussi davantage ( $\sigma$  élevé). Une production plus forte apparaît donc favorable à ces relations. Le cas de la station 101 est particulier en ce sens. On y note en effet une absence totale de corrélation en 1975. Ceci pourrait être dû à la présence, en amont de cette station, d'une petite retenue d'eau qui favorise la croissance abondante des macrophytes. Selon Hynes (1970), ces plantes retiennent le plancton et exercent donc une certaine filtration du carbone, de l'azote et du phosphore particulaire de nature phytoplanctonique. En 1975, à cause des débits faibles, il est possible que les macrophytes aient été plus abondants qu'en 1976 et aient, par effet de filtration, mis davantage en éviden-

TABLEAU 3.13 Relations du carbone, de l'azote et du phosphore particulaires avec la chlorophylle (coefficients de corrélation).

RELATIONS	Années 1975-1976				Période d'activité biologique 1975				Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	210	101	103	105	210	100	101	103	105	210
	C <sub>part</sub> -Chlo <sub>a</sub>	.58 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.76 <sup>***</sup>	.81 <sup>***</sup>		.54 <sup>**</sup>	.53 <sup>**</sup>	.67 <sup>***</sup>	.59 <sup>**</sup>	.79 <sup>***</sup>	.67 <sup>***</sup>	.80 <sup>***</sup>
N <sub>part</sub> -Chlo <sub>a</sub>	.74 <sup>***</sup>	.66 <sup>***</sup>	.63 <sup>***</sup>	.80 <sup>***</sup>		.53 <sup>**</sup>	.39 <sup>*</sup>	.54 <sup>**</sup>	.66 <sup>***</sup>	.83 <sup>***</sup>	.57 <sup>***</sup>	.65 <sup>***</sup>	.85 <sup>***</sup>
P <sub>part</sub> -Chlo <sub>a</sub>	.59 <sup>***</sup>	.54 <sup>***</sup>	.55 <sup>***</sup>	.63 <sup>***</sup>		.36 <sup>*</sup>	.56 <sup>**</sup>	.49 <sup>**</sup>		.89 <sup>***</sup>	.70 <sup>***</sup>	.64 <sup>***</sup>	.73 <sup>***</sup>

Coefficients de corrélation significativement différents de zéro au niveau:

- \*\*\*  $\alpha = 0.001$
- \*\*  $\alpha = 0.01$
- \*  $\alpha = 0.05$

ce la présence de carbone, d'azote et de phosphore particuliers non-associés à la chlorophylle, nuisant ainsi à leurs relations avec la chlorophylle.

Durant les années 1975-1976 des relations positives sont observées à toutes les stations et sont un peu plus fortes à la station 210 où les cycles annuels sont plus évidents. La relation  $P_{part}-Chlo_a$ , est généralement plus faible que les relations  $C_{part}-Chlo_a$  et  $N_{part}-Chlo_a$  ce qui peut probablement être attribué à la composante inorganique du phosphore particulaire (érosion, remise en suspension du phosphore inorganique des sédiments).

A la station 100, l'azote et le carbone particulaire sont corrélés à la chlorophylle, ce qui est assez surprenant, cette station étant très influencée par les rejets des égouts de Waterloo. Comme on l'a déjà mentionné, le tronçon Waterloo-Station 100 devrait être le siège d'une production beaucoup plus hétérotrophe qu'autotrophe. L'examen graphique des droites concernant ces relations indique que la corrélation assez forte qui existe entre  $N_{part}$  et  $Chlo_a$  à ce site est due à la présence de deux points particuliers qui correspondent à des concentrations très élevées de chlorophylle (figure 3.8). Ces fortes valeurs surviennent au début de septembre 1976. Sans ces points, les coefficients de corrélation seraient respectivement de 0.40 et 0.41 pour l'azote et le carbone particulaire. Il subsiste donc une faible relation, significativement différente de 0 au niveau 5%, et qui pourrait être due à l'influence du lac Waterloo en tant que source de chlorophylle et de solides de suspension organique. La figure 3.8 montre par ailleurs la grande dispersion des points expérimentaux. Cet exemple illustre bien l'importance de l'examen graphique des relations mises en évidence.

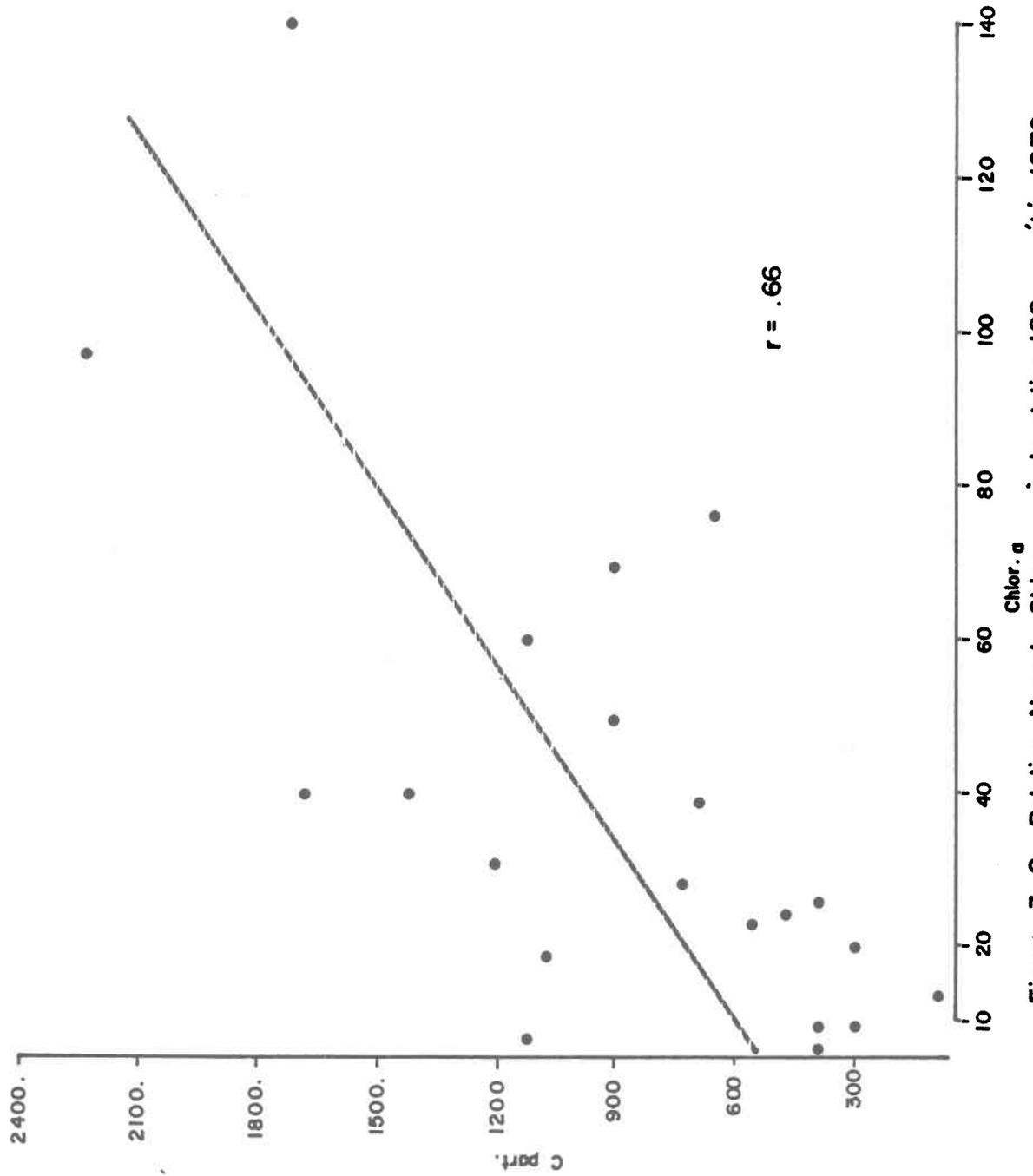


Figure 3.8. Relation N part.- Chlor.g , à la station 100 , été 1976.

### 3.2.5 Relations prévues entre les solides en suspension, le carbone l'azote et le phosphore particuliers

Il existe beaucoup de similitudes entre les mécanismes qui influencent le carbone, l'azote, le phosphore particuliers et les solides en suspension. Cependant une partie des solides en suspension est de nature inorganique comme c'est le cas pour le phosphore particulier, puisque l'érosion des terres et des berges des cours d'eau représente une source importante de ces solides.

L'azote et le carbone particuliers n'ont que très peu de relations avec les solides en suspension, les corrélations trouvées étant toujours faibles ou inexistantes (tableau 3.14). C'est à la station 100 que les coefficients de corrélation sont les plus élevés, ce qui est probablement dû à l'influence du lac Waterloo ou des égouts de la ville de Waterloo ou encore des deux à la fois. On constate, en comparant les concentrations moyennes de carbone particulier et de solides en suspension (tableau 3.9), que les teneurs en carbone sont beaucoup plus faibles que celles des solides en suspension, ce qui indique que ceux-ci sont surtout de nature inorganique dans la Yamaska-Nord, ce qui explique la faiblesse des coefficients de corrélation observés.

La relation  $P_{part}$ -S.S. est bonne en général ce qui est dû à la nature en partie inorganique du phosphore particulier. Par contre, on ne trouve que très peu de corrélation entre ces paramètres à la station 210. Selon Campbell *et al.* (1979) qui ont étudié les bilans massiques de ces paramètres pour le lac Boivin, ce dernier agit comme un piège de sédiments en suspension (sédimentation) et comme une source de matière organique par-

TABLEAU 3.14 Relations du carbone, de l'azote et du phosphore particulaires avec les solides en suspension (coefficients de corrélation).

RELATIONS	Années 1975-1976						Période d'activité biologique 1975						Période d'activité biologique 1976					
	101		103		105		210		101	103	105	210	100	101	103	105	210	
C <sub>part</sub> - SS	.43***	.23*	.40***		.56**	.55**	.62***											
N <sub>part</sub> - SS	.34**		.39***		.46*	.42*	.56**								.39*			
P <sub>part</sub> - SS	.70***	.72***	.67***	.45***	.76***	.74***	.78***	.53**	.61***	.75***	.64***	.38*						

Coefficients de corrélation significativement différents de zéro au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$

\*\*  $\alpha = 0.01$

\*  $\alpha = 0.05$

ticulaire. Le bilan de  $P_{part}$  montre un bilan légèrement négatif en 1975 (sédimentation) alors qu'en 1976 il est nettement positif, ce qui explique que la corrélation soit plus forte en 1975 qu'en 1976. En 1976 la production primaire était plus forte dans le lac Boivin comme l'indiquent les concentrations de chlorophylle. Les eaux étaient aussi moins stagnante qu'en 1975, ce qui favorisait moins la sédimentation. Le phosphore particulaire semble donc être de nature surtout organique à l'exutoire du lac Boivin. Il y a donc sédimentation de la matière particulaire inorganique. De plus, en été la matière organique est rapidement dégradée. La corrélation existant entre le phosphore particulaire et les solides en suspension en 1975 à la station 103 est fictive (fig. 3.9). Il ne subsiste aucune corrélation entre ces paramètres ( $r = 0.02$ ) si on ne tient pas compte des valeurs très fortes de solides en suspension qui surviennent lors de la crue d'automne (20 octobre) et de la petite crue d'été (22 juillet). Ceci est dû à la dispersion des points expérimentaux. Le phénomène inverse se produit en 1976, alors que des corrélations sont affaiblies par une valeur très forte de solides en suspension qui se produit le 17 août dans le cas de la station 103 et le 14 juillet à la station 101 (fig. 3.10), dates auxquelles on observe également des augmentations de débit dues aux pluies. Les coefficients de corrélation augmentent après élimination des valeurs extrêmes et deviennent respectivement:

- Station 103

$$\begin{array}{l} C_{part} - SS \quad r = .58^{**} \\ N_{part} - SS \quad r = .63^{***} \end{array}$$

- Station 101

$$\begin{array}{l} C_{part} - SS \quad r = .47^* \\ N_{part} - SS \quad r = .52^{**} \\ P_{part} - SS \quad r = .70^{***} \end{array}$$

Les pluies peuvent donc provoquer des apports massifs de solides

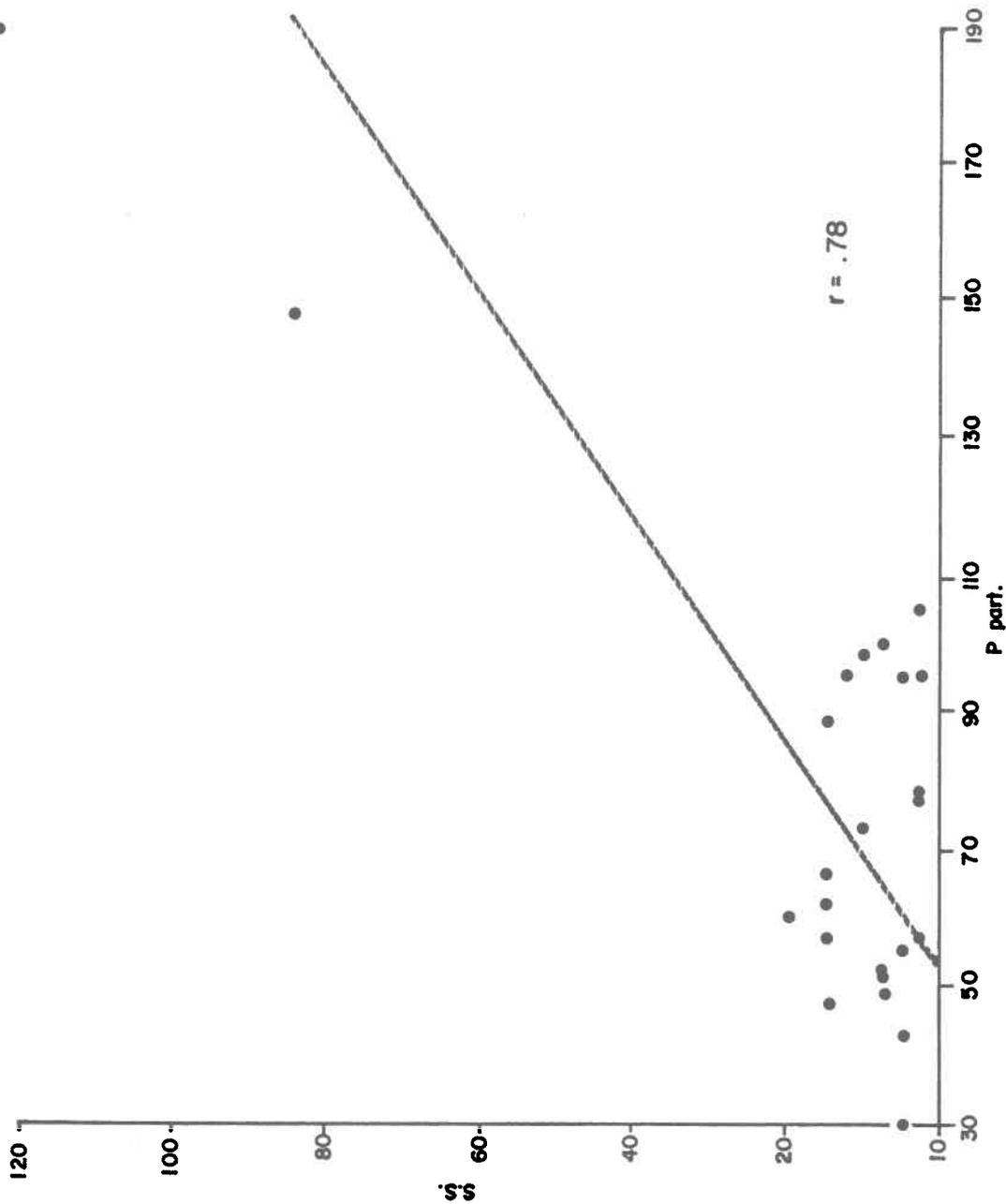


Figure 3.9. Relation P part.- SS. à la station 103 , été 1975 .

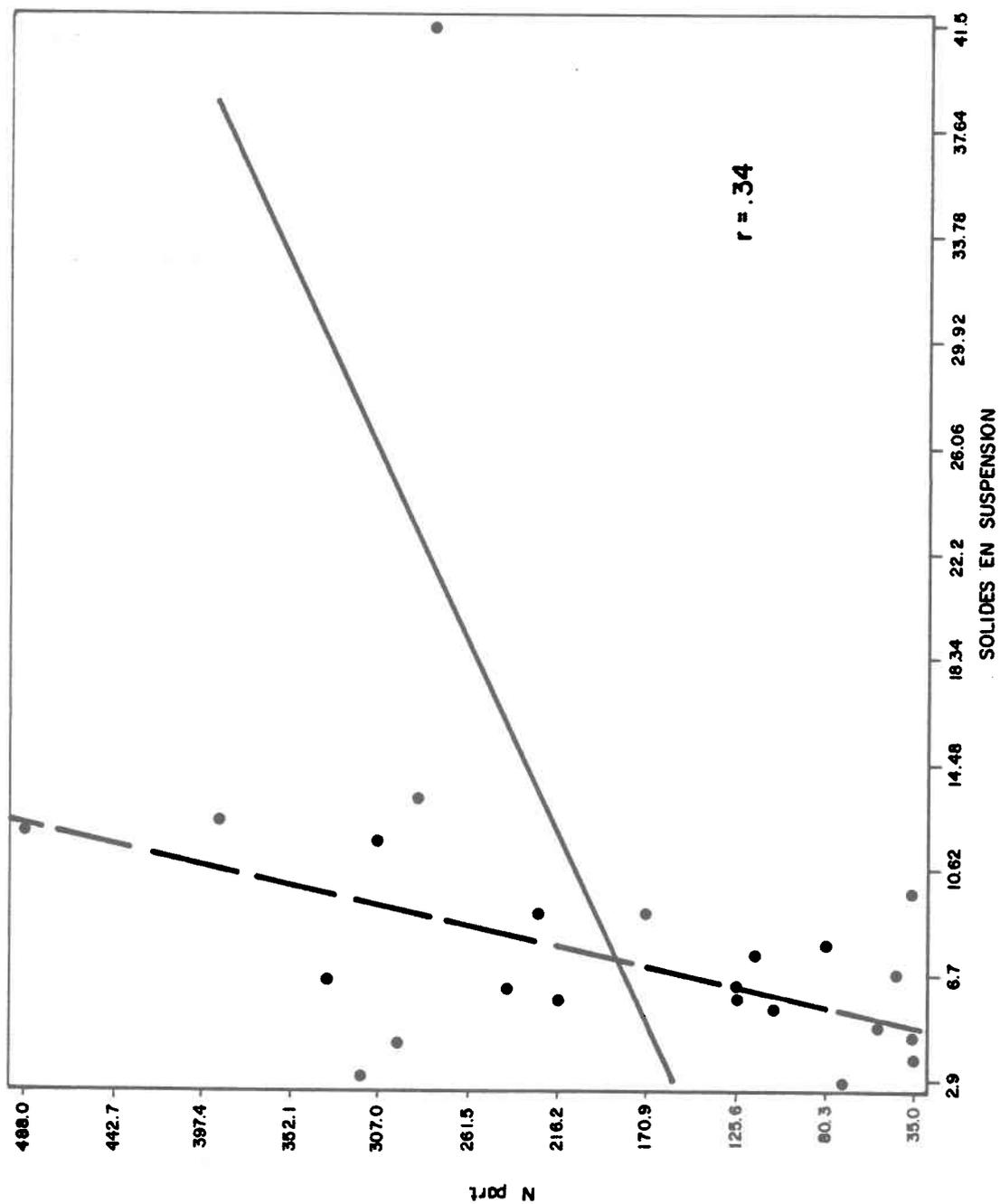


Figure 3.10 .Relation N part.- SS, station IOI, été 1976 .

en suspension inorganiques, ce qui contribue à affaiblir les relations

$C_{part} - SS$  et  $N_{part} - SS$ .

### 3.2.6 Relations prévues: cas du carbone et de l'azote organique

Lors de l'étude à priori des relations entre paramètres (section 2.3.2) on a émis l'hypothèse que l'azote et le carbone organique pourraient être en relation avec l'azote et le carbone particulaire, ainsi qu'avec la chlorophylle car une augmentation de la production primaire entraîne une augmentation de concentration (à débit constant) de la chlorophylle, de l'azote et du carbone particulaires et aussi une plus forte excrétion d'azote et de carbone organiques donc une augmentation de leurs concentrations. On croyait de plus trouver une relation entre l'azote et le carbone organique car plusieurs mécanismes semblables les influencent. En fait, toutes ces relations sont rarement observées (tableau 3.15). Il semble que trop de mécanismes ont une action sur les concentrations d'azote et de carbone organiques, ce qui masque les relations qu'ils pourraient avoir entre eux ou avec d'autres paramètres. Ainsi il y a très peu de corrélation entre le carbone organique et particulaire sauf à la station 100, ce qui est la conséquence des apports de carbone des égouts de la ville de Waterloo. A cause de problèmes analytiques, on ne dispose pas de données concernant l'azote organique, et on ne peut donc rien apprendre au sujet du comportement de ce paramètre à la station, l'échantillonnage n'ayant débuté qu'en 1976 à ce site. Il est cependant fort probable qu'on y aurait aussi observé les relations  $N_{org} - N_{part}$  et  $N_{org} - C_{org}$ , toujours à cause des apports ponctuels de Waterloo. Il y a corrélation durant l'année 1975 entre l'azote organique et particulaire aux stations 105 et 210 (pas d'année complète pour les stations 101 et 103) et plus faiblement à l'été 1975. Les re-

TABLEAU 3.15 Relation de l'azote (carbone) organique avec l'azote (carbone) particulaire, la chlorophylle et le carbone (azote) organique. (coefficients de corrélation).

RELATIONS	Années 1975-1976 <sup>†</sup>				Période d'activité biologique 1975				Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	210	101	103	105	210	100	101	103	105	210
N <sub>org</sub> - Chl <sub>a</sub> <sup>†</sup>	-	-	.58 <sup>***</sup>	.68 <sup>***</sup>		.34 <sup>*</sup>	.47 <sup>**</sup>	.47 <sup>**</sup>	-	-	-	-	-
N <sub>org</sub> - N <sub>part</sub> <sup>†</sup>	-	-	.73 <sup>***</sup>	.61 <sup>***</sup>		.36 <sup>*</sup>	.70 <sup>***</sup>	.42 <sup>*</sup>	-	-	-	-	-
N <sub>org</sub> - C <sub>org</sub> <sup>†</sup>	-	-	-	-		.43 <sup>*</sup>	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>org</sub> - Chl <sub>a</sub>	.52 <sup>***</sup>	.49 <sup>***</sup>	-	.31 <sup>**</sup>		-	-	-	.55 <sup>**</sup>	.43 <sup>**</sup>	.44 <sup>*</sup>	-	.41 <sup>*</sup>
C <sub>org</sub> - C <sub>part</sub>	.43 <sup>***</sup>	.55 <sup>***</sup>	-	.33 <sup>**</sup>		.50 <sup>*</sup>	-	-	.79 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>	.50 <sup>**</sup>	.44 <sup>*</sup>	-

Coefficients de corrélation significativement différents de zéro au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$

\*\*  $\alpha = 0.01$

\*  $\alpha = 0.05$

<sup>†</sup> année 1975 seulement

- données non disponibles.

lations  $N_{org} - Chlo_a$  et  $N_{org} - N_{part}$  sont plus évidentes à ces stations, du moins durant l'été 1975 (milieu lentique).

On trouve une corrélation entre le carbone organique et la chlorophylle à la station 100, à l'été 1976, ce qui rappelle la relation  $C_{part} - Chlo_a$  trouvée aussi à cet endroit, et difficilement explicable. D'après le tableau 3.15 il semble qu'on observe rarement de corrélation entre le carbone et l'azote organique. Non seulement plusieurs mécanismes influencent ces paramètres, mais, selon le type de matière organique apportée par le bassin versant, le rapport C/N est différent ce qui nuit à la constance de la relation. L'examen des courbes décrivant les relations (figure 3.11) révèle cependant qu'il existe une certaine corrélation entre ces paramètres à la station 210 durant l'année 1975 ( $r = 0.41^*$ ), mais qu'elle a été détruite par une valeur particulièrement forte de carbone organique, ce qui est peut-être dû à un problème de contamination. La relation semble donc un peu plus marquée en milieu lacustre (station 210).

### 3.2.7 Relations prévues de la chlorophylle avec la silice et le potentiel de fertilité

Les corrélations trouvées entre la chlorophylle et la silice sont très faibles ou inexistantes. Il s'agit d'une relation inverse comme prévu (section 2.3.2) et elle est surtout observée lorsqu'on considère une période incluant une année complète (tableau 3.16). En effet, le cycle annuel de la silice est inverse de celui de la production primaire et donc

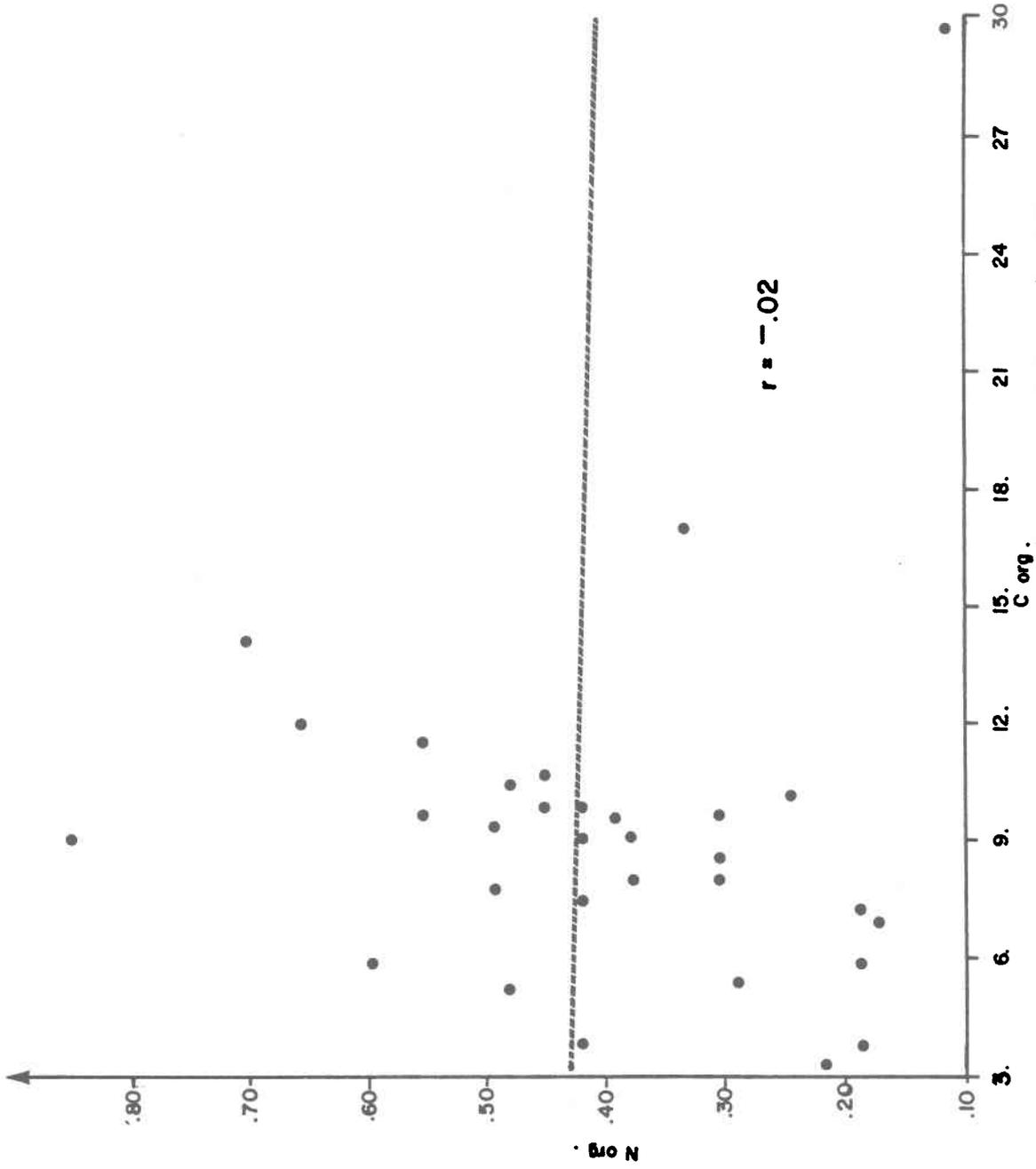


Figure 3 . 11 . Relation Norg. - C org. , à la station 210, année 1975 .

TABLEAU 3.16 Relations de la chlorophylle avec la silice et le potentiel de fertilité.

RELATIONS	Années 1975-1976					Période d'activité biologique 1975					Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	210	210	101	103	105	210	210	100	101	103	105	210
Chl <sub>a</sub> - SiO <sub>2</sub>	-.35***	-.32**	-.48***	-.45***	-.45***										
Chl <sub>a</sub> - PF		-	-.26*	-.37***	.43*	-			.67***						

Coefficients de corrélation significativement différents de zéro au niveau:

\*\*\*  
 $\alpha = 0.001$ \*\*  
 $\alpha = 0.01$ \*  
 $\alpha = 0.05$ 

- Données non disponibles.

de la chlorophylle. La faiblesse des coefficients de corrélations peut s'expliquer par les apports allochtones de silice et par la présence d'algues non utilisatrices de silice, contrairement aux diatomées. La relation n'est probablement forte qu'en période de dominance des diatomées. On obtiendrait sûrement une meilleure corrélation entre la silice et la biomasse de ces algues.

La relation P.F.- $\text{Chlo}_a$  n'existe avec force qu'à la station 210 (lac Boivin) durant la période d'activité biologique de 1975 (tableau 3.16). Le coefficient de corrélation est positif et significativement différent de 0 au niveau .1%, contrairement à ce qui avait été prévu à priori. Comme la relation  $\text{NO}_3$ - $\text{Chlo}_a$  n'est pas souvent observée, il n'est pas surprenant que cette relation ne le soit pas non plus. Cependant, à la station 210, en 1975, on n'a trouvé aucune corrélation entre les nitrates et la chlorophylle, mais on a observé une forte relation inverse en 1976. La contradiction disparaît lorsqu'on se rappelle qu'il n'y avait, pour ces deux périodes, aucune corrélation entre les nitrates et le potentiel de fertilité à la station 210. La raison avancée alors pour expliquer cette absence de relation permet aussi de comprendre pourquoi la corrélation est positive entre le P.F. et la chlorophylle. En effet, lorsque les échantillons contiennent beaucoup de chlorophylle, on y trouve aussi beaucoup de phytoplancton indigène et d'azote organique soluble. Si l'autoclave libère des substances nutritives disponibles pour l'algue témoin, le potentiel de fertilité devient en relation directe avec la chlorophylle, surtout si l'échantillon a une carence en azote inorganique facilement utilisable comme c'est le cas en 1975. Notons que Greene *et al.* (1976) ont aussi trouvé une telle relation dans un réservoir soumis à la pollution organique.

### 3.2.8 Relation prévue entre la chlorophylle et les phaeopigments

Comme la mesure des phaeopigments n'a débuté qu'en septembre 1975, la période d'étude de cette relation est différente et s'étend de la fin septembre 1975 à octobre 1976 (année 1975-76).

Une corrélation entre la chlorophylle-a totale et les phaeopigments qui sont un produit de la dégradation de la chlorophylle, n'est pas très significative car à certains moments de l'année, la chlorophylle est constituée en majeure partie de phaeopigments. C'est le cas notamment en hiver et à l'automne (Kowalczewski et Lack, 1971). On est amené en quelque sorte à corréler les phaeopigments avec eux-mêmes. Il est donc plus valable de considérer la relation chlorophylle active-phaeopigments. Les coefficients de corrélation sont forts, quelle que soit la station ou la période (tableau 3.17). Une variation de concentration de chlorophylle active s'accompagne donc d'une variation proportionnelle des phaeopigments, ce qui est probablement dû au bref cycle de vie des algues. Bisson *et al.* (1976) ont aussi trouvé une forte relation positive entre ces paramètres dans le cas de la rivière Saguenay (section 2.3.3). Ceci n'implique pas que le pourcentage de dégradation des pigments chlorophylliens (phaeopigments-chlorophylle totale) soit constant. En effet, ce pourcentage varie au cours d'une année, la proportion de la phaeopigments étant plus forte en hiver et à l'automne et plus faible à l'été et au printemps. On peut observer de fortes augmentations de chlorophylle corrigée au printemps sans noter pour autant une augmentation marquée des phaeopigments. A l'automne, les pluies apportent parfois du bassin versant des quantités importantes de phaeopigments. Durant la période d'activité biologique de

TABLEAU 3.17 Relation entre la chlorophylle active et les phaeopigments  
(coefficients de corrélation).

RELATIONS	Année 1975-1976 <sup>†</sup>				Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	210	100	101	103	105	210
Ch <sub>C</sub> <sup>††</sup> - p.p.	.86***	.86***	.85***	.94***	.94***	.85***	.82***	.81***	.90***

<sup>†</sup> fin septembre 1975 à octobre 1976.

<sup>††</sup> Ch<sub>C</sub> ≡ Chlorophylle-a active

Coefficients de corrélation significativement différent de zéro au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$  .

1976, les pourcentages moyens de dégradation étaient respectivement de 39%, 45%, 47%, 49% et 52%, aux stations 100, 101, 103, 105 et 210. Un test d'analyse de variance montre que ces moyennes sont significativement différentes au niveau 5%. Un test de Scheffe\* conduit par ailleurs au regroupement suivant des moyennes (ordre croissant):

100	101	103	105	210
-----	-----	-----	-----	-----

C'est donc à la station 100 que le pourcentage de dégradation est le plus faible et à la station 210 (exutoire du lac Boivin) qu'il est le plus élevé. Une bonne part du phytoplancton produit dans le lac Boivin meurt donc dans le lac lui-même comme l'ont observé Campbell *et al.* (1979).

### 3.2.9 Relations non prévues lors de l'étude à priori

Il n'a été question, lors de l'étude à priori (section 2.3.2), que des relations qui semblaient les plus probables, ce qui n'implique pas que d'autres relations ne peuvent être observées. Effectivement des relations non prévues à priori sont apparues.

Le tableau 3.18 présente les relations les plus fortes qui ont été mises en évidence. On a aussi indiqué les coefficients de corrélation trouvés aux différentes stations et pour les trois périodes considérées, même s'ils n'étaient pas très élevés, afin de permettre une comparaison plus globale. On tente ici d'expliquer l'existence des relations dont les coefficients de corrélation sont plus élevés que .70 dans au moins un cas.

$N_{org}^{-P}$  part',  $N_{org}^{-C}$  part

Ces relations rappellent celle trouvée entre l'azote organique

\* Bobée *et al.* (1977). "Evaluation du réseau de la qualité des eaux, analyse et interprétation de la période 1967-1975". Ministère des Richesses naturelles, Québec, 212 p.

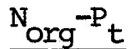
TABLEAU 3.18 Relations non prévues lors de l'étude à priori.

RELATIONS	Années 1975-1976					Période d'activité biologique 1975					Période d'activité biologique 1976				
	101	103	105	105	210	101	103	105	105	210	100	101	103	105	210
N <sub>org</sub> - P <sub>part</sub>	-	-	.77 <sup>***</sup>	.61 <sup>***</sup>	.53 <sup>**</sup>	.75 <sup>***</sup>	.52 <sup>**</sup>	-	-	-	.80 <sup>***</sup>	-	-	-	-
N <sub>org</sub> - C <sub>part</sub>	-	-	.70 <sup>***</sup>	.43 <sup>**</sup>	.72 <sup>***</sup>	.78 <sup>***</sup>	.51 <sup>**</sup>	-	-	-	.93 <sup>***</sup>	-	-	-	-
N <sub>org</sub> - P <sub>t</sub>	-	-	.72 <sup>***</sup>	.84 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.43 <sup>**</sup>	.76 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.80 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.48 <sup>**</sup>	.55 <sup>**</sup>	.67 <sup>***</sup>
NO <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub>	.40 <sup>***</sup>	.49 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.84 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.43 <sup>**</sup>	.76 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.45 <sup>**</sup>	.80 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.48 <sup>**</sup>	.55 <sup>**</sup>	.67 <sup>***</sup>
NH <sub>4</sub> - S.S.	.60 <sup>***</sup>	.50 <sup>***</sup>	.66 <sup>***</sup>	.76 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.43 <sup>**</sup>	.76 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.45 <sup>**</sup>	.80 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.48 <sup>**</sup>	.55 <sup>**</sup>	.67 <sup>***</sup>
NH <sub>4</sub> - SiO <sub>2</sub>	.51 <sup>***</sup>	.56 <sup>***</sup>	.44 <sup>***</sup>	.44 <sup>***</sup>	.44 <sup>***</sup>	.43 <sup>**</sup>	.76 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.45 <sup>**</sup>	.80 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.48 <sup>**</sup>	.55 <sup>**</sup>	.67 <sup>***</sup>
N <sub>part</sub> - C <sub>org</sub>	.37 <sup>***</sup>	.40 <sup>***</sup>	.63 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.43 <sup>**</sup>	.76 <sup>***</sup>	.72 <sup>***</sup>	.45 <sup>**</sup>	.80 <sup>***</sup>	.58 <sup>***</sup>	.47 <sup>**</sup>	.48 <sup>**</sup>	.55 <sup>**</sup>	.67 <sup>***</sup>
P <sub>t</sub> - P <sub>part</sub>	.38 <sup>***</sup>	-	-.44 <sup>***</sup>	-.59 <sup>***</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PF - SiO <sub>2</sub>															
NO <sub>3</sub> - C <sub>part</sub>															

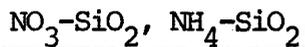
Coefficient de corrélation significativement différent de zéro au niveau:

\*\*\*  $\alpha = 0.001$ \*\*  $\alpha = 0.01$

et particulière pour les mêmes périodes et stations (tableau 3.15). Elles ne sont pas très surprenantes puisqu'il existe aussi des corrélations entre le carbone, l'azote et le phosphore particulaires (tableau 3.12).



La relation est peut être due à l'influence de sources communes d'azote organique et de phosphore soluble.



Les corrélations trouvées entre ces paramètres sont probablement dues à une certaine similarité dans leurs cycles annuels, qui sont tous trois inverses de celui de la production primaire (assimilation). Sur une base annuelle, les relations semblent plus fortes en milieu lentique où les cycles sont plus marqués. De plus des apports de silice et d'azote inorganique par ruissellement ou écoulement hypodermique (sources diffuses) contribuent à renforcer la relation. Durant la période d'activité biologique de 1976, la silice est corrélée aux deux formes d'azote inorganique ( $NH_4$  et  $NO_3$ ) à la station 100. Une telle relation s'explique difficilement par des apports provenant de sources diffuses, puisqu'à cette station l'azote ammoniacal provient des égouts de la ville de Waterloo. Elle n'est probablement pas due non plus à l'assimilation commune de ces substances par les organismes autotrophes. Si l'effluent d'égouts de la ville de Waterloo est plus concentré en silice que les eaux de la rivière, la corrélation trouvée pourrait s'expliquer par l'influence de cette source ponctuelle d'azote ammoniacal et de silice. Notons que la ville de Waterloo s'approvisionne en eau à partir d'un puits. Comme les eaux souterrai-

nes sont souvent plus enrichies en silice que les eaux de surface (Wetzel, 1975a), l'effluent pourrait être assez concentré en silice. Dans le cadre d'une étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Yamaska menée par le service des eaux souterraines du Ministère des Richesses Naturelles (Paré, 1978), il y a eu échantillonnage d'un puits d'essai situé dans un dépôt perméable à partir duquel la municipalité capte son eau. L'analyse y indique des concentrations de silice et de nitrates qui sont respectivement de 8.4 et 0.3 ppm. Il s'agit cependant d'une mesure ponctuelle et non pas de valeurs moyennes. Il est à remarquer que la concentration de silice est beaucoup plus élevée que celle trouvée à la station 100 (tableau 3.9). Une vérification effectuée auprès des Services de Protection de l'Environnement ne permet pas de connaître les concentrations de silice dans l'eau d'alimentation de la ville, puisque ce paramètre n'a pas été mesuré. Les teneurs en nitrates varient cependant de 0.2 à 3.6 ppm selon le site d'échantillonnage (4 mesures).

Il est donc possible que les relations  $\text{NO}_3 - \text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3 - \text{SiO}_2$  et  $\text{NH}_4 - \text{SiO}_2$  soient uniquement dues au fait que les eaux d'alimentation de la ville sont plus concentrées en silice et en nitrates que celles de la rivière. Ceci est surtout vrai dans le cas de la silice.

#### $\text{NH}_4$ - S.S.

Cette relation n'est forte qu'à la station 105 durant la période d'activité biologique de 1975, ce qui suggère l'importance d'une source diffuse d'azote ammoniacal dans le bassin immédiat du tronçon 103-105, source qui pourrait être associée à l'élevage qui se pratique dans cette région.

$$\underline{N_{part} - C_{org}}$$

Cette corrélation rappelle celle trouvée entre le carbone particulaire et organique aux mêmes périodes et stations. Elle est due à la relation  $N_{part} - C_{part}$ .

$$\underline{P_t - P_{part}}$$

La corrélation n'est forte qu'à la station 105, à l'été 1975. Elle peut s'expliquer par l'influence de sources diffuses de phosphore soluble et particulaire.

$$\underline{PF - SiO_2}$$

Cette relation n'a pas de sens physique, car l'algue employée pour le test de fertilité (*Selenastrum Capricornutum*) n'utilise pas la silice pour sa croissance. La corrélation s'expliquerait plutôt par les relations  $PF-NO_3$  et  $NO_3-SiO_2$ .

$$\underline{NO_3 - C_{part}}$$

La relation  $NO_3-C_{part}$  est de même nature que celle trouvée avec l'azote particulaire (tableau 3.10) et est la conséquence de l'assimilation des nitrates par les producteurs primaires.

### 3.2.10 Influence des conditions hydrologiques et locales

Les périodes d'activité biologique de 1975 et 1976 étaient très différentes. L'été 1975 fut très sec, et en conséquence, peu de nitrates

furent apportés à la rivière par ruissellement, alors que les concentrations de phosphore soluble furent fortes en raison des faibles débits et l'importance des sources ponctuelles de phosphore (ville de Waterloo). L'azote limita donc assez fortement la production primaire en 1975, particulièrement à la station 210, située à la sortie du lac Boivin, où les conditions physiques sont plus favorables. En 1976, l'été fut pluvieux et il y eut davantage d'azote exporté des sols vers le cours d'eau. De plus, le phosphore en provenance des égouts de Waterloo fut dilué par les plus forts débits. L'azote étant moins souvent limitant, la production autotrophe fut plus forte en 1976, surtout dans le lac Boivin, ainsi que l'indique la comparaison des concentrations moyennes de chlorophylle à ces deux périodes (tableau 3.9) et la comparaison des bilans massiques\*.

Ces différences se reflètent fortement dans les relations qu'ont les formes particulières du carbone, de l'azote et du phosphore avec la chlorophylle, ainsi que celles existant entre les nitrates et le potentiel de fertilité. L'azote étant plus souvent limitant en 1975, la relation  $PF-NO_3$  est aussi plus forte qu'en 1976 (tableau 3.11). C'est l'inverse en ce qui concerne les autres relations mentionnées plus haut, qui sont plus fortes en 1976 à cause de la production primaire accrue (tableau 3.13).

Certaines relations sont aussi plus fortes à la station 210 donc en milieu lacustre, et à un degré moindre à la station 105 (milieu lentique). C'est le cas particulièrement des relations dues à des cycles annuels semblables ou inverses de celui de la production primaire ( $NO_3^-$ - $N_{part}$ ,  $NO_3^-$ - $Chlo_a$ ,  $NO_3^-$ - $NH_4$ ,  $C_{part}$ - $Chlo_a$ ,  $N_{part}$ - $Chlo_a$ ,  $P_{part}$ - $Chlo_a$ ,  $SiO_2^-$ - $Chlo_a$ ,  $NO_3^-$ - $SiO_2$ ,  $NH_4$ - $SiO_2$ ). Ceci apparaît lorsqu'on considère une période

\* Campbell et al., 1979.

de incluant une année complète. Les cycles sont en effet plus marqués en milieu lentique ou lacustre. En été, les relations dues à l'assimilation des substances nutritives par les producteurs primaires sont aussi plus évidentes à la station 210 puisque c'est là que l'influence des apports allochtones et du débit est minimum.

Le tronçon Waterloo-Station 100 montre un comportement inattendu. On trouve en effet à la station 100 des concentrations très élevées et variables de chlorophylle, teneurs qui sont plus fortes que celles observées à la station 210 (tableau 3.9). Etant donné l'influence importante des rejets ponctuels de la ville de Waterloo, le tronçon en amont de la station 100 devrait être le site d'une production majoritairement hétérotrophe, et les concentrations de chlorophylle ne devrait pas être très élevées à la station 100. Le Ministère des Richesses Naturelles échantillonnait aussi à cet endroit durant l'été 1976, et les teneurs en chlorophylle qui ont été observées sont cohérentes avec celles mesurées par l'INRS-Eau. De telles concentrations pourraient être le résultat d'apports provenant du lac Waterloo, où l'on note de très fortes teneurs en chlorophylle. Les algues provenant d'un milieu lacustre ne survivent habituellement pas longtemps en rivière (Hynes, 1970; Wetzel, 1975b). Or le pourcentage moyen de dégradation des pigments chlorophylliens durant l'été 1976 est de 39% à la station 100, ce qui indiquerait plutôt que les algues en question sont vivantes. Les mesures de potentiel autotrophe effectuées par le Ministère des Richesses Naturelles à la station 100 (Bélan-ger, 1977) et à l'exutoire du lac Waterloo montrent cependant que s'il y a beaucoup d'algues à la station 100, leur activité photosynthétique est très réduite comparativement à celle qui s'exerce à la sortie du lac.

La station 100 est donc très influencée par les apports de chlorophylle, et donc de phytoplancton du lac Waterloo, ce qui explique l'existence des relations  $N_{part} - Chlo_a$  et  $C_{part} - Chlo_a$  à ce site. Ces algues ne sont cependant pas actives.

Les relations les plus fortes mises en évidence sont celles qui existent entre le carbone, l'azote, le phosphore particulaire et la chlorophylle; le potentiel de fertilité et les nitrates; la chlorophylle active et les phaeopigments et enfin entre le phosphore particulaire et les solides en suspension. Il apparaît donc peu de relations fortes qui impliquent les éléments solubles, peut-être parce que les influences qu'ils subissent sont plus diversifiées.

La période d'étude considérée et les conditions hydrologiques qui la caractérisent, influencent beaucoup la force des relations qui seront observées. Sur une base annuelle, les relations les plus évidentes sont celles qui sont dues à des similitudes de cycles. Sur une plus courte période, les apports allochtones et le débit semblent jouer un rôle important. Les influences locales que subissent les stations sont aussi à considérer. Les relations mises en évidence ici sont donc très difficilement transposables puisque certaines sont spécifiques au bassin étudié et même à un site d'échantillonnage. L'approche utilisée ici pour la prévision des relations potentielles pourrait être transposée. La prévision de relations sur une base systématique nécessiterait cependant une certaine classification des rivières selon les caractéristiques de l'utilisation du territoire de leur bassin versant et les conditions physiques dans le cours d'eau.

## CHAPITRE IV

### VARIABILITÉ TEMPORELLE

On s'intéresse ici à l'évolution temporelle des concentrations des paramètres considérés dans cette étude, afin de mieux comprendre et expliquer la dynamique de ces éléments en rivière. On a procédé, dans le cadre de ce travail, à une revue de littérature à ce sujet, mais certains paramètres n'ont été que peu ou pas étudiés. C'est le cas surtout des formes particulières des substances nutritives. De plus, on peut difficilement généraliser les résultats établis pour d'autres bassins, puisque le comportement des éléments nutritifs est relié aux caractéristiques du bassin considéré (utilisation du territoire, débit, climat, etc.). En effet, les concentrations des paramètres étudiés ici subissent l'influence des changements de débit et des apports diffus ou ponctuels venant du bassin versant, ce qui entraîne des effets de dilution et de concentration (cf. section 2.2), superposés aux changements produits dans le cours d'eau par divers mécanismes d'ordre biologique, physique ou chimique (tableau 2.3). L'évolution temporelle des concentrations d'un paramètre peut donc différer

d'un bassin à un autre selon les conditions de débit, de climat et d'utilisation du territoire, ce qui rend difficilement utilisable l'information dégagée de la revue de littérature. Notons tout de même l'influence déterminante de la production autotrophe sur les concentrations des éléments nutritifs (transformation des formes inorganiques en formes organiques), celle du type d'apports en provenance du bassin versant (ponctuels ou diffus) en ce qui concerne la réaction des concentrations aux changements de débit, et enfin celle de l'activité des organismes hétérotrophes pour ce qui est de la minéralisation des formes organiques des substances nutritives. L'évolution temporelle des débits et des apports, ainsi que celle de l'activité des producteurs primaires et secondaires, déterminent en majeure partie les variations de concentration des paramètres étudiés.

Campbell *et al.* (1979) ont effectué une première analyse du comportement des substances nutritives dans le bassin de la Yamaska-Nord, à l'aide de courbes décrivant les variations de concentration en fonction du temps, et aussi, en effectuant des bilans massiques pour différents tronçons de la rivière. On procédera d'abord ici à l'étude globale de l'évolution temporelle des concentrations aux stations 101, 103, 105 et 210, puis on s'intéressera plus particulièrement au site de Savage Mills (station 101), caractéristique d'un comportement en rivière; l'analyse factorielle des correspondances (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.) seront les principaux outils utilisés. La première analyse permettra de mettre en évidence les tendances générales du comportement des paramètres aux quatre sites d'échantillonnage considérés simultanément, alors que la seconde partie de l'étude visera à identifier et interpréter de manière plus détaillée les variations temporelles de concentration à la station 101;

le traitement pour les quatre stations aurait dépassé le cadre de cette étude. Les paramètres retenus pour ces analyses sont les mêmes que ceux considérés à la section 3.1. Il s'agit donc de la silice, de l'azote ammoniacal et des nitrates, du phosphore total soluble, du carbone; de l'azote et du phosphore particuliers, de la chlorophylle totale, des solides en suspension et du potentiel de fertilité.

#### 4.1 Evolution temporelle des concentrations: étude globale aux stations 101, 103, 105 et 210

L'étude globale de l'évolution temporelle des concentrations, aux stations 101, 103, 105 et 210, par l'A.F.C. et la C.A.H., telle qu'effectuée ici, est le complément de celle concernant les relations entre paramètres aux mêmes stations (section 3.1). En effet, il y a correspondance entre la représentation des points observations et celle des points paramètres dans l'espace formé par les axes principaux trouvés par l'A.F.C. On a étudié en 3.1 le regroupement des points paramètres afin d'analyser les relations entre paramètres, et on considère maintenant celui des points observations afin de mettre en évidence l'évolution temporelle des concentrations. Le tableau initial de données est donc le même que celui déjà décrit à la section 3.1. Le regroupement automatique des observations en classes a été effectué à l'aide des projections des points observations sur les six premiers axes, qui expliquent 82.1% de la variabilité totale du nuage. On cherche surtout ici à identifier des tendances dans l'évolution temporelle pour l'ensemble des stations et des paramètres. Aussi, le processus d'interprétation ne sera pas repris en détail ici puisqu'on en a donné un exemple détaillé à la section 3.1. On se limitera à présenter les conclusions de cette analyse.

#### 4.1.1 Regroupement en classes des points observations

On a choisi de considérer cinq classes d'observations seulement, puisqu'il s'agit d'une étude globale et que l'on cherche surtout à mettre en évidence des tendances générales. On explique ainsi 55% de l'inertie du nuage sur les six premiers axes.

La figure 4.1 représente l'arbre hiérarchique obtenu en considérant cinq classes. On y a aussi indiqué les paramètres qui contribuent le plus à différencier et caractériser les classes (tableau 4.3). L'analyse du tableau 4.3 est basée sur le fait qu'une contribution fortement positive (négative) est un indice de concentrations relativement fortes (faibles) par rapport aux autres paramètres. Les tableaux 4.1 et 4.2 indiquent respectivement la composition des classes d'observations et la qualité de la représentation obtenue pour chaque observation\*. On a identifié par une étoile (tableau 4.1) les observations moins bien représentées dans l'espace des six premiers axes, (contribution relative cumulée < .60), et dont l'appartenance à une classe donnée peut être dénuée de sens physique.

Le premier niveau d'interprétation (classes 127 et 128, figure 4.1) indique que les observations de l'hiver et du printemps 1976 (classe 127) se distinguent, à quelques exceptions près, des autres observations (classe 128) par des concentrations élevées de solides en suspension (station 103), des valeurs assez fortes de potentiel de fertilité (stations 210 et 103), des teneurs faibles en azote particulaire (station 210 et 105) et assez élevées en phosphore particulaire (station 103). En période de

---

\* Le tableau 3.7 donne la correspondance entre les numéros d'observations et les dates d'échantillonnage.

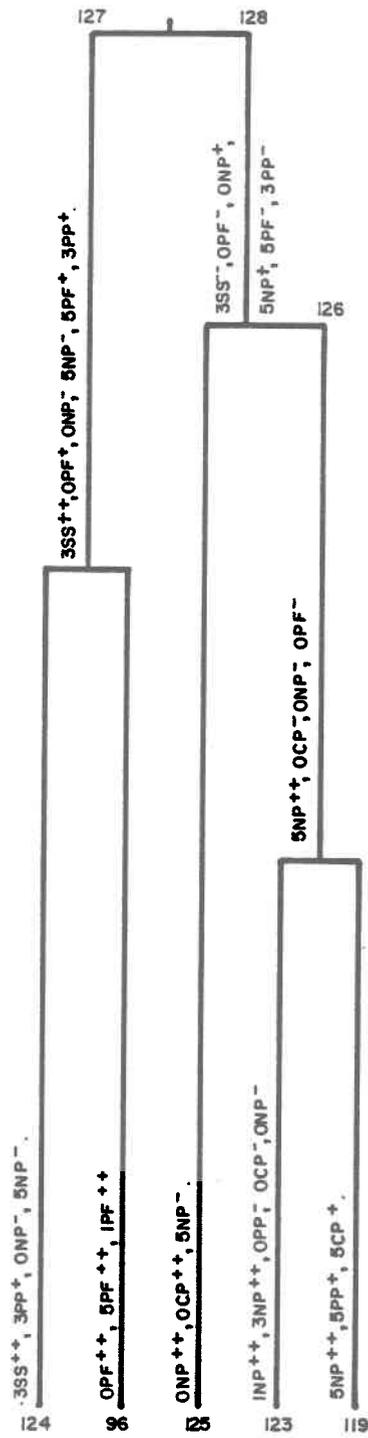


Figure 4.1 . Arbre hiérarchique obtenu avec 5 classes de points observations .

TABLEAU 4.1 Composition des classes obtenues par la C.A.H.:  
points observations.<sup>†</sup>

CLASSE 125	CLASSE 124	CLASSE 123	CLASSE 119	CLASSE 96
2	1	3*	8	31
5	12	4*	11	32
29*	25	6	13	33
38	30	7*	14	35
40	34	9	15	
41*	36	10	16	
43	37	21	17*	
44	39	23	18	
45	53	24	19*	
47	55	26	20*	
48		27	22*	
49		50	28*	
52		51	42	
54		56	46*	
58*		61	57	
59		62	64*	
60		63*		
65*				

\* Observation moins bien représentée dans l'espace des six premiers axes (contribution relative cumulée < .60)

<sup>†</sup> Le tableau 3.7 donne la correspondance entre les numéros d'observations et les dates d'échantillonnage.

TABLEAU 4.2 Qualité de la représentation des points observations:  
contribution relative cumulée après six axes.

OBSERVATIONS	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION	OBSERVATIONS	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION
1	.810	34	.868
2	.674	35	.932
3	.552	36	.928
4	.490	37	.740
5	.736	38	.741
6	.818	39	.912
7	.577	40	.709
8	.671	41	.442
9	.936	42	.700
10	.856	43	.920
11	.945	44	.842
12	.729	45	.661
13	.886	46	.305
14	.715	47	.742
15	.763	48	.614
16	.746	49	.875
17	.566	50	.737
18	.693	51	.785
19	.199	52	.938
20	.306	53	.776
21	.681	54	.904
22	.507	55	.808
23	.843	56	.656
24	.446	57	.617
25	.912	58	.516
26	.811	59	.774
27	.732	60	.730
28	.525	61	.798
29	.482	62	.791
30	.909	63	.509
31	.923	64	.288
32	.976	65	.512
33	.958		

TABLEAU 4.3 Contributions relatives les plus fortes des paramètres à la distance des classes du centre du nuage.

Classes Paramètres	128	127	126	125	124	123	119	96
1NP			.06	-.05		.24*	-.05	-.01
1PF	-.05	.05	-.02			-.02		.16*
3NP	.03	-.03	.06	-.01	-.02	.18*	-.02	-.02
3PP	-.08*	.08*	-.01	-.02	.13*	-.01		
3SS	-.22*	.22*	-.08*	-.01	.41*	-.02	-.05	-.01
5CP	.01	-.01	.01	-.09*	-.01	-.01	.08*	-.01
5NP	.08*	-.08*	.26*	-.02	-.08*		.46*	-.02
5PP			.01	-.02		-.05	.13*	
5PF	-.08*	.08*	-.05		.02	-.04	-.01	.19*
0CP	.02	-.02	-.10*	.21*	-.02	-.08*	-.01	
0NP	.10*	-.10*	-.10*	.38*	-.10*	-.07*	-.02	-.04
0PP			-.05	.05		-.10*		.01
0PF	-.12*	.12*	-.09*		.02	-.05	-.03	.34*

\* Contributions les plus fortes.

fort débit, comme au printemps ou lors de fortes pluies, les eaux charrient des quantités importantes de solides en suspension et aussi de phosphore particulaire, à cause de l'érosion accrue et de la remise en suspension des particules qui avaient précédemment sédimentées. La construction, en 1976, du barrage de Shefford Vale (Station 103) influence probablement aussi les teneurs en solides à cet endroit. Ceci expliquerait que les concentrations de solides en suspension et de phosphore particulaire soient fortes en hiver et au printemps à la station 103, comparativement à celles observées en été et à l'automne.

C'est au cycle annuel de la production primaire, maximum en été et minimum en hiver, que sont dues les fortes valeurs de potentiel de fertilité et les faibles concentrations d'azote particulaire notées (tableau 4.3) durant l'hiver et au printemps (classe 127) à l'entrée et à la sortie du lac Boivin, c'est-à-dire aux stations 105 et 210. En été, l'activité autotrophe entraîne de fortes concentrations en azote particulaire et de faibles valeurs de potentiel de fertilité à cause de l'assimilation de l'azote inorganique. Il faut noter que plusieurs des observations appartenant à la classe 128 (été, automne) sont mal représentées (tableau 4.1, classes 125, 123 et 119) et que certaines d'entre elles auraient pu être groupées différemment, particulièrement celles faites à la fin de l'automne alors que la production autotrophe est plus faible qu'en été.

Le second niveau d'interprétation (classes 125 et 126, figure 4.1) illustre les différences existant entre les périodes d'activité biologique de 1975 et de 1976. En 1975 (classe 126), les concentrations d'azote particulaire aux stations 105, 103 et 101 sont relativement élevées par rapport à celles observées à la station 210 alors qu'en 1976 la situation

inverse se produit, les concentrations d'azote et de carbone particulières devenant très importantes à la station 210 (tableau 4.3). En 1975, la production primaire dans le lac Boivin fut fortement limitée par l'azote inorganique à cause de la sécheresse de l'été alors qu'aux autres stations la situation est moins critique. Le potentiel de fertilité semble en effet particulièrement faible à la station 210 (tableau 4.3). En 1976, les apports plus importants de nitrates permettent une forte production dans le lac Boivin, où les conditions physiques sont les plus favorables, alors que les concentrations sont diluées aux autres stations par les plus forts débits.

Le troisième niveau (classes 124 et 96, figure 4.1) sépare des observations d'hiver (classe 96), caractérisées (tableau 4.3) par de fortes valeurs de potentiel de fertilité (stations 101, 105 et 210<sup>\*</sup>), d'autres observations d'hiver et de printemps surtout (classe 124), auxquelles on note des teneurs élevées de solides en suspension et de phosphore particulaire (station 103) ainsi que des concentrations faibles d'azote particulaire (stations 210 et 105). Les débits élevés et l'influence de la construction du barrage semblent être les principaux responsables des fortes teneurs en solides en suspension et en phosphore particulaire. En hiver et au printemps, l'activité autotrophe étant réduite, les concentrations d'azote particulaire sont faibles et celles de nitrates élevées ce qui cause de forts potentiels de fertilité. Des apports de nitrates par ruissellement, et une dilution de l'azote particulaire ont aussi les mêmes effets lors de fortes pluies.

---

\* Le potentiel de fertilité n'a pas été mesuré à la station 103.

Enfin, le dernier niveau d'interprétation (classes 123 et 119, figure 4.1) sépare les observations de la période d'activité biologique de 1975 et quelques-unes de 1976 en deux groupes de profils assez moyens (tableau 4.3,  $\rho^2$  faible). Près du tiers de ces observations sont plus ou moins bien représentées dans l'espace factoriel choisi (tableau 4.1). Le regroupement observé est donc incertain, et il est préférable de ne pas pousser trop loin l'interprétation de cette séparation en deux classes. Durant la seconde partie de la période d'activité biologique de 1975 (mois de juillet à septembre), les concentrations d'azote, de phosphore et de carbone particulaires semblent avoir été assez fortes à la station 105, alors que durant la première partie et la fin de cette même période, c'est aux stations 101 et 103 que les concentrations d'azote particulaire sont particulièrement fortes.

#### 4.1.2 Correspondance entre les classes d'observations et celles de paramètres

On a représenté dans le plan des axes 1 et 2, qui expliquent 48% de la variabilité totale, les centres de gravité des classes de points observations (i) et paramètres (j) (figure 4.2). La proximité des centres de gravité des classes d'observations et de paramètres indique en effet, que les paramètres de la classe j ont des concentrations élevées lors des observations de la classe i, alors que l'éloignement signifie plutôt des concentrations assez faibles. Ainsi, on observe les proximités suivantes:

<u>Paramètres</u>	<u>Observations</u>
Classe 68	Classe 96
Classe 70	Classe 125
Classe 73	Classes 126 et 124
Classe 74	Classes 123 et 119 $\equiv$ 126



Connaissant la composition de ces groupes (tableaux 3.3 et 4.1), on peut déterminer les périodes auxquelles les concentrations des paramètres sont fortes. On obtient donc:

$\text{SiO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , P.F. (stations 101 à 210); : valeurs fortes en hiver

$\text{P}_t$  (stations 105 et 210)

$\text{C}_{\text{part}}$ ,  $\text{N}_{\text{part}}$ ,  $\text{P}_{\text{part}}$ ,  $\text{Chl}_a$ , S.S. : valeurs fortes durant la période d'activité biologique de 1976 (station 210)

$\text{C}_{\text{part}}$ ,  $\text{N}_{\text{part}}$ ,  $\text{P}_{\text{part}}$ ,  $\text{Chl}_a$ , S.S. : valeurs fortes en période d'activité biologique 1975 surtout ou lors de forts débits et de la construction du barrage (station 103). (station 101);  $\text{P}_{\text{part}}$ , S.S. (station 103); S.S. (station 105)

$\text{C}_{\text{part}}$ ,  $\text{N}_{\text{part}}$ ,  $\text{Chl}_2$  (stations 103, : valeurs fortes durant la période d'activité biologique de 1975 surtout. 105);  $\text{P}_{\text{part}}$  (station 105);  $\text{P}_t$  (stations 101, 103)

Les paramètres de la classe 73 qui sont de nature organique (LCP, LNP, LCH) sont situés plus près de la classe 126 que de 124, ce qui indique que leurs concentrations sont fortes durant la période d'activité biologique. Les solides en suspension (LSS, 3SS, 5SS) sont davantage situés à proximité de la classe 124 et leurs concentrations sont donc fortes en période de crue et subissent l'influence de la construction du barrage (3SS, 5SS seulement). Le phosphore particulaire ne montre pas de tendances claires (LPP près de 126, 3PP près de 124), ce qui est probablement le résultat de sa nature à la fois organique et inorganique. Rappelons cependant, qu'une telle représentation est une projection dans le plan des deux premiers axes et que l'on ne peut conclure puisque les paramètres et les ob-

servations ne sont pas tous bien expliqués par ces deux axes. Ces proximités disparaissent dans certains cas lorsque l'on tient compte des quatre autres axes alors d'autres se confirment (68-96, 70-125, 74-119).

De façon générale, il semble que les concentrations de chlorophylle, de carbone, d'azote et de phosphore particulaire soient fortes en été et faibles en hiver à toutes les stations, puisque les classes regroupant ces paramètres (70, 73, 74) sont éloignées de la classe 96 (hiver). A la sortie du lac Boivin (station 210), les concentrations de ces paramètres étaient en général plus fortes durant l'été 1976 qu'en 1975, ce qui reflète la plus grande disponibilité de l'azote inorganique. Le comportement du phosphore particulaire aux stations 101 et 103 paraît différent de celui observé à l'entrée et à la sortie du lac Boivin. Les concentrations y semblent en effet plus influencées par les apports dus à l'érosion des sols et des berges.

On peut difficilement conclure quant au comportement des solides en suspension, car ce paramètre est souvent mal représenté. Il en est de même du phosphore total soluble. Notons simplement que les concentrations de solides en suspension sont souvent fortes en temps de crue, et que la construction du barrage de Shefford Vale (déboisement du futur réservoir) paraît avoir accentué l'érosion dans ce secteur, ce qui influence les concentrations à la station 103. Quant à la silice, les nitrates, l'azote ammoniacal et le potentiel de fertilité, leurs concentrations sont fortes en hiver et au début du printemps et faibles en été, ce qui est la conséquence du cycle de la production primaire comme dans le cas de la chlorophylle, du carbone, de l'azote et du phosphore particuliers. Ceci est particuliè-

rement évident aux stations 105 et 210 (lac Boivin) où l'influence des changements de débit est minimum.

#### 4.2 Evolution temporelle des concentrations à la station 101 (Savage Mills)

L'étude globale faite à la section précédente (4.1) met en évidence les caractéristiques générales de l'évolution temporelle des concentrations aux quatre stations. On montre maintenant comment l'approche appliquée à un seul site permet une meilleure analyse. Cette approche pourrait être utilisée pour chacune des quatre stations, mais cela serait trop long et hors du cadre de cette étude. Les stations subissant des influences diverses (tableau 1.2), le comportement des paramètres peut y être différent. On a considéré un seul site, celui de Savage Mills (station 101), représentatif de stations de rivière situées en aval d'une agglomération urbaine. C'est aussi le cas de la station de Shefford Vale (103), mais il n'y a pas eu mesure du potentiel de fertilité à cet endroit, alors que cela a été fait pour Savage Mills.

On utilise encore ici l'analyse factorielle de correspondance et la classification ascendante hiérarchique, mais ces méthodes sont maintenant appliquées à un tableau de départ codé. Le tableau initial comprend 65 lignes d'observations et 10 colonnes de paramètres. La correspondance entre les numéros d'observation et les dates d'échantillonnage est la même qu'aux sections 3.1 et 4.1 et les paramètres étudiés sont aussi les mêmes. L'intervalle de variation d'un paramètre est divisé en trois classes d'effectif à peu près constant, afin d'obtenir des classes quasi-équiprobables pour préserver la stabilité de l'analyse (cf. annexe A). Une observation appartenant à une

classe est codée 1 pour celle-ci et 0 pour les autres. On obtient de cette façon un tableau de valeurs binaires composé de 65 lignes d'observations et 30 colonnes de paramètres. L'analyse d'un tel tableau est plus stable car les classes des paramètres ont à peu près le même poids et interviennent de façon mieux proportionnée dans la définition des axes principaux, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise des valeurs non codées. Le codage a été effectué automatiquement. Les symboles utilisés pour représenter les paramètres sont les mêmes qu'à la section 4.1, sauf qu'on ne tient pas compte du chiffre représentant les stations (puisque l'on considère uniquement la station 101) et qu'on ajoute après le symbole un nombre indiquant s'il s'agit de valeurs faibles (1), intermédiaires (2) ou fortes (3). Le tableau 4.4 indique quel est l'effectif de chacune des classes des paramètres, classes qui sont approximativement équiprobables, et telles que la somme des effectifs donne les 65 observations de départ.

On tentera donc, dans les pages qui suivent, de connaître l'évolution temporelle des concentrations des 10 paramètres à la station 101, en étudiant le regroupement des points observations et des points paramètres.

#### 4.2.1 Axes factoriels

Après dix axes factoriels le pourcentage de variabilité expliquée cumulée atteint un palier de 81.8%. La C.A.H. a donc été appliquée à un ensemble de points pour lesquels on a considéré les coordonnées dans l'espace des dix premiers axes principaux. Les tableaux 4.5 et 4.6 indiquent respectivement la qualité de la représentation des points paramètres et observations dans cet espace. La représentation est bonne en général sauf dans

TABLEAU 4.4 Effectif des classes des paramètres

PARAMÈTRE	VALEURS FAIBLES	VALEURS INTERMÉDIAIRES	VALEURS FORTES
SiO <sub>2</sub>	23	20	22
NH <sub>4</sub>	21	23	21
NO <sub>3</sub>	22	22	21
P <sub>t</sub>	22	19	24
C <sub>part</sub>	22	22	21
N <sub>part</sub>	22	21	22
P <sub>part</sub>	23	21	21
ChlO <sub>a</sub>	22	22	21
S.S.	21	22	22
P.F.	21	21	23
Débit <sup>†</sup>	21	22	22
Temp <sub>eau</sub> <sup>†</sup>	22	21	22

<sup>†</sup> Paramètres n'influençant pas la détermination des axes factoriels, mais considérés comme variables supplémentaires.

TABLEAU 4.5 Qualité de la représentation des points paramètres.

PARAMÈTRE	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION
SI1	.806
SI2	.786
SI3	.848
NH1	.904
NH2	.851
NH3	.826
NO1	.871
NO2	.875
NO3	.886
PT1	.867
PT2	.825
PT3	.787
CP1	.852
CP2	.766
CP3	.833
NP1	.835
NP2	.826
NP3	.810
PP1	.855
PP2	.750
PP3	.802
CH1	.776
CH2	.869
CH3	.762
SS1	.697
SS2	.818
SS3	.888
PF1	.765
PF2	.733
PF3	.779
DE1	.489
DE2	.189
DE3	.450
TE1	.449
TE2	.230
TE3	.318

TABLEAU 4.6 Qualité de la représentation des points observations

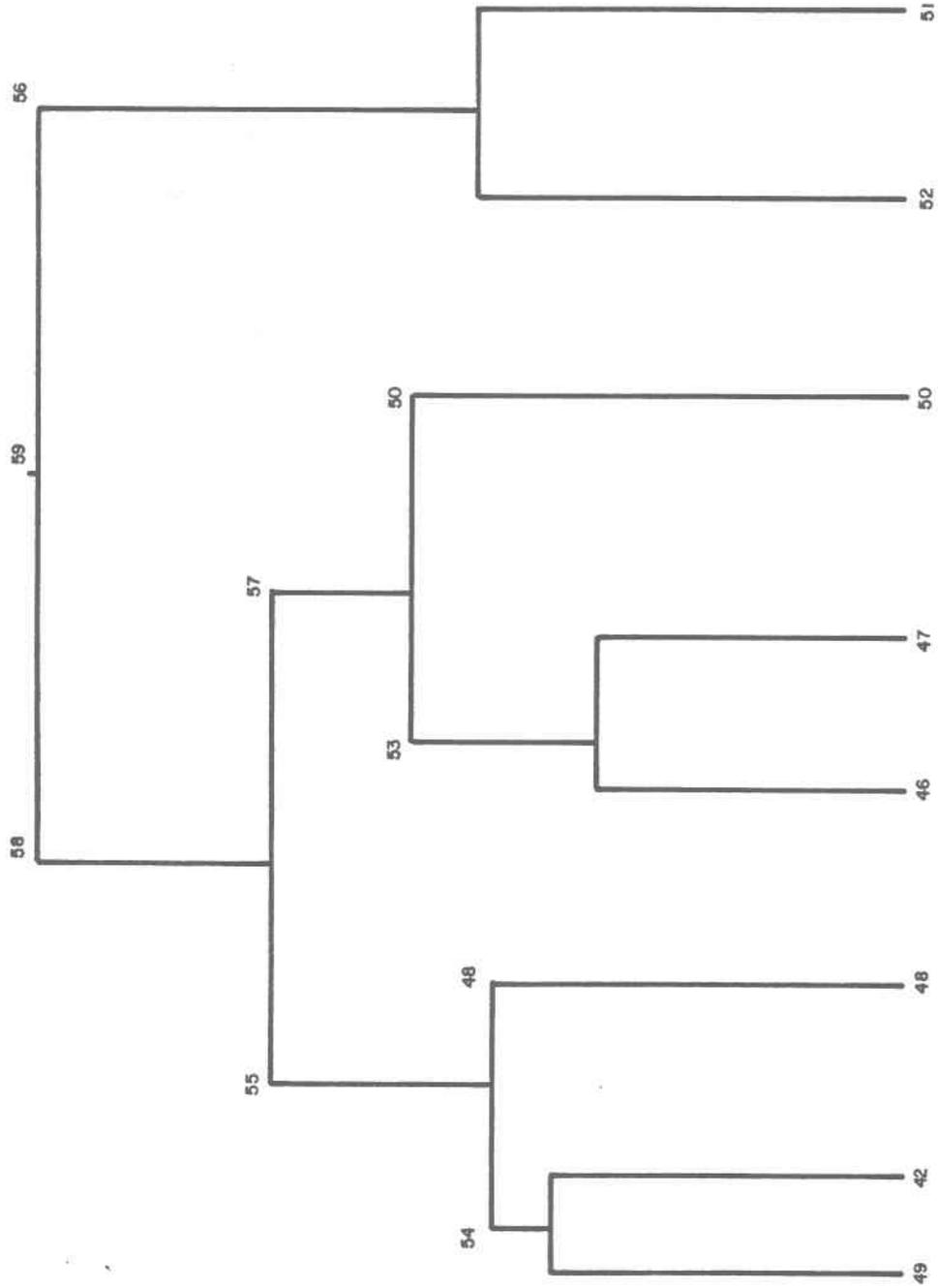
OBSERVATION	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION	OBSERVATION	QUALITÉ DE LA REPRÉSENTATION
1	.916	34	.727
2	.746	35	.867
3	.972	36	.744
4	.856	37	.910
5	.741	38	.950
6	.796	39	.937
7	.835	40	.908
8	.772	41	.720
9	.773	42	.860
10	.783	43	.900
11	.657	44	.735
12	.909	45	.908
13	.622	46	.818
14	.563	47	.827
15	.640	48	.738
16	.731	49	.937
17	.946	50	.759
18	.884	51	.638
19	.866	52	.840
20	.647	53	.791
21	.746	54	.905
22	.910	55	.759
23	.957	56	.738
24	.728	57	.724
25	.969	58	.927
26	.736	59	.802
27	.882	60	.872
28	.879	61	.899
29	.864	62	.798
30	.753	63	.934
31	.734	64	.807
32	.869	65	.865
33	.940		

le cas des paramètres mis en points supplémentaires, soit le débit et la température, qui n'influencent pas l'orientation des axes principaux.

#### 4.2.2 Regroupement des points paramètres en classes

La figure 4.3 représente l'arbre hiérarchique obtenu en considérant huit classes de points paramètres. On tient alors compte de 50% de l'inertie du nuage de points dans l'espace de dix premiers axes. La composition de ces classes est décrite au tableau 4.7.

On remarque en premier lieu que le carbone (CP), l'azote (NP) et le phosphore particuliers (PP) sont toujours regroupés ensemble (classes 52, 50, 42). L'évolution temporelle des concentrations est donc de même type pour ces trois paramètres. Le comportement de la chlorophylle, sauf en ce qui concerne les valeurs intermédiaires, ressemble de plus à celui de ces trois paramètres. Les nitrates, le potentiel de fertilité et la silice se comportent de façon assez semblable bien que l'on note une différence au niveau des concentrations faibles. En effet, les classes 46 et 47 voisines (figure 4.3) regroupent les valeurs faibles de ces trois paramètres, alors que les classes 51 et 48 comprennent respectivement les valeurs intermédiaires et fortes de silice, nitrates et potentiel de fertilité (tableau 4.7). La figure 4.4 illustre bien les liens qui existent entre ces paramètres, dont les trajectoires dans le plan des deux premiers axes principaux se ressemblent. Il est normal que des points, voisins dans un espace à dix dimensions (C.A.H.), se retrouvent proches en projection dans un sous-espace à deux dimensions. Ces ressemblances rappellent d'ailleurs celles observées lors de l'étude des relations entre paramètres (tableaux 3.10, 3.11, 3.12 et 3.18).



**Figure 4.3 . Arbre hiérarchique obtenu avec 8 classes de points paramètres .**

TABLEAU 4.7 Composition des classes de points paramètres.

49	42	48	46	47	50	52	51
NH1	CP2	SI3	NH2	SI1	CP3	CP1	SI2
PT2	NP2	NO3	NO1	PT3	NP3	NP1	NO2
SS1	PP2	PF3	PF1	CH2	PP3	PP1	PT1
		SS2			CH3	CH1	PF2
					SS3	NH3	

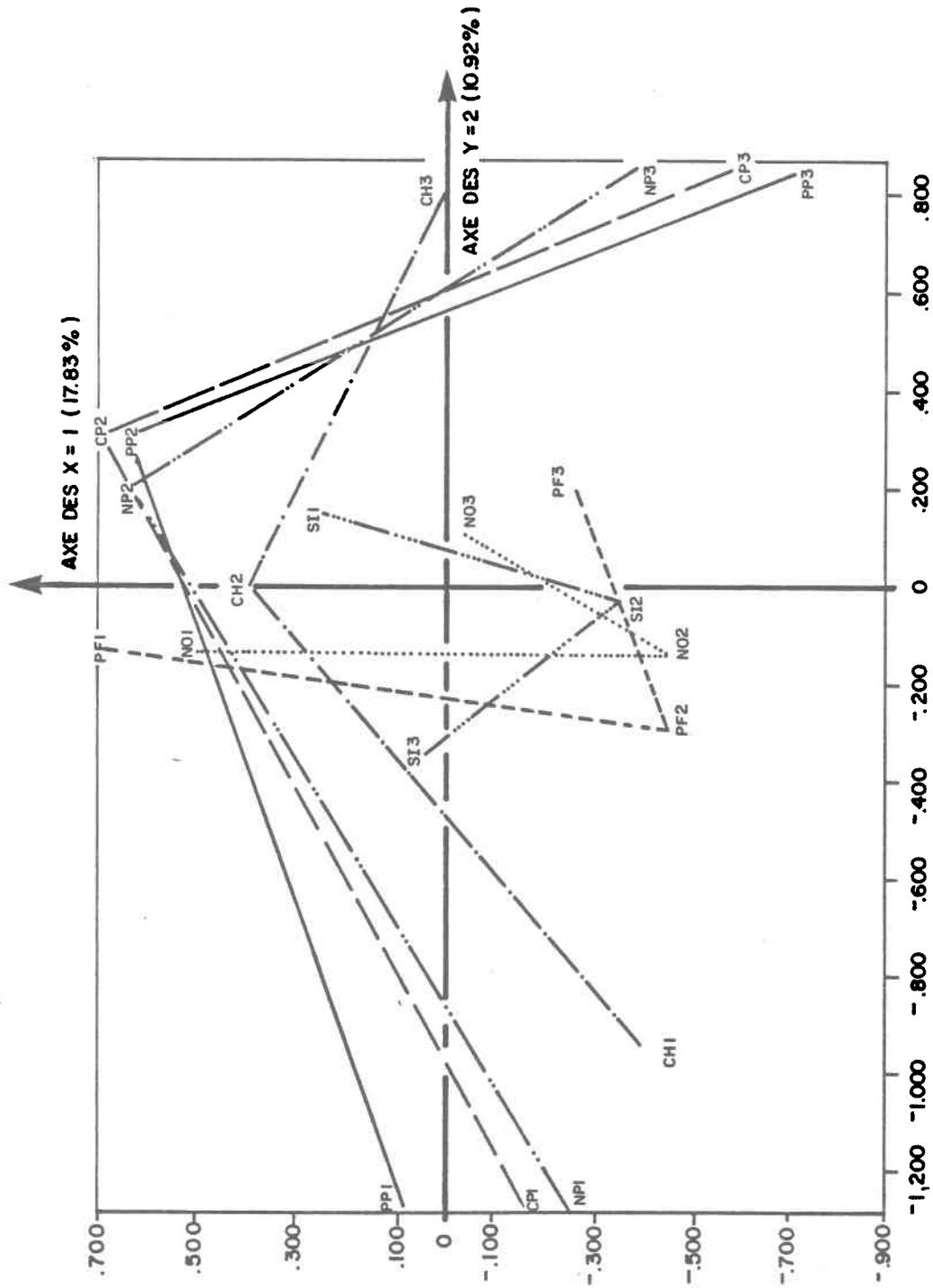


Figure 4.4 . Trajectoires du carbone , de l'azote , du phosphore particulière , de la chlorophylle , des nitrates , de la silice et du P.F. dans le plan des axes 1 et 2 .

Un examen du tableau initial de données indique que les valeurs intermédiaires de chlorophylle sont observées surtout durant la période d'activité biologique de 1975. Or durant cette période, on n'a trouvé aucune corrélation entre le carbone, l'azote, le phosphore particuliers et la chlorophylle. C'est donc le même phénomène que l'on note ici. Quant à la silice, c'est habituellement au printemps que surviennent des valeurs faibles de ce paramètre, la silice étant assimilée par les diatomées, qui dominent fréquemment au printemps (Swertz *et al.*, 1971; Edwards, 1974; Wang et Evans, 1969; Mac Crimmon et Kelso, 1970). Dans le cas des nitrates (et donc d'une certaine façon du P.F.), le niveau des concentrations est faible durant tout l'été, non pas uniquement en période de dominance des diatomées, et très variable étant donné les augmentations brusques causées par les pluies; en effet, plusieurs chercheurs ont noté l'existence d'une corrélation positive entre le débit et les concentrations de nitrates (Campbell *et al.*, 1976c, Casey et Newton, 1972; Edwards, 1973; Johnson et Likens, 1969). Ceci est dû au fait que les nitrates proviennent de sources diffuses.

Le regroupement des paramètres en classes indique aussi qu'à des valeurs faibles de carbone, d'azote, de phosphore particuliers et de chlorophylle sont associées des teneurs élevées en azote ammoniacal (classe 52). Ceci se produit probablement en hiver, alors que l'activité autotrophe est faible et que la nitrification de l'azote ammoniacal en provenance des égouts de la ville de Waterloo est sensiblement ralentie par les températures froides. On note aussi, que d'après le tableau 4.7, que les fortes concentrations de solides en suspension, de carbone, d'azote et de phosphore particulière et aussi de chlorophylle surviennent aux mêmes moments (classe 50), ce qui peut être relié à de fortes poussées d'algues ou à des apports provenant du bassin versant.

#### 4.2.3 Contribution des observations à la séparation en classes

La représentation simultanée, dans le plan des deux premiers axes factoriels, des centres de gravité des classes de paramètres et d'observations peut difficilement être utilisée dans le cas qui nous concerne ici, pour étudier l'évolution temporelle des concentrations, puisque ces deux axes n'expliquent que 29% de la variabilité du nuage. Les données sont en effet caractérisées par une grande variabilité puisqu'on doit prendre en compte un nombre considérable d'axes et de classes (10 axes et 8 classes). On se trouvait cependant au départ dans un espace à 65 dimensions (65 observations), et il est avantageux d'avoir 82% de variance expliquée avec 10 axes. En rivière, les concentrations des paramètres étudiés varient donc beaucoup étant donné l'influence majeure que représente les changements de débits qui y surviennent. Les rivières sont des milieux très dynamiques, et c'est ce qui rend difficile l'étude des variations temporelles des concentrations.

A défaut de représentation visuelle des correspondances entre observations et paramètres, on s'intéresse plutôt aux contributions relatives des observations à l'éloignement des centres de gravité des classes au centre du nuage (tableau 4.8).

Ainsi, on remarque que les observations faites durant les périodes d'activité biologique\* contribuent de façon négative ou pratiquement nulle à l'éloignement de la classe 52, alors que celles faites en hiver et au printemps ont des contributions positives, et assez fortes. Des con-

---

\* Le tableau 3.7 donne la correspondance entre les numéros d'observations et les dates d'échantillonnage. P.A.B. 1975: #2 à 26; P.A.B. 1976: #41 à 65.

TABLEAU 4.8 Contributions relatives des observations<sup>†</sup> à l'éloignement des centres de gravité des classes (paramètres) au centre du nuage.

Classes $\rho^2$ ††	52	51	50	49	48	47	46	42
Observations	1.15	.79	1.05	1.03	.83	.86	1.13	1.26
1	<u>.05</u>	<u>.03</u>	-.01	-.01		-.01	<u>-.01</u>	-.01
2	<u>.05</u>	<u>.03</u>	-.01	-.01		-.01	<u>-.01</u>	-.01
3	<u>.01</u>	-.02	-.02	<u>.02</u>	-.02	<u>.06</u>		
4	-.01	-.02	<u>.03</u>	-.01	-.02	<u>.05</u>	.05	-.01
5		-.01	<u>.05</u>	-.01	<u>.01</u>	<u>.01</u>	-.01	-.01
6		<u>.05</u>		-.01	-.02	<u>.01</u>	-.02	
7		-.02	<u>.01</u>		-.03		.05	
8			<u>.01</u>	-.01	-.01	<u>.04</u>		
9		-.02		-.02		<u>.02</u>	-.01	<u>.01</u>
10	-.01		<u>.05</u>	-.01	-.02	<u>.02</u>	.01	-.01
11			<u>.03</u>	-.02	-.02	<u>.02</u>		-.01
12	-.01			-.03		<u>.02</u>		
13	-.01	-.03	<u>.03</u>	-.02	<u>.02</u>	<u>.02</u>		-.01
14			<u>.01</u>	-.02		<u>.03</u>	.01	-.02
15	-.02	-.03			<u>.03</u>	<u>.01</u>		
16	-.02		<u>.01</u>	-.01	-.02		.05	<u>.02</u>
17			-.01	<u>.01</u>	-.02		.01	<u>.06</u>
18	-.01	-.02	-.01		<u>.02</u>	<u>.06</u>	-.01	<u>.05</u>
19	-.01		-.01	-.03	<u>.03</u>	<u>.01</u>		<u>.05</u>
20	-.01	-.02		-.01	<u>.07</u>			<u>.05</u>
21	-.01	<u>.03</u>		-.01		-.01		<u>.04</u>
22	-.02	-.02			<u>.02</u>	<u>.06</u>	-.02	
23	-.01	-.02		<u>.02</u>	<u>.06</u>	-.01	-.01	<u>.05</u>
24	-.02	-.02	<u>.03</u>		<u>.03</u>	<u>.01</u>	-.01	-.01
25			-.02	-.01		<u>.06</u>		
26	-.01		<u>.06</u>	-.01		-.02	.05	-.01
27	-.02			-.01			.05	<u>.01</u>
28	-.02	<u>.04</u>		<u>.02</u>	-.02		<u>-.01</u>	<u>.01</u>
29	-.01	<u>.01</u>		<u>.02</u>	-.02	<u>.02</u>	<u>-.01</u>	<u>.05</u>
30	<u>.01</u>	<u>.03</u>		-.02			<u>-.01</u>	-.01

<sup>†</sup> Le tableau 3.7 donne la correspondance entre les numéros d'observations et les dates d'échantillonnage. P.A.B. 1975: #2 à 26; P.A.B. 1976: #41 à 65.

<sup>††</sup>  $\rho^2$  est une indication de l'éloignement du centre de gravité des classes du centre du nuage.

TABLEAU 4.8 (suite)

Classes $\rho^2$	52	51	50	49	48	47	46	42
Observations	1.15	.79	1.05	1.03	.83	.86	1.13	1.26
31				-.02		-.02	<u>-.01</u>	<u>.01</u>
32	<u>.03</u>	-.01	-.01		<u>.03</u>		<u>-.02</u>	
33	<u>.04</u>		-.02		<u>.02</u>	-.02	<u>-.01</u>	-.01
34	<u>.05</u>		-.01	-.01	<u>.06</u>	-.02	<u>-.01</u>	-.01
35	<u>.01</u>	-.03	-.01	<u>.02</u>	<u>.02</u>	-.02	<u>-.01</u>	.01
36	<u>.04</u>	-.01	-.02		<u>.06</u>	-.01	<u>-.02</u>	-.01
37	<u>.01</u>	<u>.03</u>		-.01		-.01	<u>-.02</u>	.01
38	<u>.04</u>	<u>.08</u>		-.01	-.02	-.01	<u>-.01</u>	-.01
39	<u>.06</u>	<u>.07</u>	-.01		-.02	-.02	<u>-.01</u>	-.01
40	<u>.05</u>	<u>.03</u>	-.01		-.02	-.02		-.01
41	<u>.02</u>	-.02	-.02	<u>.02</u>	-.02		.05	-.01
42			-.01	<u>.02</u>	-.02	<u>.01</u>		
43	.01		-.02	-.01		<u>.01</u>	.05	-.01
44	-.02						.01	<u>.05</u>
45			-.01	<u>.02</u>	-.02	<u>.01</u>	.02	
46	.01	-.01	-.02	<u>.08</u>	-.02	<u>.01</u>	.01	-.01
47				-.01	<u>.01</u>	<u>.01</u>	-.02	.01
48	<u>.03</u>		-.01					-.01
49	.01	-.03	-.02		<u>.03</u>	<u>.01</u>		-.01
50	-.01	<u>.07</u>	<u>.06</u>		-.02	-.01	-.01	-.01
51			<u>.06</u>	-.01		-.02	-.01	-.01
52	-.01		<u>.04</u>	<u>.01</u>		-.03		-.01
53	-.02	-.02		<u>.04</u>	<u>.03</u>	-.01		<u>.05</u>
54	<u>.03</u>		-.01	<u>.01</u>		-.01		-.01
55	.01		-.02	<u>.08</u>		<u>.02</u>	-.01	-.02
56	-.01			<u>.08</u>	-.02	-.02	.01	<u>.02</u>
57	-.02		<u>.03</u>	<u>.03</u>		-.01	-.02	-.01
58			<u>.01</u>	<u>.03</u>		<u>.01</u>	-.02	-.01
59	-.01	<u>.01</u>	<u>.06</u>			-.02		-.01
60	-.01	<u>.03</u>	<u>.01</u>	-.02		-.02		
61	.01	-.01	-.02				.05	-.01
62	-.01			-.01			.05	<u>.01</u>
63	-.01	<u>.01</u>		<u>.01</u>		-.03		<u>.01</u>
64	-.01	<u>.04</u>		<u>.02</u>	-.02	-.02		<u>.01</u>
65	<u>.03</u>		-.01	<u>.02</u>		-.02		

centrations faibles de chlorophylle, de carbone, d'azote et de phosphore particulaires, ainsi que des teneurs fortes en azote ammoniacal sont donc observées en hiver et au printemps, alors que la production autotrophe est faible. Certaines observations de la période d'activité biologique de 1976 contribuent aussi de façon importante et positive à l'explication de cette classe (48, 54, 65). L'observation 48 survient en temps d'étiage après la poussée d'algues du printemps. Il est possible qu'il s'agisse là d'une période transitoire, où il y a changement de population d'algues. En effet, l'examen des courbes de concentration en fonction du temps indique que les concentrations de nitrates augmentent à cette même période, bien qu'il n'y ait pas d'apports par ruissellement. Si la production primaire est ralentie, les nitrates provenant de la nitrification de l'azote ammoniacal des égouts de Waterloo sont moins utilisés et les concentrations augmentent. A la fin d'octobre (#65), l'activité autotrophe n'est pas très forte non plus. Quant à l'observation 54 faite après une période de pluies abondantes et en temps de débit faible, il n'y a pas à première vue de raisons expliquant une baisse de production. Cependant il est possible que beaucoup de périphyton est alors été arraché et que les algues recommencent à croître.

Des valeurs intermédiaires de silice, nitrates et P.F. ainsi que des concentrations faibles de phosphore (classe 51) apparaissent surtout, d'après le tableau 4.8, au début du printemps et à l'automne. Il existe à ces périodes une certaine production autotrophe, qui n'est cependant pas très forte. Il y a donc peu d'assimilation de silice et de nitrates ce qui tend à en augmenter les concentrations. Les débits assez élevés dans certains cas occasionnent par contre une certaine dilution.

La classe 50 se distingue par des observations qui appartiennent aux périodes où la production primaire est importante, surtout en 1975. En 1976, bien que des concentrations fortes de  $C_{part}$ ,  $N_{part}$ ,  $P_{part}$ ,  $Chl\alpha$ , S.S. soient observées, les variations sont plus importantes à cause des pluies, alors qu'en 1975 les teneurs sont moins variables, quoique moins élevées (tableau 3.9). Le tronçon 100-101 bénéficie, même en période de sécheresse, d'apports importants de nitrates à cause de la nitrification de l'azote ammoniacal provenant des égouts de la ville de Waterloo.

C'est surtout durant la période d'activité biologique de 1976, que l'on observe des concentrations faibles d'azote ammoniacal, de solides en suspension, et des teneurs intermédiaires de phosphore soluble (classe 49). Ceci s'explique par un effet de dilution, puisque l'été 1976 fut assez pluvieux, surtout à partir de la fin juin (#49 et suivants). Il est cependant surprenant que les concentrations de solides en suspension soient plus faibles en 1976 qu'en 1975, les débits élevés étant normalement associés à de fortes concentrations de solides en suspension.

En ce qui concerne la classe 48, qui regroupe les valeurs fortes de silice, de nitrates et de PF, ainsi que les teneurs intermédiaires de solides en suspension, ce sont des observations d'hiver et du début de l'automne 1975 qui contribuent de façon positive à l'éloignement du centre du nuage. Durant le mois de septembre et le début d'octobre 1975, il semble y avoir eu un peu de pluie, les débits étant plus élevés. Etant donné que le sol était très sec à la fin de l'été 1975, il peut avoir été, lors de ces pluies, facilement lessivé, d'où des apports de nitrates et de silice. En hiver, comme la production primaire est fai-

ble, les concentrations de silice et de nitrates sont fortes puisqu'il y a peu d'assimilation.

La classe 47 est assez particulière. Elle se compose de valeurs faibles de silice, fortes de phosphore soluble et intermédiaires de chlorophylle; il s'agit là d'un regroupement hétérogène. Une telle situation semble être observée durant la période d'activité biologique de 1975 et, à un degré moindre, en 1976. Les concentrations de phosphore sont fortes lorsque le débit est faible, ce qui était le cas en 1975 et à certains moments en 1976. Au printemps (mois de mai et juin) il y a une forte assimilation de silice par les diatomées, qui se poursuit aussi durant l'été mais de façon habituellement moins marquée. Quant aux teneurs en chlorophylle, elles étaient plus faibles en 1975, l'azote étant alors plus limitant. Il est bon de rappeler que le tableau 4.8 fournit des indications qui concernent l'ensemble des paramètres de la classe, ce qui complique l'interprétation quand l'ensemble est varié, comme c'est le cas ici.

C'est en période d'activité biologique que l'on retrouve des valeurs faibles de nitrates et de P.F. et intermédiaires d'azote ammoniacal (classe 46), et cela toujours à cause du cycle de la production primaire. La tendance n'est cependant pas très marquée, car à cause des apports par ruissellement, on peut observer des concentrations de nitrates assez fortes mais transitoires, en été. On remarque cependant l'effet inverse, c'est-à-dire qu'on n'observe pas de valeurs faibles à la fin de l'automne, en hiver et au début du printemps puisque les contributions de ces observations sont négatives.

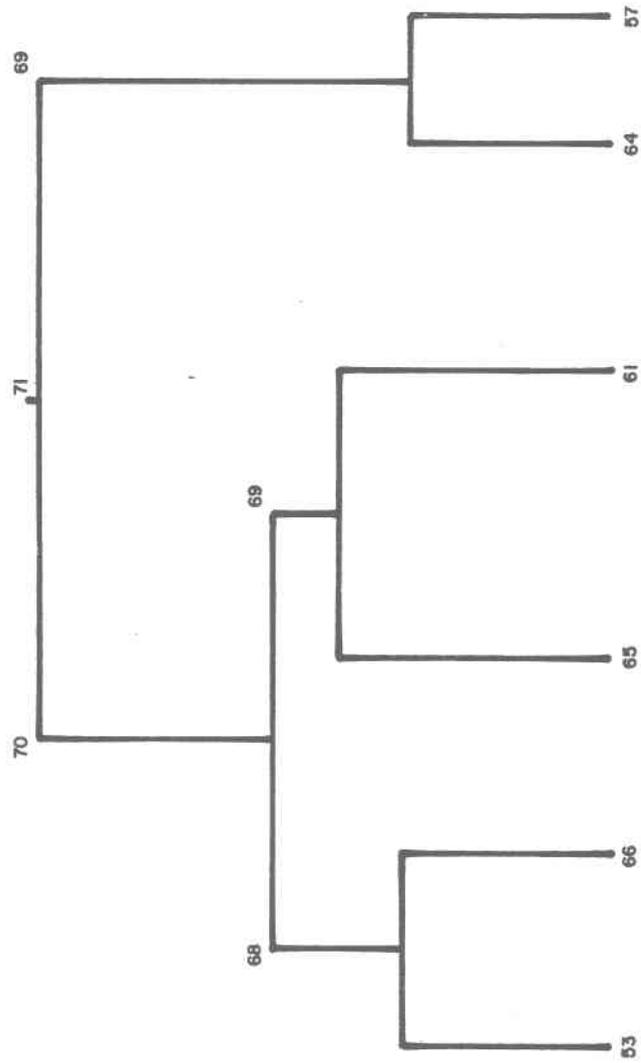
Quant aux concentrations intermédiaires de carbone, d'azote et de phosphore particulaires (classe 42), on les remarque surtout en 1975 et durant la période automnale, alors que la production autotrophe est ralentie.

#### 4.2.4 Paramètres supplémentaires: débit et température

Le regroupement obtenu en tenant compte des paramètres mis en points supplémentaires, soit le débit et la température, est quelque peu différent de celui trouvé précédemment. L'arbre hiérarchique est illustré à la figure 4.5 et le tableau 4.9 décrit la composition de six classes retenues. Le débit et la température sont cependant assez mal représentés par les dix premiers axes (tableau 4.5) et la classification des points paramètres les représentant n'est donc pas très significative. Le regroupement en classes indique que le phosphore total soluble varie inversement avec le débit (classes 66, 65, 64), et donc qu'il provient d'une source ponctuelle comme les égouts de Waterloo, puisqu'il subit un effet de dilution. Plusieurs chercheurs ont d'ailleurs observé ce phénomène aux sites d'échantillonnage influencés par des rejets d'égouts (Cahill *et al.*, 1974; Edwards, 1973; Wang et Evans, 1970). Sur une base annuelle, aucun autre paramètre n'a de tendance marquée en ce qui concerne les variations de concentration avec le débit, ni avec la température.

#### 4.2.5 Regroupement en classes des points observations

En ce qui a trait au regroupement en classes des points observations, on présente à la figure 4.6 l'arbre hiérarchique obtenu avec huit classes dont on décrit la composition au tableau 4.10. En considérant huit



**Figure 4.5 . Arbre hiérarchique obtenu avec six classes de points paramètres avec le débit et la température comme paramètres supplémentaires .**

TABLEAU 4.9 Composition des classes de points paramètres incluant le débit et la température.

53	66	65	61	64	57
CP2	NH1	NO3	CP3	SI3	SI2
NP2	PT2	PF3	NP3	NH3	NO2
PP2	SS1	SS2	PP3	PT1	PF2
	TE2	SI1	CH3	CH1	
	DE2	PT3	SS3	TEL	
	NH2	CH2		DE3	
	NO1	TE3		CPI	
	PF1	DEL		NP1	
				PPI	

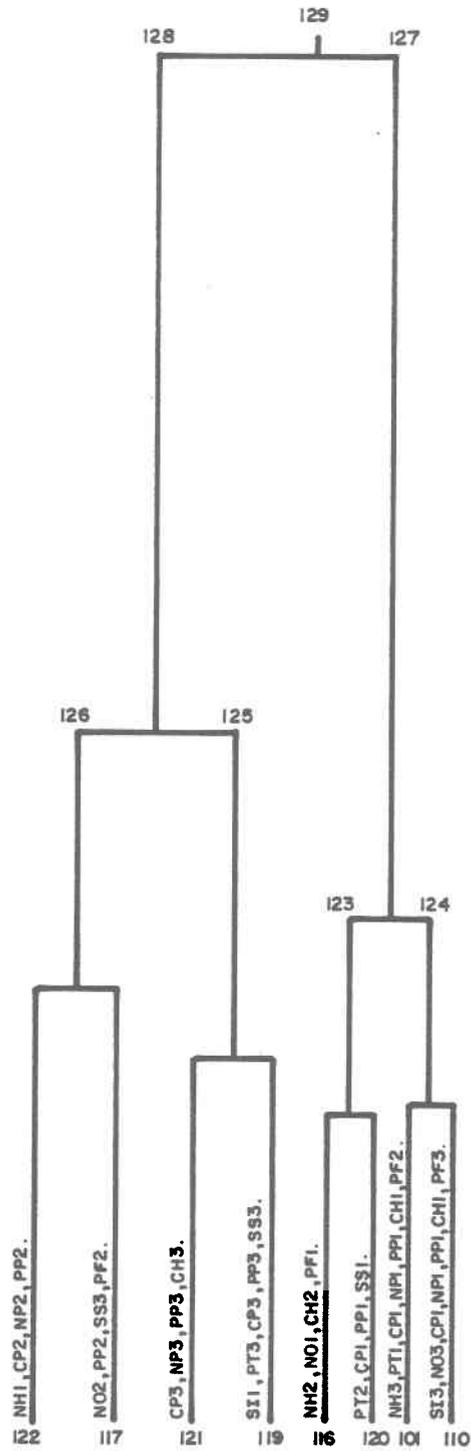


Figure 4.6 . Arbre hiérarchique obtenu avec 8 classes de points observations .

TABLEAU 4.10 Composition des classes de points observations\* .

122	117	121	119	116	120	101	110
16	5	4	3	24	2	1	31
17	20	12	6	26	40	37	32
18	27	14	7	42	41	38	33
19	28	21	8	60	44	39	34
22	29	23	9	61	45	53	35
43	30	25	10		54		47
52	36	49	11		64		48
55		50	13		65		
63		51	15				
		56	46				
		57					
		58					
		59					
		62					

\* Voir tableau 3.7 pour la correspondance entre les numéros d'observations et les dates d'échantillonnage.

groupes d'observations, on tient compte de 50% de l'inertie sur les dix premiers axes.

On n'interprêtera pas ici le regroupement en classes des observations, car l'information ainsi obtenue est à peu près équivalente et redondante à celle tirée de l'étude des points paramètres. On se limite donc à indiquer à la figure 4.6 les paramètres qui caractérisent chacune des classes d'observations.

#### 4.2.6 Evolution temporelle des concentrations à la station 101

Bien que les concentrations des paramètres soient très variables à la station 101, certains cycles annuels se dégagent tout de même. Ainsi les concentrations de carbone, d'azote, de phosphore particulaires et de chlorophylle sont faibles à l'hiver et au début du printemps et fortes en période d'activité biologique. C'est l'inverse en ce qui concerne la silice, les nitrates et le potentiel de fertilité, quoique les teneurs puissent être fortes en été à cause des apports soudains de nitrates et de silice lors des pluies. L'évolution temporelle du potentiel de fertilité suit bien celle de nitrates, du moins sur une base annuelle, l'azote étant le principal facteur chimique limitant la production primaire dans la Yamaska-Nord.

Les concentrations de phosphore total soluble, qui provient principalement des égouts de la ville de Waterloo, semblent varier inversement avec le débit et subissent donc un effet de dilution. C'est durant l'été 1975 que les teneurs sont les plus fortes, les débits ayant aussi été les plus faibles à cette période. En ce qui a trait à l'azote ammoniacal, les concentrations les plus élevées sont observées en hiver, car la nitrification est alors ralentie et l'assimilation par les algues est à son minimum.

En été, c'est l'inverse et l'on trouve alors des valeurs faibles de  $\text{NH}_3$  particulièrement en 1976. Les comportements de l'azote ammoniacal et des nitrates semblent très différents puisque ces paramètres ne se retrouvent pas dans les mêmes classes, ce qui pourrait être dû au fait que l'azote ammoniacal provient surtout des égouts de la ville de Waterloo, alors que les sources diffuses sont assez importantes dans le cas des nitrates. Quant aux solides en suspension, des valeurs intermédiaires sont observées en même temps que des concentrations fortes de nitrates et de silice donc en hiver. Des teneurs fortes surviennent concurremment à celles de carbone, d'azote, de phosphore particuliers et de chlorophylle donc en été. Enfin les concentrations les plus faibles de solides en suspension sont associées à celles de l'azote ammoniacal qui se produisent aussi en été, particulièrement en 1976. Il n'y a donc pas de cycle annuel évident dans le cas de ce paramètre.

#### 4.3 Aspect méthodologique de l'étude de la variabilité temporelle

Lors de l'étude globale de la variabilité temporelle aux quatre stations (section 4.1), l'analyse factorielle de correspondance et la classification ascendante hiérarchique ont permis de mettre en évidence, de façon objective et rapide, les grandes lignes du comportement des paramètres étudiés. En effet, si les conclusions trouvées sont relativement simples et générales, elles n'étaient pas particulièrement évidentes à partir d'un simple examen du tableau initial de données qui est de dimension considérable (65 x 39 valeurs), et dont le dépouillement exige beaucoup de temps et demeure parfois subjectif. L'approche peut donc être complémentaire aux analyses traditionnelles puisqu'elle permet un aperçu global des données, tout en ayant l'avantage de l'efficacité et de la rapidité.

Notons toutefois, que le traitement effectué en 4.1 n'est pas l'idéal pour une étude de variabilité temporelle, puisque les caractéristiques de l'évolution temporelle des concentrations sont en partie masquées par les différences de comportement entre stations. Il aurait été préférable de supprimer cet effet spatial en procédant au recentrage des données, comme l'ont d'ailleurs fait Bobée *et al.* (1978) lors d'une étude du St-Laurent, ou d'effectuer le traitement station par station. Toutefois, ceci exige un certain temps et sort du cadre de cette étude. C'est pourquoi on a plutôt choisi d'effectuer une C.A.H. sur les points observations à partir des coordonnées établies lors de l'application de l'A.F.C. à l'étude des relations entre paramètres (section 3.1), et de procéder au traitement détaillé pour une seule station de rivière (station 101). Ce traitement détaillé permet d'ailleurs, comme on l'a vu à la section 4.2, une meilleure analyse de la variabilité temporelle.

De plus, si l'on s'intéresse aux variations de concentrations au cours d'une année, afin d'identifier certains cycles annuels, il peut être préférable de se limiter à une seule année complète, même si on ne peut alors déterminer si le phénomène se répète d'une année à l'autre. En effet, lorsque les étés sont très différents comme c'est le cas ici, l'A.F.C. et la C.A.H. ont tendance à mettre en évidence les changements d'une année à l'autre. L'utilisation de plusieurs années complètes serait sûrement intéressante, mais le nombre élevé d'observations à considérer pourraient alors compliquer l'interprétation des résultats. Il serait également possible, à partir de l'ensemble des dates, d'effectuer au préalable une C.A.H., de manière à obtenir des classes d'observations. Ensuite, on pourrait ne considérer que les centres de gravités de ces classes (affectés d'un poids por-

proportionnel à la taille de la classe) et effectuer l'A.F.C. sur le tableau composé de  $n$  centres de gravité de classes d'observations et de  $p$  paramètres.

## CONCLUSION

La méthodologie développée pour l'identification de relations entre paramètres s'est avérée adéquate et est facilement transposable à l'étude d'autres bassins. On a d'abord identifié de façon théorique les relations potentielles entre paramètres à partir de conditions de relation déduites de la connaissance des éléments principaux affectant les concentrations. Ceci facilite par la suite l'analyse des relations réellement observées. Ensuite, on a effectué une revue des relations déjà mises en évidence pour d'autres bassins. L'information que l'on peut retirer de cette revue de littérature est difficilement transposable cependant, car elle exige une bonne connaissance de l'utilisation du territoire des bassins considérés, et du régime hydrologique des rivières. Le comportement des substances nutritives est en effet très influencé par ces facteurs. On a ensuite vérifié l'existence des relations possibles, d'abord par une étude globale du comportement pour l'ensemble des stations, en utilisant l'analyse factorielle de correspondance (A.F.C.) et la classification ascendante hiérarchique (C.A.H.), puis par des calculs de corrélation effectués pour chacun des sites indépendamment, afin de quantifier davantage les relations. L'approche statistique a ainsi démontré l'influence des conditions hydrologiques extrêmes et de la localisation des sites d'échantillonnage. Les liens observés sont de plus souvent spécifiques à une période d'observa-

tion donnée. Ainsi, les relations dues à des mécanismes de transformation similaires sont souvent plus évidentes sur une base annuelle. Il s'agit alors de ressemblances dans les cycles annuels qui ressortent d'ailleurs plus clairement en lac (station 210) qu'en rivière.

L'étude des relations entre paramètres a aussi mis en évidence l'existence de similitudes de comportement très marquées entre les formes particulières des éléments nutritifs, l'azote et le carbone surtout, et à un degré moindre, avec la chlorophylle. Les formes solubles de ces substances semblent affectées par un ensemble plus variable de facteurs, ce qui diminue la force des relations les impliquant. Cette étude a aussi fait ressortir l'influence déterminante, pour la station 100, des rejets ponctuels de la ville de Waterloo et des apports en chlorophylle et en solides en suspension organique du lac Waterloo. La station 210, située à l'exutoire du lac Boivin, se distingue aussi nettement des autres sites d'échantillonnage (101, 103, 105), les variations de concentration y étant amorties à cause du lac.

Quant à l'étude de la variabilité temporelle des concentrations, elle a fait ressortir les cycles annuels des paramètres. La chlorophylle, le carbone, l'azote et le phosphore particuliers présentent des concentrations maximums en été et minimums en hiver, alors que c'est l'inverse en ce qui concerne les nitrates, la silice, le potentiel de fertilité et l'azote ammoniacal. Ce comportement se reproduit en gros aux stations 101, 103, 105 et 210, et est la conséquence du cycle annuel de la production primaire et, dans le cas de l'azote ammoniacal, du ralentissement des activités de nitrification en hiver. La station 100 n'a pas été étudiée de ce point de vue, car l'échantillonnage y a débuté plus tard qu'aux autres sites. Les solides

en suspension ne montrent pas de cycle annuel évident et leurs concentrations semblent assez influencées par les phénomènes d'érosion et de remise en suspension lors des crues et, en aval de la station 101, par le déboisement de la cuvette du réservoir de Savage Mills, phénomènes qui ont également une certaine incidence sur les teneurs en phosphore particulaire. Le phosphore total soluble, à la station 101, subit des effets marqués de dilution et de concentration, dû aux apports des égouts de Waterloo. De plus, l'étude de la variabilité temporelle met en évidence le fait que durant l'été 1975, l'azote limitait très fortement la production primaire dans le lac Boivin, à cause de la sécheresse de cette période. On note enfin, que les concentrations des différents paramètres étudiés sont très variables à la station 101, qui a été étudiée plus particulièrement, en raison des changements de débit et des apports en provenance du bassin versant.

Les méthodes statistiques employées, soit l'analyse factorielle de correspondance et la classification ascendante hiérarchique, permettent une analyse rapide, objective et globale d'un nombre considérable de données, ce qui constitue un avantage certain dans l'étude du comportement d'un nombre important de paramètres sur un bassin. Dans le cas de l'étude de la variabilité temporelle, ce travail illustre l'intérêt de l'emploi de méthodes multivariées; ces analyses font aussi ressortir le fait qu'il est avantageux d'éliminer l'effet spatial contenu dans les données pour étudier plus particulièrement l'évolution temporelle d'un groupe de paramètres à un ensemble de stations, et qu'il est préférable de traiter une ou plusieurs années complètes si l'on veut mettre en évidence des cycles annuels.

## BIBLIOGRAPHIE

- AUGER *et al.*, (1976). "Rivière Yamaska-Nord, caractérisation de la qualité de l'eau 1975-1976, volume 1: texte". Ministère des Richesses Naturelles, Service Qualité des Eaux, Québec, 52 p.
- BECKWITH, R.S. et REEVE, R., (1964). *Austra J. Soil Res.*, 2 (33).  
(tel que cité par Edwards et Liss, (1973)).
- BELANGER, B., (1977). "Etude de la productivité de la rivière Yamaska-Nord à l'aide des mesures de chlorophylle-a et des potentiels autotrophe et hétérotrophe". Ministère des Richesses Naturelles, Service Qualité des Eaux, Québec, 17 p.
- BENZECRI, J.P., (1973). "L'analyse des données - Tome 2: l'analyse des correspondances". Dunod, Paris, 1ère édition, 619 p.
- BISSON, N., COUTURE, P. et VISSER, S.A., (1978). "Etude de la qualité du milieu aquatique du lac St-Jean et de la rivière Saguenay". INRS-Eau, Québec, Rapport scientifique no 92, 163 p.
- BOBEE, B., BOUCHER, P., CLUIS, D., LACHANCE, N. et TESSIER, A., (1977). "Méthodologie d'évaluation de la qualité de l'eau pour différents usages". INRS-Eau, Québec, rapport scientifique no 89, 69 p.
- BORMANN, F.H., LIBSENS, G.E., SECAMA, T.G., PIERCE, R.S. et EATON, J.S., (1974). "The effect of deforestation on ecosystem export and the steady-state condition at Hubbard Brook". *Ecol. Monogr.*, 44: 255-277.
- BREHMER, L.M., BALL, R.C., KEVERN, N.R., (1969). "Nutrients and primary production in a warm-water stream". Institute of Water Research, Red Cedar River Series, Technical report no 4, 87 p.

- BREZONIK, P.L., (1972). "Nitrogen: sources and transformations", dans "Nutrients in natural water". H.E. Allen et J.R. Kramer (éditeurs), Wiley-Interscience, J. Wiley and Sons, N.Y. Chapitre 1: 1-49.
- CAHILL, T.H., ASLE, N., IMPERATO, P.I. et VERHOFF, F.E., (1974). "Evaluation of phosphorus dynamics in a watershed". Am. Soc. Civ. Eng. Journal of the Environmental Engineering Division, EE2: 439-458.
- CAMPBELL, P.G.C., COUTURE, P., LACHANCE, M. et TALBOT, L., (1976a). "Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières St-François et Yamaska. Vol. 2: Secteur des substances nutritives." Entente Ministère des Richesses naturelles et INRS-Eau, Québec, rapport no Q.E.-17, 127 p.
- CAMPBELL, P.G.C., COUTURE, P., TALBOT, L. et CAILLE, A., (1976b). "Nutrient dynamics in running water: production, assimilation and mineralization of organic matter", dans "Environmental biogeochemistry, vol. 2: Metals transfer and ecological mass balances". Chap. 43: 681-784.
- CAMPBELL *et al.* (1976c). "Effets du décapage de la cuvette d'un réservoir sur la qualité de l'eau emmagasinée: élaboration d'une méthode d'étude et application au réservoir de Victoriaville (rivière Bulstrode, Québec)". INRS-Eau, Québec, rapport scientifique no 37, 304 p.
- CAMPBELL, P.G.C., CLUIS, D. et COUTURE, P., (1979). "Dynamique des transformations des éléments nutritifs: étude de deux réservoirs dans la province de Québec". INRS-Eau, Québec, rapport scientifique no 98 (en voie de rédaction pour Environnement Canada).
- CANN, D.B., LAJOIE, P. et STOBBE, P.C., (1948). "Etude des sols des comtés de Shefford, Brome et Missisquoi, dans la province de Québec". Ministère de l'Agriculture, Ottawa, 94 p.
- CARSON, M.A. et SUTTON, E.A., (1971). "The hydrologic response of the Eaton river basin, Que.". Can. J. Earth Sci., 8: 102-115.

- CASEY, H. et NEWTON, P.V.R., (1972). "The chemical composition and flow of the South Wintherbourne in Dorset". *Freshwater Biology*, 2: 229-234.
- CEASAR, J., COLLIER, R., EDMOND, J., FREY, F., MATISOFF, G., Ng, A. et STALLARD, R., (1976). "Chemical dynamics of a polluted watershed the Merrimack River in Northern New England". *Environmental Science and Technology*, 10(7): 697-704.
- CHIAUDANI, G. et VIGHI, M., (1974). "The N:P ratio and tests with Selenastrum to predict eutrophication in lakes". *Water Research*, 8(12): 1063-1069.
- CLUIS, D. et DUROCHER, H., (1976). "Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières St-François et Yamaska. Vol. 3: secteur du modèle d'apports". Entente Ministère des Richesses naturelles et INRS-Eau, Québec, rapport no Q.E.-18, 105 p.
- DELFINO, J.J. et BYRNES, D.J., (1975). "The influence of hydrological conditions on dissolved and suspended constituents in the Missouri River". *Water, Air and Soil Pollution*, 5 (2): 157-168.
- DILLON, P.J. et KIRCHNER, W.B., (1975). "The effects of geology and land use on the export of phosphorus from watersheds". *Water Research*, Pergamon Press, 9 (2): 135-148.
- EDWARDS, A.M.C., (1973). "The variation of dissolved constituents with discharge in some Norfolk rivers". *Journal of Hydrology*, 18: 219-242.
- EDWARDS, A.M.C., (1974). "Silicon depletions in some Norfolk rivers". *Freshwater Biology*, 4: 267-274.
- EDWARDS, A.M.C. et LISS, P.S., (1973). "Evidence for buffering of dissolved silicon in fresh waters". *Nature*, 243 (5406): 341-342.
- E.P.A., (1971). "Algal assay procedure bottle test". E.P.A., United States Government Printing Office, 82 p.

- GREENE, J.C., MILLER, W.E., SHIROYAMA, T., SOLTERO, R.A. et PUTNAM, K., (1976). "Use of laboratory cultures of Selenastrum Anabaena and the indigeneous isolate Sphaenocystes to predict effects of nutrient and zinc interactions upon phytoplankton growth in Long Lake, Washington". International Symposium on Experimental Use of Algal Cultures in Limnology, Oct. 26-28.
- HYNES, H.B.N., (1970). "The ecology of running waters", University of Toronto Press, Toronto, 555 p.
- JAMBU, M., (1972). "Techniques de classification appliquées à des données de sciences humaines". Thèse de troisième cycle L.S.M., ISUP Université de Paris VI, 272 p.
- JAMBU, M., (1974). "Programme de classification ascendante hiérarchique". Publication du laboratoire de statistique, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 57 p.
- JAMBU, M., (1976). "Sur l'interprétation mutuelle d'une classification hiérarchique et d'une analyse des correspondances". Revue de Statistique appliquée, 24(2): 45-73.
- JOHNSON, N.M. et LIKENS, G.E., (1969). "A working model for the variation in stream water chemistry at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire". Water Resources Research, 5(6): 1353-1363.
- KAMP-NIELSEN, L., (1975). "Seasonal variation in sediment-water exchange of nutrient ions in Lake Esron". Verh. Internat. Verein. Limnol., 19: 1057-1065.
- KERR, P.C., BROCKWAY, D.L., PARIS, D.F., et SANDERS, W.M., (1972). "The carbon cycle in aquatic ecosystems", dans "Nutrients in natural waters". H.E. Allen et J.R. Kramer (éditeurs), Wiley-Interscience, J. Wiley and Sons, N.Y. Chapitre 3: 101-124.

- KOWALCZEWSKI, A. et LACK, T.S., (1971). "Primary production and respiration of the phytoplankton of the rivers Thames and Kennet at Reading". *Freshwater Biology*, 1: 197-212.
- LACHANCE, M. et BOUCHER, P., (1979). "Programme d'analyse factorielle de correspondance". INRS-Eau, Québec, rapport interne, 82 p.
- LACHANCE, M. et SASSEVILLE, J.L., (1976). "Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières St-François et Yamaska". Vol. 4: Secteur des eaux atmosphériques. Entente Ministère des Richesses naturelles et INRS-Eau, Québec, rapport scientifique no 54, 50 p.
- LEBART, L. et FENELON, J.P., (1973). "Statistiques et informatique appliquées". Dunod, Paris, deuxième édition, 457 p.
- LEE, G.F., (1969). "Factors affecting the transfer of materials between water and sediments". Univ. Wisconsin, Madison, Internal Report, 35 p.
- LUNIN, J., (1971). "Agricultural wastes and environmental pollution". *Advances in Environmental Science and Technology*, 2: 215-261.
- MacCRIMMON, H.R. et KELSO, J.R.N., (1970). "Seasonal variation in selected nutrients of a river system". *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 27(5): 837-846.
- MALCOLM, R.L. et DURUM, W.H., (1976). "Organic carbon and nitrogen concentrations and annual organic carbon load of six selected rivers of the United States". Geological Survey Water Supply, paper 1817-F.
- MALO-LALANDE, D., (1976). "L'impact des activités agricoles sur la qualité de la rivière Yamaska". INRS-Eau, Québec, thèse de maîtrise, 195 p.

- MASSE, Jean, (1978). "Projet-cible Yamaska-Nord: approche agricole (lère partie)". Service de protection de l'environnement, Québec, rapport interne, 11 p.
- MILLER, W.E., MALONEY, T.E. et GREENE, J.C., (1974). "Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays". Water Research, 8 (9): 667-679.
- O.P.D.Q. (1976). "Utilisation des eaux du bassin versant de la Yamaska". L'éditeur officiel du Québec, 203 p.
- OWENS, M., (1970). "Nutrient balances in rivers". Water Treatment and Examination, 19: 239-252.
- PARE, D., (1978). "Etude hydrogéologique, bassin versant de la Yamaska". Ministère des Richesses Naturelles, Service des eaux souterraines, Québec, Q.E.-3, 54 p.
- REARDON, J., FORMAN, F.A. et SEARCH, F.L., (1966). "New reactants for the colorimetric determination of ammonia". Chem. Chim. Acta, 14(403).
- RIGLER, F.H., (1973). "A dynamic view of the phosphorus cycle in lakes", dans "Environmental Phosphorus Handbook". E.J. Griffith, A. Beeton, J.M. Spencer et D.T. Mitchell (éditeurs), J. Wiley and Sons, N.Y., Chapitre 30: 539-572.
- SHIROYAMA, T., MILLER, W.E. et GREENE, J.C., (1973). "The effects of nitrogen and phosphorus on the growth of *Selenastrum capricornutum*". Proceedings of Biostimulation and nutrient assessment Workshop, octobre 16-18, Corwallis, Oregon. EPA-660/3-75-034
- SOLTERO, R.A., WRIGHT, J.C. et HORPESTAD, A.A., (1973). "Effects of impoundment on the water quality of the Bighorn river". Water Research, 7 (3): 343-354.

- STAINTON, N.P., ARMSTRONG, F.A. et CAPEL, N.J., (1974). "Chemical analysis of fresh water". Environnement Canada, service des pêches et des sciences de la mer, publication diverse spéciale no 25, Ottawa, 119 p.
- STATISTIQUE CANADA, (1977). "Population: répartition géographique, Division et subdivisions de recensement, province de Québec (recensement 1976)". Ministère de l'industrie et du commerce, 22 p.
- SWERTZ, E., BLANC, P., MEYBECK, N et OLIVE, Ph., (1971). "Etude de la variabilité des éléments nutritifs dans les rivières. Exemple de la Dranse du Chablais". Arch. Sc. Genève, 24(2): 299-304.
- VOLLENWEIDER, R.A., (1968). "Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et des eaux courantes sous l'aspect particulier du phosphore et de l'azote comme facteurs d'eutrophisation". Organisation de coopération et de développement économiques, Paris, 182 p., #DAS/CSI/68.27.
- WANG, W.C. et EVANS, R.H., (1969). "Variation of silica and diatoms in a stream". Limnology and Oceanography, 14: 941-944.
- WANG, W.C., EVANS, R.H., (1970). "Dynamics of nutrient concentrations in the Illinois River". Journal Water Pollution Control Federation 42 (12): 2117-2123.
- WEBER, C.I. et MOORE, D.R., (1967). "Phytoplankton, seston and dissolved organic carbon in the little Miami river at Cincinnati, Ohio". Limnology and Oceanography, 12: 311-318.
- WETZEL, R.G., (1975a). "Limnology". W.B. Saunders Company, 743 p.
- WETZEL, R.G., (1975b). "Primary production", dans River Ecology, studies in ecology, vol. 2. Whitton, B.A. (éditeur), Blackwell, Scientific Publishers Oxford: 230-247.
- WOODS, P.C., (1967). "Management of hydrolic systems for water quality control". Contribution 121, Water Resources Center University of California, Berkeley, Calif. (cité par Lunin, 1971).

## ANNEXE A

### DESCRIPTION DES MÉTHODES STATISTIQUES EMPLOYÉES: ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES ET CLASSIFICATION ASCENDANTE HIÉRARCHIQUE

On décrit ici de façon détaillée, les méthodes statistiques employées pour l'étude globale des relations entre paramètres ainsi que pour celle de la variabilité temporelle, c'est-à-dire l'analyse factorielle des correspondances et la classification hiérarchique ascendante. Ces textes ont été tirés de Bobée *et al.*, (1978).

#### A.1 Analyse factorielle des correspondances (A.F.C.)

La méthode d'analyse factorielle des correspondances développée par Benzécri (1973) est un outil mathématique utilisé de plus en plus pour l'analyse de grands tableaux de données. Dans l'analyse, on considère un tableau de nombres positifs comprenant  $n$  lignes et  $p$  colonnes,  $x_{ij}$  étant un élément du tableau. Ce tableau peut, par exemple, correspondre à un ensemble d'observations de différents paramètres chimiques,  $x_{ij}$  repré-

sentant alors l'observation  $i$  du paramètre  $j$ . La description d'un tel tableau en montrant des similitudes de paramètres ou d'observations ne peut se faire sans la définition d'une distance entre observations ou paramètres permettant d'observer ces similitudes. Puisque les paramètres mesurés sont souvent d'ordres de grandeur différents, on est amené à faire subir une transformation au tableau des données afin de résoudre le problème d'échelle et obtenir une stabilité dans l'analyse. C'est pourquoi, dans l'A.F.C. on calcule:

- la somme de chacune des lignes  $x_j = \sum_{i=1}^n x_{ij}$
- la somme de chacune des colonnes  $x_i = \sum_{j=1}^p x_{ij}$
- la somme de tous les éléments du tableau  $x = \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^p x_j$

Chacun des éléments du tableau est alors transformé:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{x}$$

La somme des lignes  $x_i$  et la somme des colonnes  $x_j$  sont transformées et l'on obtient

$$p = \frac{x_i}{x} = \frac{x_j}{x}$$

Dans certains ouvrages (Lebart et Fenelon, 1973 par exemple) on différencie les caractéristiques  $P_i$  et  $x_i$  relatives aux lignes  $i$  en les notant ( $P_{i.}$  et  $x_{i.}$ ) des caractéristiques relatives aux colonnes  $j$  en les notant ( $P_{.j}$  et  $x_{.j}$ ). Ici, puisqu'il ne peut y avoir de confusion, on conserve  $P_i$ ,  $x_i$ ,  $P_j$  et  $x_j$ .

On a le choix, pour raisonner, de se placer dans l'espace des paramètres ou dans celui des observations. On se place dans l'espace des paramètres à  $p$  dimensions ( $\mathbb{R}^p$ ) dans lequel se retrouvent les  $n$  points observations.

$$\sum_{j=1}^p \frac{P_{ij}}{P_i} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Les distances entre deux points observations  $i$  et  $i'$  sont notées:

$$d^2(i, i') = \sum_{j=1}^p \left( \frac{P_{ij}}{P_i} - \frac{P_{i'j}}{P_{i'}} \right)^2$$

Si pour une coordonnée (par exemple la troisième), les valeurs absolues des chiffres sont grandes, leur différence peut être grande. Dans la somme des carrés des différences pour obtenir la distance  $d^2$ , le terme correspondant  $(P_{i3}/P_i - P_{i'3}/P_{i'})^2$  sera prépondérant et jouera alors un rôle excessif dans l'analyse.

Pour atténuer ces disparités, on utilise une expression pondérée pour obtenir  $d^2$ :

$$D^2(i, i') = \sum_{j=1}^p \frac{1}{P_j} \left( \frac{P_{ij}}{P_i} - \frac{P_{i'j}}{P_{i'}} \right)^2 \quad (1)$$

$D^2(i, i')$  peut aussi prendre la forme:

$$D^2(i, i') = \sum_{j=1}^p \left( \frac{P_{ij}}{P_i \sqrt{P_j}} - \frac{P_{i'j}}{P_{i'} \sqrt{P_j}} \right)^2$$

Cette dernière relation définit la distance dite du  $\chi^2$  entre deux points observations  $i$  et  $i'$ . Elle est équivalente à une distance euclidienne entre deux points observations, les coordonnées du point  $i$  étant

$$P_{ij} / P_i \sqrt{P_j} \quad (j = 1, 2, \dots, p)$$

La recherche des axes principaux d'un nuage de points consiste à trouver un ensemble de droites orthogonales deux à deux telles que les projections des distances entre les couples de points sur ces droites sont maximums. On peut montrer (Lebart et Fenelon, 1973) que dans l'A.F.C., la recherche des axes principaux du nuage des  $n$  points  $i$  conduit à diagonaliser une matrice  $S = R'R$  après avoir défini  $r_{ij}$ , terme général de la matrice  $R$ , de la façon suivante:

$$r_{ij} = \frac{P_{ij} - P_i P_j}{\sqrt{P_i P_j}}$$

Ce qui donne:

$$S_{jk} = \sum_{i=1}^p \frac{P_{ij} P_{ik}}{P_i \sqrt{P_j P_k}} \quad \left( \begin{matrix} j \\ k \end{matrix} \right) = 1, 2, \dots, p$$

Si on pose  $u_\alpha$ , le vecteur unitaire d'ordre  $\alpha$  de la matrice  $S$  avec comme composantes  $u_{j\alpha}$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ), la projection du point  $i$  sur l'axe factoriel  $\alpha$  est  $F_\alpha(i)$  telle que:

$$F_{\alpha}(i) = \sum_{j=1}^p u_{j\alpha} \frac{P_{ij}}{P_i \sqrt{P_j}}$$

ou encore, en considérant les données initiales  $P_{ij}/P_i$

$$F_{\alpha}(i) = \sum_{j=1}^p \phi_{j\alpha} \frac{P_{ij}}{P_i}$$

avec  $\phi_{j\alpha} = u_{j\alpha} / \sqrt{P_j}$  .

Si on avait choisi de se placer de la même manière dans l'espace des observations à  $n$  dimensions ( $R^n$ ) dans lequel se retrouvent les  $p$  points-paramètres, on aurait été amené à définir les distances entre deux points paramètres,  $j$  et  $j'$

$$D^2(j, j') = \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i} \left( \frac{P_{ij}}{P_j} - \frac{P_{ij'}}{P_{j'}} \right)^2 \quad (2)$$

La recherche des axes principaux consiste alors à diagonaliser une matrice  $T = R R'$  qui a les mêmes valeurs propres  $\lambda_{\alpha}$  que  $S$ ; le vecteur propre unitaire d'ordre  $\alpha$  de  $T$  est  $V_{\alpha}$  avec comme composantes  $V_{i\alpha}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). La projection du point  $j$  sur l'axe  $\alpha$  est alors  $G_{\alpha}(j)$ :

$$G_{\alpha}(j) = \sum_{i=1}^n \psi_{i\alpha} \frac{P_{ij}}{P_j}$$

avec  $\psi_{i\alpha} = \frac{V_{i\alpha}}{\sqrt{P_i}}$  .

On peut montrer qu'il existe une relation entre les facteurs

$\phi_\alpha$  et  $\psi_\alpha$  :

$$\psi_{i\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_\alpha}} \sum_{j=1}^p \frac{P_{ij}}{P_i} \quad \phi_{j\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_\alpha}} F_\alpha(i)$$

$$\phi_{j\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_\alpha}} \sum_{i=1}^n \frac{P_{ij}}{P_j} \quad \psi_{i\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_\alpha}} G_\alpha(i)$$

Ces deux relations montrent les liens existant entre les représentations dans les espaces  $R^p$  et  $R^n$ . On voit qu'il suffit de connaître une seule représentation pour déduire l'autre. En pratique, on diagonalise la plus petite des matrices S et T. Ces relations justifient une représentation simultanée des points i du nuage dans  $R^p$  et des points j du nuage dans  $R^n$ . En effet, les  $\psi_i$  (ou les  $F_\alpha(i)$ ) sont les centres de gravité des  $\phi_j$  (ou des  $G_\alpha(j)$ ) avec un poids  $P_{ij}/P_i$ . Ainsi, la représentation simultanée montrant une proximité entre un point paramètre et un groupe d'observations montre que ce paramètre est caractéristique du comportement de ce groupe d'observations. Cette particularité de l'A.F.C. permet un niveau d'interprétation intéressant. De plus, il est généralement possible, tenant compte de la position des points paramètres et des points observations par rapport aux axes, de donner un sens physique au groupe d'observations.

La transformation du tableau initial ( $x_{ij}$  devenant  $P_{ij}/P_i$  ou  $P_{ij}/P_j$ ) implique que deux vecteurs lignes ou colonnes de ce tableau, avec des composantes proportionnelles, sont représentées dans le nuage (donc, dans la projection dans le plan des axes principaux) par deux points con-

fondus. L'A.F.C. permet donc de mettre en évidence des similitudes de variation pour les paramètres et de comportement pour les observations en considérant les points dont les coordonnées sont identiques ou du même ordre de grandeur.

### Contributions

L'inertie totale du nuage des points  $i$  dans  $R^p$  est définie:

$$\text{inertie totale} = \sum_{i=1}^n P_i \rho^2(i) = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha}$$

dans laquelle  $\rho^2(i)$ , la distance d'un point  $i$  au centre de gravité du nuage est donnée par:

$$\rho^2(i) = \sum_{j=1}^p \left( \frac{P_{ij}}{P_i} - P_j \right)^2 / P_j = \sum_{\alpha} F_{\alpha}^2(i)$$

et dans laquelle  $\lambda_{\alpha}$ , la valeur propre associée à l'axe  $\alpha$  est l'inertie expliquée par l'axe  $\alpha$

$$\lambda_{\alpha} = \sum_{i=1}^n F_{\alpha}^2(i) P_i$$

La contribution absolue du point  $i$  à l'axe  $\alpha$  est ainsi  $F_{\alpha}^2(i)P_i$ . De façon parallèle, on a:

$$\lambda_{\alpha} = \sum_{j=1}^p G_{\alpha}^2(j) P_j$$

$G_{\alpha}^2(j)P_j$  représente la contribution absolue du point  $j$  à l'axe  $\alpha$ . En pratique, ces contributions absolues sont exprimées en pourcentages et indiquent le rôle joué par chacun des points du nuage dans l'inertie expliquée par un axe.

La contribution relative du point  $i$  à l'axe  $\alpha$  est donnée par:

$$C_{\alpha}(i) = \frac{F_{\alpha}^2(i)}{\rho^2(i)} \quad \text{avec} \quad \sum_{\alpha} C_{\alpha}(i) = 1$$

De la même façon, on définit la contribution relative du point  $j$  à l'axe  $\alpha$  par:

$$C_{\alpha}(j) = \frac{G_{\alpha}^2(j)}{\rho^2(j)} \quad \text{avec} \quad \sum_{\alpha} C_{\alpha}(j) = 1$$

Ces contributions sont utiles à l'interprétation; par exemple,

- la contribution absolue montre quels paramètres sont responsables d'un facteur  $\alpha$ ;
- la contribution relative indique quel axe factoriel représente le mieux un paramètre.

#### *Reconstitution des données*

Il est intéressant parfois d'examiner comment les données sont reconstituées quand, dans l'analyse, on retient un nombre réduit d'axes factoriels. On obtient

$$P'_{ij} = P_i P_j \left[ 1 + \sum_{\alpha} \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\alpha}}} F_{\alpha}(i) G_{\alpha}(j) \right) \right]$$

En pratique on ne cherche pas à reconstituer intégralement les données initiales. On peut éliminer d'un tableau de données ce qu'on peut appeler un bruit de fond attribuable à l'imprécision des mesures ou aux fluctuations d'échantillonnage.

### *Points supplémentaires*

On peut être intéressé à connaître la position sur les axes factoriels de points représentatifs d'un paramètre ou d'une observation qui pour une raison ou une autre n'ont pas été inclus dans l'analyse. Les coordonnées de ces points, de poids nul dans l'analyse, peuvent être calculées de la façon suivante pour une observation supplémentaire,

$$F'_\alpha(i) = \sum_{j=1}^p \frac{P'_{ij}}{P'_i} G'_\alpha(j)$$

avec  $P'_{ij} = \frac{x'_{ij}}{x}$  et  $P'_i = \frac{\sum_{j=1}^p x'_{ij}}{x}$

et pour une colonne supplémentaire,

$$G'_\alpha(j) = \sum_{i=1}^n \frac{P'_{ij}}{P'_j} F'_\alpha(i)$$

avec  $P'_{ij} = \frac{x'_{ij}}{x}$  et  $P'_j = \frac{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}{x}$

### *Codage des données*

En pratique, il peut être intéressant (Benzecri, 1973) de transformer les données initiales en données binaires. L'intervalle d'un paramètre  $j$  peut être divisé en  $k$  classes d'effectif approximativement égal. Une observation appartenant seulement à une des classes est codée 1 pour cette classe et 0 pour les autres classes. On obtient ainsi un tableau de valeurs binaires composé de  $n$  lignes et  $(p, k)$  colonnes (si chaque paramètre est séparé en  $k$  classes). L'analyse de ce tableau de valeurs codées permet une analyse plus stable et un autre niveau d'interprétation. Par exemple, on peut décrire dans le plan des axes principaux les liaisons entre les paramètres en utilisant la trajectoire de chacun des paramètres comme guide à l'interprétation.

### *Equivalence distributionnelle*

Les distances définies au-dessus (relation 1 et 2) ont un avantage important. En effet, on peut montrer (Benzecri, 1973) que deux points confondus et possédant chacun un poids donné peuvent être remplacés par un seul point affecté d'un poids qui est la somme du poids des deux points sans modifier les résultats de l'analyse. Par conséquent, l'analyse n'est pas modifiée en appliquant l'A.F.C. sur un tableau dans lequel on a regroupé les observations identiques, c'est-à-dire sur un tableau de comptage.

### A.2 Classification ascendante hiérarchique (C.A.H.)

La méthode de classification ascendante hiérarchique (Jambu, 1972) est une technique qui permet de regrouper de manière automatique et selon

des critères d'agrégation choisis, des données en classes et de les ordonner de façon à visualiser la hiérarchie du classement obtenu.

On reconnaît deux types d'utilisation de cette méthode qui permettent d'interpréter les résultats de l'A.F.C. (Jambu, 1976a). On peut, soit utiliser la C.A.H. sur le même tableau de données traité par l'A.F.C., soit l'utiliser sur le tableau des facteurs obtenus de l'analyse des correspondances, à condition de définir la formule de distance appropriée.

Pour résumer la méthode de C.A.H., on choisit de se placer dans l'espace des paramètres à  $p$  dimension  $R^p$  dans lequel se retrouvent les  $n$  points observations. La C.A.H. procède à partir d'un tableau de  $n(n-1)/2$  distances entre chaque paire possible de points. Selon les deux types d'utilisation, on a

$$a) \quad D^2(i, i') = \sum_{j=1}^p \left( \frac{P_{ij}}{P_i} - \frac{P_{i'j}}{P_i} \right)^2 / P_j$$

$$b) \quad D^2(i, i') = \sum_{\alpha} \left( F_{\alpha}(i) - F_{\alpha}(i') \right)^2$$

La première relation définit la distance dite du  $\chi^2$  entre deux points observations. Nous avons vu qu'elle est équivalente à une distance euclidienne entre deux points dont les coordonnées du point  $i$  seraient  $P_{ij}/P_i \sqrt{P_j}$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ). Dans la deuxième relation, la coordonnée du point  $i$  est  $F_{\alpha}(i)$  ( $\alpha = 1, 2, \dots, r < p$ ).

La méthode peut se résumer ainsi:

- on recherche la distance minimum entre l'ensemble des paires de points
- on forme une première classe avec ces deux points ( $S = i'Ui''$ )

et on calcule son centre de gravité:

$$a) \quad \frac{P_{sj}}{P_s \sqrt{P_j}} = \frac{P_{i'j} + P_{i''j}}{(P_{i'} + P_{i''}) \sqrt{P_j}}$$

$$b) \quad F_{\alpha}(s) = \frac{P_{i'} F_{\alpha}(i') + P_{i''} F_{\alpha}(i'')}{P_{i'} + P_{i''}}$$

- on attribue à cette première classe un indice de diamètre  $\tau(s)$  qui est un moment centré d'ordre 2

on calcule  $\tau(s)$  par la formule:

$$\tau(s) = \frac{P_{i'} P_{i''}}{P_{i'} + P_{i''}} d^2(i', i'')$$

- Après avoir remplacé les deux points constituant la première classe par leur centre de gravité, on recalcule un nouveau tableau de distances de dimension  $(n-1)(n-2)/2$ .
- on recherche une autre paire de points dont la distance est minimum.
- on recommence  $(n-1)$  fois toutes les opérations décrites jusqu'au moment où il n'y a plus que deux parties à agréger.

*Critère d'agrégation choisi*

Il existe plusieurs formules de calcul de distances entre classes conduisant à des regroupements de classes plus ou moins différents. La formule de distance utilisée dans le programme de calcul (Jambu, 1974) permet de maximiser le moment centré d'ordre 2 d'une partition. En effet, supposons l'étape de rang  $(n-1)$  réalisée et la partition  $Q_{n-1}$  obtenue sur  $R^p$ . On cherche à agréger deux parties de  $R^p$ , (soit deux classes  $s$  et  $t$  de  $Q_{n-1}$ ), dont la réunion maximisera le moment centré d'ordre 2 du nuage associé à la partition  $Q_n$ , soit  $M^2(N(Q_n))$ .  $Q_n$  est la partition constituée de  $Q_{n-1}$ , à laquelle on retire  $s$  et  $t$  et à laquelle on ajoute  $sUt$ :

$$M^2(N(Q_n)) = M^2(N(Q_{n-1})) - M^2(sUt) + M^2(s) + M^2(t)$$

avec 
$$\tau(n) = \tau(sUt) = M^2(N(Q_{n-1})) - M^2(N(Q_n)) .$$

*Contribution des paramètres  $j$  à la formation des classes d'observations sur  $R^p$* 

L'inertie totale du nuage des points  $i$  dans  $R^p$  peut être exprimée par la relation:

$$\text{inertie totale} = \sum_q \tau(q) = \sum_q P_q \rho^2(q)$$

dans laquelle  $\rho^2(q)$  est la distance du centre de gravité de la classe  $q$  au centre de gravité du nuage des points dans  $R^p$ ;  $\rho^2(q)$  est défini selon le type d'utilisation:

$$a) \quad \rho^2(q) = \sum_{j=1}^P \left( \frac{P_{qj}}{P_q} - P_j \right)^2 / P_j$$

$$b) \quad \rho^2(q) = \sum_{\alpha} F_{\alpha}^2(q)$$

La quantité  $\rho^2(q)$  permet d'apprécier si la classe  $q$  est au centre (dans ce cas, la classe  $q$  se rapproche d'un profil moyen) ou très éloigné du centre. On pose

$$C_{qj} = \left( \frac{P_{qj}}{P_q} - P_j \right)^2 / P_j \quad \text{et } S \text{ est le signe de } (P_{qj} - P_j P_q)$$

$C_{qj}$  est la contribution absolue du point  $j$  dans  $R^n$  à la distance de la classe  $q$  au centre du nuage dans  $R^P$ . En étudiant la quantité  $S \cdot C_{qj} / \rho^2(q)$ , on connaît les points  $j$  qui sont discriminants pour la classe  $q$ , c'est-à-dire qui fournissent les plus fortes contributions et le signe de  $S$  indique si  $P_{qj}$  est très faible ou très élevé. (Si  $S$  est  $> 0$ ,  $P_{qj}$  est très élevé et si  $S$  est  $< 0$ ,  $P_{qj}$  est très faible). Ces contributions peuvent également être calculées sur un tableau de données reconstituées à partir d'un nombre réduit d'axes factoriels. Dans ce cas, on peut caractériser facilement les groupes d'observations déterminés sur les plans factoriels par les paramètres responsables du regroupement.

*Interprétation des classes produites par la C.A.H. sur les axes factoriels*

Il est intéressant de comparer les indices des noeuds de la hié-

rarchie aux valeurs propres associées à l'A.F.C. On a en effet:

$$\text{Inertie totale} = \sum_q \tau(q) = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha}$$

Soient  $s$  et  $t$  deux classes qui sont les successeurs immédiats de la classe  $q$ . On a:

$$\tau(q) = \frac{P_t \cdot P_s}{P_t + P_s} \sum_{\alpha} \left( F_{\alpha}(s) - F_{\alpha}(t) \right)^2$$

On pose

$$I(\alpha, q) = \frac{P_t \cdot P_s}{P_t + P_s} \left( F_{\alpha}(s) - F_{\alpha}(t) \right)^2$$

La quantité  $I(\alpha, q)$  représente la contribution absolue de la paire  $(\alpha, q)$  à l'inertie totale et peut s'exprimer indifféremment comme la contribution absolue de la classe  $q$  à l'axe  $\alpha$  ou de l'axe  $\alpha$  au noeud  $q$ . En pratique, on considère les quantités  $I(\alpha, q)/\tau(q)$  et  $I(\alpha, q)/\lambda_{\alpha}$ . En particulier la quantité  $I(\alpha, q)/\tau(q)$  représente la contribution relative de l'axe  $\alpha$  à la classe  $q$ . Si cette valeur se rapproche de 1, c'est que la séparation entre classes pour ce noeud se fait presque exclusivement dans la direction de l'axe  $\alpha$  (Jambu, 1976b).

## BIBLIOGRAPHIE

- BENZECRI, J.P. (1973). "L'analyse des données - Tome 2: l'analyse des correspondances". Dunod, Paris - 1ère édition, 619 p.
- JAMBU, M. (1972). "Techniques de classification appliquées à des données de sciences humaines". Thèse de 3ième cycle L.S.M. - ISUP, Université de Paris VI, 272 p.
- JAMBU, M. (1974). "Programme de classification ascendante hiérarchique". Publications du laboratoire de statistique. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 57 p.
- JAMBU, M., (1976a). "Sur l'interprétation mutuelle d'une classification hiérarchique et d'une analyse des correspondances". Revue de statistique appliquée. 24 (2): 45-73.
- JAMBU, M. (1976b). "Programme de calcul des contributions mutuelles entre classes d'une hiérarchie et facteurs d'une correspondance". Cahiers de l'analyse des données (1): 77-92.
- LEBART, L. et FENELON, J.P. (1973). "Statistique et informatique appliquées". Dunod, Paris, 2ième édition, 457 p.

## ANNEXE B

### RECONSTITUTION DES VALEURS MANQUANTES ET FILTRAGE DES VALEURS ANORMALES

Les méthodes d'analyse multi-dimensionnelles utilisées dans ce travail, soit l'analyse factorielle de correspondance et la classification ascendante hiérarchique, exigent des tableaux complets de données. Or, comme on l'a vu précédemment (section 1.4.3), la banque de données dont on disposait comportait un certain nombre de valeurs manquantes, ce qui a conduit à l'élimination d'un certain nombre de paramètres et des données acquises à la station 100.\* Il subsistait toute de même, après cette opération, certaines valeurs absentes, qu'il a été nécessaire de reconstituer.

Selon Bobée *et al.* (1978), la technique de reconstitution doit tenir compte de l'objectif de l'analyse afin que les valeurs ainsi estimées ne déforment pas l'information contenue dans les valeurs effectivement mesurées. Le nombre de données manquantes ne doit donc pas être trop élevé. Une tournée d'échantillonnage, celle du 6 janvier 1976, a été éliminée pour cette raison, comportant trop de valeurs absentes. La technique utilisée

---

\* dans le cas de l'A.F.C. et de la C.A.H.

ici pour la reconstitution consiste d'abord à transformer les données initiales en valeurs centrées réduites. On calcule la moyenne et l'écart-type de chacune des séries d'observations des paramètres, à chacune des stations, et on soustrait de chacune des valeurs observées  $x_{ij}$  la moyenne de la série  $\bar{x}_j$  et l'on divise ensuite le résultat par l'écart-type de la série  $\sigma_j$ , ce qui donne:

$$CR_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} .$$

Ensuite, pour chaque paramètre, la valeur manquante pour une tournée  $i$  est reconstituée en prenant la moyenne des valeurs centrées-réduites observées aux stations pour lesquelles on dispose de mesure de ce paramètre à cette date. La valeur ainsi obtenue reflète la tendance générale d'évolution des concentrations de l'ensemble des stations, et n'apporte pas d'information supplémentaire, l'effet spatial spécifique à chaque station ayant été éliminé par la transformation en valeurs centrées réduites (Bobée *et al.*, 1978).

Lorsque les données manquaient pour un paramètre à toutes les stations, cette méthode ne pouvait être utilisée. On a alors procédé soit par interpolation linéaire, soit en utilisant, lorsqu'elle était disponible, la valeur mesurée pour le deuxième échantillon. On se souvient en effet que l'échantillonnage a été effectué en double en 1975. Dans le cas des solides en suspension, les données manquaient à toutes les stations pour deux dates consécutives (observations nos 32 et 33). On a alors remplacé les valeurs manquantes par les moyennes saisonnières de chacune des stations. On évitait ainsi de perdre l'information fournie par ces deux

tournées. Notons que les cas où les valeurs manquaient à toutes les stations n'étaient pas très fréquents. La reconstitution effectuée n'affecte donc que très peu l'information contenue dans les données initiales.

On remplace par la suite les valeurs centrées-réduites par les valeurs brutes, et on obtient un tableau de données complet.

Un certain filtrage des données a aussi été effectué, afin d'éliminer les valeurs anormalement élevées ou faibles. Ainsi, avant de procéder au calcul des moyennes des valeurs centrées-réduites à des fins de reconstitution, les valeurs centrées-réduites supérieures à 4 en valeur absolue ont été posées égales à 4. On élimine donc les valeurs aberrantes, en tenant compte toutefois de leur valeur élevée. Ce cas ne s'est d'ailleurs présenté qu'une ou deux fois.

Il est à remarquer que ce filtrage et la reconstitution des valeurs manquantes n'ont été effectuées que dans le cas des analyses par A.F.C. et C.A.H. En ce qui concerne les calculs de corrélation, on a plutôt utilisé les données telles qu'elles se présentaient initialement.

## BIBLIOGRAPHIE

BOBEE, B., BOUCHER, P., CLUIS, D., LACHANCE, N et TESSIER, A., (1977).  
"Méthodologie d'évaluation de la qualité de l'eau pour différents usages". INRS-Eau, Québec, rapport scientifique no 89, 69 p.