

Record Number: 660
Author, Monographic: Bobée, B.//Cluis, D.//Tessier, A.//Robitaille, R.
Author Role:
Title, Monographic: Analyse des données de qualité de l'eau 1974-1975 du réseau de la Baie-James
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1976
Original Publication Date:
Volume Identification:
Extent of Work: ix, 124
Packaging Method: pages et 3 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 66
Location/URL:
ISBN: 2-89146-067-7
Notes: Rapport annuel 1976-1977
Abstract: Rapport rédigé pour le ministère des Richesses naturelles du Québec
20.00\$
Call Number: R000066
Keywords: rapport/ ok/ dl

Analyse des données de qualité de l'eau
1974-1975 du réseau de la baie de James

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

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 66
1976

Rapport rédigé pour
le ministère des Richesses naturelles, Québec

par
B. Bobée, D. Cluis, A. Tessier, R. Robitaille

Analyse des données de qualité de l'eau
1974-1975 du réseau de la baie de James

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

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 66
1976

Rapport rédigé pour
le ministère des Richesses naturelles, Québec

par
B. Bobée, D. Cluis, A. Tessier, R. Robitaille

ISBN 2-89146-067-7

DEPOT LEGAL 1976

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

© 1976 - Institut national de la recherche scientifique

MEMBRES DE L'INRS-EAU PARTICIPANT A L'ETUDE

B. BOBEE	- Professeur
D. CLUIS	- Professeur
A. TESSIER	- Professeur
R. ROBITAILLE	- Assistant de Recherche

Cette étude a été effectuée en collaboration avec
Monsieur Camille Paré du Service de la qualité des
eaux du Ministère des Richesses Naturelles du Québec.

RESUME

Cette étude a pour but d'effectuer l'analyse des données de qualité de l'eau du territoire de la Baie de James. Ces données relatives, surtout aux ions majeurs et à certaines substances nutritives, ont été mesurées pendant 1 année à 5 stations de base avec une fréquence d'environ 1 fois par 15 jours et à 16 stations satellites à l'occasion de 5 campagnes de mesures.

Après une brève étude des caractéristiques physico-chimiques des paramètres mesurés, nous avons, à l'aide de méthodes statistiques, examiné les points suivants:

- représentativité de la moyenne obtenue aux stations satellites;
- variabilité spatiale des paramètres sur le territoire de la Baie de James;
- relations entre stations pour un paramètre donné;
- relations entre paramètres à une station donnée.

Finalement, une étude de l'ensemble des données a été effectuée à l'aide de l'Analyse Factorielle des Correspondances. A la suite des différentes analyses effectuées, nous donnons quelques recommandations concernant l'opération future du réseau.

MOTS CLES

Qualité de l'eau / Baie de James / Réseau d'acquisition /
Variabilité spatiale / Variabilité temporelle / Corrélation /
Régression / Analyse factorielle des correspondances.

Référence: Bobée, B., Cluis, D., Tessier, A. et Robitaille, R.
(1976). *Analyse des données de qualité de l'eau 1974-1975 du réseau de la baie de James*. INRS-Eau, rapport scientifique no 66, 123 p., 2 annexes (Pour le Ministère des Richesses naturelles du Québec).

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
1. INTRODUCTION	1
2. OBJECTIFS DE L'ETUDE	3
3. ANALYSE GENERALE DES DONNEES	8
3.1 Aspects physico-chimiques	8
3.1.a Analyses et qualité des données	8
3.1.b Bilan ionique et conductivité théorique des ions majeurs	10
3.1.c Analyse descriptive des paramètres	17
3.2 Caractéristiques statistiques des données obtenues	36
3.2.a Moyenne et écart-type	36
3.2.b Intervalle de confiance de la moyenne	37
3.2.c Représentativité des 5 campagnes de mesure	42
3.2.d Evolution spatiale des moyennes des paramètres	52
4. RELATIONS ENTRE STATIONS ET ENTRE PARAMETRES	54
4.1 Coefficient de corrélation	54
4.2 Régression simple	55
4.3 Relations entre paramètres	57
4.4 Relations entre stations pour un paramètre donné	69
4.4.a Relations entre stations de base	69
4.4.b Relations entre stations de base et stations satellites	80
5. TRAITEMENT GLOBAL PAR L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES	84
5.1 Description de la méthode	84
5.2 Application de la méthode	86
5.3 Résultats	87

	<u>PAGE</u>
5.3.a Représentation des points "station"	88
5.3.b Représentation des points "paramètre" et représentation simultanée	91
6. ETUDE DES SUBSTANCES NUTRITIVES	95
6.1 Introduction	95
6.2 Analyse descriptive des paramètres	95
6.3 Caractéristiques statistiques des substances nutritives	102
6.3.a Moyennes et écart-types	102
6.3.b Représentativité des 5 campagnes de mesure	102
6.4 Relation entre stations de base pour chaque paramètre	110
6.5 Relation entre paramètres à chaque station de base	113
6.6 Evolution spatiale des moyennes des substances nutritives	113
7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	117

ANNEXE 1: Données de base

ANNEXE 2: Vérification de la validité des mesures
de Carbone inorganique

LISTE DES FIGURES

		<u>PAGE</u>
Figure 2.1	Réseau d'acquisition des données de qualité de l'eau 1974-1975	5
Figure 3.1	Evolution temporelle de la Silice aux stations de base	18
Figure 3.2	Evolution temporelle du Calcium aux stations de base	19
Figure 3.3	Evolution temporelle du Magnésium aux stations de base	20
Figure 3.4	Evolution temporelle du Sodium aux stations de base	21
Figure 3.5	Evolution temporelle du Potassium aux stations de base	22
Figure 3.6	Evolution temporelle de l'Alcalinité totale aux stations de base	23
Figure 3.7	Evolution temporelle des Sulfates aux stations de base	24
Figure 3.8	Evolution temporelle des Chlorures aux stations de base	25
Figure 3.9	Evolution temporelle de la Conductivité aux stations de base	26
Figure 3.10	Evolution temporelle du pH aux stations de base	27
Figure 3.11	Evolution temporelle du Fer aux stations de base	28
Figure 4.1	Relation entre la Conductivité et la Silice. Station 4 (09060H)	64
Figure 4.2	Relation entre la Conductivité et la Silice Station 5 (Lac B-160)	65
Figure 4.3	Relation entre les stations de base LG1 et LG2 pour la Silice	73

		<u>PAGE</u>
Figure 4.4	Relation entre les stations de base 4(09060H) et 5(09271K) pour le Sodium	76
Figure 4.5	Graphique des interrelations potentielles	79
Figure 4.6	Relation entre la Conductivité à la station satellite 12(09060A) et à la station de base 4(09060H)	83
Figure 5.1	Représentation simultanée des points "station" et des points "paramètre" dans le plan factoriel 1-2	89
Figure 6.1	Evolution temporelle du Carbone organique aux stations de base	96
Figure 6.2	Evolution temporelle du Carbone inorganique aux stations de base	97
Figure 6.3	Evolution temporelle du Phosphore total aux stations de base	98
Figure 6.4	Evolution temporelle de l'Azote Kjeldahl aux stations de base	99

LISTE DES TABLES

	<u>PAGE</u>
Table 2.1	Caractéristiques des stations du réseau 4
Table 3.1	Liste des paramètres analysés au M.R.N. - Précision et limite de détection 9
Table 3.2	Facteurs de conversion utilisés pour le calcul du bilan ionique et de la conductivité 11
Table 3.3	Déséquilibre ionique (en %) 12
Table 3.4	Ecart des conductivités théoriques et mesurées en % 14
Table 3.5	Interprétation des valeurs aberrantes 15
Table 3.6	Interprétation des principales erreurs détectées 16
Table 3.7	Table des moyennes $\bar{X}_{I,J}$ 38
Table 3.8	Table des écarts-types $\sigma_{I,J}$ 39
Table 3.9	Moyenne $\bar{X}'$ et écart-type σ' aux stations de base en considérant les valeurs relatives aux 5 campagnes 44
Table 3.10	Test d'égalité des variances: calcul de $F = (\sigma'_{I,J}/\sigma_{I,J})^2$ 46
Table 3.11	Valeurs limites de la zone d'acceptation (test F) 47
Table 3.12	Ecart-type combiné $S_{I,J}$ 49
Table 3.13	Test d'égalité des moyennes, valeurs de $ t_0 $ 50
Table 3.14	Evolution générale Est-Ouest des moyennes annuelles 53
Table 4.1	Coefficients de corrélations entre paramètres: Station LG1 (09270B) 58
Table 4.2	Coefficients de corrélations entre paramètres: Station LG2 (09271J) 59
Table 4.3	Coefficients de corrélations entre paramètres: Station LG3 (09271L) 60

		<u>PAGE</u>
Table 4.4	Coefficients de corrélations entre paramètres: Station 09060H	61
Table 4.5	Coefficients de corrélations entre paramètres: Station 09271K	62
Table 4.6	Prédiction de la conductivité à partir de SiO ₂ à la station de base 4	67
Table 4.7	Corrélations entre stations de base	70
Table 4.8	Prédiction de la concentration en SiO ₂ à LG1 à partir des valeurs mesurées à LG2	74
Table 5.1	Valeurs moyennes des paramètres aux stations	94
Table 6.1	Moyennes annuelles des concentrations mesurées aux stations de base (mg/l)	103
Table 6.2	Ecart-types des concentrations mesurées aux stations de base (mg/l)	103
Table 6.3	Moyennes des paramètres calculées à partir des 5 dates d'échantillonnage	104
Table 6.4	Ecart-types des paramètres calculés à partir des 5 dates d'échantillonnage	104
Table 6.5	Test d'égalité des variances: calcul de $F = (\sigma'/\sigma)^2$	106
Table 6.6	Valeurs critiques du test F	107
Table 6.7	Ecart-type combiné S	108
Table 6.8	Test d'égalité des moyennes: valeurs de $ t_0 $	119
Table 6.9	Valeurs critiques du test de Student	111
Table 6.10	Coefficients de corrélation entre stations de base pour chaque paramètre	112
Table 6.11	Coefficients de corrélation entre paramètres à chaque station de base	114
Table 6.12	Evolution spatiale des moyennes des concentrations en substances nutritives	116

1- INTRODUCTION

Le développement progressif du territoire de la Baie de James nécessite la connaissance de la qualité des eaux de cette région. Au delà de la connaissance générale du comportement dans le temps et l'espace des principales caractéristiques physico-chimiques, il est capital de suivre l'impact de la transformation de cette région sur la qualité des eaux.

Ces différentes nécessités justifient l'effort accompli par la Société de Développement de la Baie James pour permettre l'acquisition rationnelle des données physico-chimiques. Dans une première étape, l'analyse des données acquises de 1968 à 1973 a été effectuée par le service qualité des eaux de Ministère des Richesses Naturelles et l'INRS-Eau (GRISEL et BOBEE, 1974). Cette étude a permis de faire ressortir les principales caractéristiques physico-chimiques de la région considérée et a conduit à la proposition d'un plan d'échantillonnage des paramètres de qualité de l'eau. Le réseau proposé qui tenait compte des stations existantes avait pour but de permettre une connaissance suffisamment précise sur l'ensemble du territoire de la variabilité spatio-temporelle des paramètres choisis. Dans ce cadre, deux types de stations d'échantillonnage ont été suggérés:

- . des stations de base échantillonnées fréquemment et régulièrement en un nombre réduit de points pour permettre une évaluation de la variabilité temporelle;
- . des stations satellites échantillonnées au cours de campagnes de mesure en un nombre assez grand de points pour permettre une évaluation de la variabilité spatiale.

Le plan d'échantillonnage proposé avait pour objectifs:

- de permettre une meilleure connaissance de la variabilité temporelle, car les données de 1968-1973, qui ne considéraient que certains mois de l'année, n'étaient pas représentatives de l'évolution annuelle;
- d'obtenir une information systématique et régulière, en insistant sur la nécessité d'échantillonner les stations à des dates concomitantes pour avoir une meilleure évaluation de la variabilité spatiale.

2- OBJECTIFS DE L'ETUDE

2.1 Le réseau et les données

Le réseau proposé à la suite de la première étude du M.R.N. (GRISEL et BOBEE, 1974) a été intégralement accepté par la S.D.B.J., à l'exception de la station de base de Nitchequon dont l'opération présentait trop de difficultés, il comprend: 5 stations de base échantillonnées toutes les 2 semaines et 16 stations satellites échantillonnées au cours de 5 campagnes de mesures dont les dates correspondent également à des dates d'échantillonnage aux stations de base.

La Table 2.1 donne la liste des stations ainsi que leur code dans la classification du M.R.N. et le code simplifié que nous avons utilisé. La position géographique des stations est indiquée sur la figure 2.1, et l'on peut remarquer une plus grande concentration du réseau dans la zone ouest du territoire due à la nécessité de mieux connaître l'évolution de la qualité des eaux dans cette région.

Les paramètres échantillonnés sont:

- . le pH et la conductivité;
- . la silice, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les sulfates, les chlorures, les bicarbonates et le fer;
- . le carbone organique, le carbone inorganique, le phosphore total et l'azote Kjeldahl. Dans le cas des substances nutritives, en raison du délai entre l'échantillonnage et l'analyse en laboratoire, les paramètres susceptibles de varier durant le transfert au laboratoire n'ont pas été retenus.

Station		Type	Localisation
Code MRN	Code simplifié		
09270B (LG1)	1	Base	La Grande
09271J (LG2)	2	Base	La Grande
09271L (LG3)	3	Base	La Grande
09060H	4	Base	Eastmain
09271K	5	Base	Lac B-160
09270E	6	Satellite	Kanaaupscow
09270Y	7	Satellite	Kanaaupscow
09270Z	8	Satellite	La Grande
09270G	9	Satellite	De Pontois
09271G	10	Satellite	La Grande
09270S	11	Satellite	La Forge
09060A	12	Satellite	Eastmain
09271H	13	Satellite	Sakami
09270D	14	Satellite	Sakami
09060G	15	Satellite	Opinaca
09271A	16	Satellite	Kanaaupscow
09271B	17	Satellite	La Forge
09270P	18	Satellite	La Grande
10370R	19	Satellite	Caniapiscau
10370S	20	Satellite	Caniapiscau
10370N	21	Satellite	Caniapiscau

Table 2.1: Caractéristiques des stations du réseau.

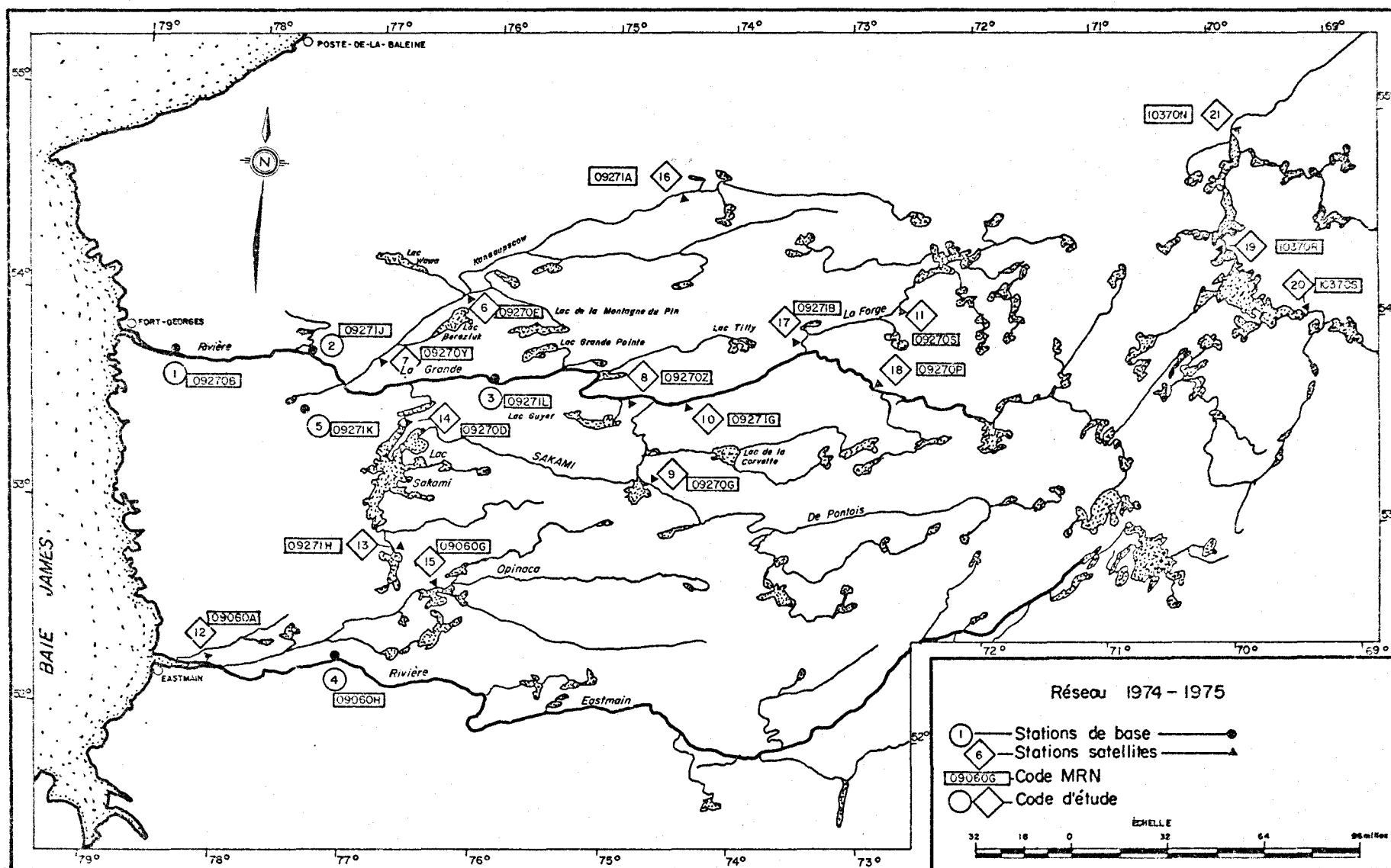


Fig. 2.1. Réseau d'acquisition des données de qualité de l'eau du territoire de la Baie de James.

Deux éléments importants caractérisent les données acquises depuis le mois d'août 1974 jusqu'au mois d'août 1975:

- pour les 5 stations de base, nous disposons de données régulièrement réparties dans l'année avec un pas de temps d'environ 15 jours, ce qui permet d'avoir une bonne idée de la variabilité temporelle des différents paramètres qui antérieurement n'était pas connue;
- les données obtenues pour l'ensemble des 16 stations satellites et des 5 stations de base sont concomitantes, ce qui permet d'avoir une image de la variabilité spatiale à l'une des 5 dates d'échantillonnage.

2.2 Cadre général de l'étude

Dans cette étude, nous analysons l'ensemble des données 1974-75 dans le but de faire des recommandations relatives à l'opération future du réseau de qualité de la Baie de James. La première étape de la rationalisation du réseau a été effectuée à partir des données 1968-1973, ce qui a conduit à l'obtention de données systématiques et concomitantes aux différentes stations. Dans la seconde étape, qui fait l'objet de cette étude, nous avons en particulier pour objectifs:

- d'examiner pour chaque paramètre les corrélations entre les stations de base prises 2 à 2, ce qui est possible en raison des données (23 observations en général);
- d'examiner pour chaque paramètre les corrélations entre station de base et station satellite. Ces calculs seront seulement indicatifs en raison du nombre réduit de données existant aux stations de

base. Mais il nous semble important de montrer comment il est possible de compléter les courtes séries des stations satellites à l'aide des plus longues séries des stations de base;

- d'étudier les interrelations potentielles entre les différents paramètres.

Préalablement aux études de corrélation et à l'application de modèles régressifs simples, nous ferons ressortir les caractéristiques générales des données obtenues et étudierons de manière descriptive la variabilité spatiale et la variabilité temporelle des paramètres considérés. Nous ne nous attarderons cependant pas sur les caractéristiques physico-chimiques des différents paramètres qui ont déjà fait l'objet d'études détaillées dans la première étape (GRISEL et BOBEE, 1974). Enfin, une tentative de synthèse de l'information dont nous disposons sera effectuée à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances, qui est une méthode multivariée ayant déjà donné des résultats intéressants dans d'autres études.

3- ANALYSE GENERALE DES DONNEES

L'ensemble des données que nous considérons figurent à l'Annexe I et sont relatives à la période de août 1974 à juillet 1975.

Les paramètres mesurés sont:

- les ions majeurs;
- certaines caractéristiques générales (pH, conductivité);
- certaines substances nutritives.

Pour la plupart des paramètres, à l'exception de certaines substances nutritives, nous disposons de tableaux de données complets se prêtant bien à des analyses générales. Dans ce chapitre, pour chacun de ces paramètres, nous effectuons d'abord une brève analyse descriptive, puis nous faisons ressortir les caractéristiques générales de ces données par des méthodes statistiques élémentaires.

Pour les substances nutritives, de nombreuses données sont absentes ou inférieures au seuil de détection, et il est difficile de les considérer dans un traitement global; de plus, comme ces substances constituent une classe de paramètres différente des ions majeurs, nous avons décidé de traiter ces données séparément, au Chapitre 6.

3.1 Aspects physico-chimiques

3.1.a Contrôle de la qualité des données

Les analyses ont été effectuées au Ministère des Richesses Naturelles du Québec et nous ont été fournies sous forme de cartes perforées. Les échantillons ont suivi la procédure habituelle d'analyse et la Table 3.1 indique, pour chaque paramètre, l'appareil utilisé, la précision de

<u>Paramètres</u>	<u>Appareil</u>	<u>Précision</u>	<u>Détection</u>
Chlorures (Cl)	Technicon AA-2	±0.5%	0.1 ppm de [Cl]
Sulfates (SO ₄)	Technicon AA-2	±1.0%	0.5 ppm de [SO ₄]
Carbone total (C _T)	Carbon analyser	±1.0%	0.1 ppm de [C]
Carbone inorganique (TIC)	Carbon analyser	±0.5%	0.1 ppm de [C]
Azote Kjeldahl (N _K)	Technicon AA-2	±1.0%	0.02 ppm de [N]
Phosphore total (P _T)	Technicon AA-2	±1.0%	0.02 ppm de [PO ₄]
Silice (SiO ₂)	Technicon AA-2	±0.5%	0.1 ppm de [SiO ₂]
Conductivité	Conductivimètre	±0.5%	0.1 micro-mhos
Sodium (Na)	Absorption atomique	±0.5%	0.05 ppm de [Na]
Potassium (K)	Absorption atomique	±0.5%	0.05 ppm de [K]
Calcium (Ca)	Absorption atomique	±0.5%	0.05 ppm de [Ca]
Magnésium (Mg)	Absorption atomique	±0.5%	0.1 ppm de [Mg]
Fer (Fe)	Technicon AA-1	±0.5%	0.01 ppm de [Fe]

Table 3.1: Liste des paramètres analysés au M.R.N. ainsi que des appareils utilisés, leur précision et leur limite de détection.

la méthode et le seuil de détection. Ici, il faut remarquer que la précision nominale ne doit pas faire illusion; en effet, elle s'applique à des eaux relativement chargées; dans notre cas, de nombreux échantillons présentent des concentrations proches du seuil de détection, quelquefois inférieures et souvent un faible multiple de celui-ci. D'ailleurs, sur les cartes de données qui nous étaient fournies, les champs réservés aux données correspondaient au seuil de détection. Au niveau du seuil de détection, la précision est beaucoup moins bonne que dans le reste de la gamme, mais n'a pas été quantifiée.

3.1.b Bilan ionique et conductivité théorique des ions majeurs

On sait que les ions majeurs, $[\text{Na}]^+$, $[\text{Ca}]^{+2}$, $[\text{Mg}]^{+2}$, $[\text{K}]^+$, $[\text{HCO}_3]^-$, $[\text{SO}_4]^{-2}$, $[\text{Cl}]^-$, représentent l'essentiel de la charge ionique des eaux d'un territoire non influencé. On peut effectuer, pour chaque échantillonnage, deux bilans susceptibles de mettre en évidence des erreurs d'échantillonnage ou d'analyse pour les sept ions majeurs mesurés.

On trouvera à la Table 3.2 les facteurs de conversion pour le calcul du bilan ionique (HEM, 1970) et les conductivités théoriques spécifiques à chaque ion (RODIER, 1971); ces chiffres ont été utilisés par GRISEL et BOBEE (1974).

A la Table 3.3, nous avons calculé pour chaque échantillon, le déséquilibre ionique (D.I.) en pourcentage, c'est-à-dire l'excès des cations sur les anions exprimés en milliequivalents, et rapporté à l'ionisation

	Force ionique	Conductivité théorique
	Milliéquivalent/l par mg/l	$\mu\text{mho/cm}$ par mg/l
Ca^{++}	+ 0.04990	2.60
Mg^{++}	+ 0.08226	3.82
Na^{+}	+ 0.04350	2.13
K^{+}	+ 0.02557	1.84
HCO_3^{-}	- 0.01639	0.715
SO_4^{--}	- 0.02082	1.54
Cl^{-}	- 0.02821	2.14

Table 3.2: Facteurs de conversion utilisés pour le calcul du bilan ionique et de la conductivité

Echantillon \ Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	37	*	- 3	6	1	-20	7	4	-10	*	9	-30	-43	- 4	1	17	3	42	-34	10	-19	10	3
2	13	39	9	14	-9	4	6	0	-47	-11	0	- 4	-35	4	-9	8	-8	31	-33	8	-49	23	-11
3	18	47	- 2	-15	-10	-18	4	-15	-23	-16	-18	-24	-57	- 9	-16	24	-27	6	-53	0	-44	39	-10
4	19	61	17	- 8	4	4	-13	-17	- 8	10	2	-11	-20	4	-15	23	- 3	0	13	16	-41	22	6
5	15	21	-10	13	13	16	0	1	0	17	14	0	13	7	16	25	11	16	54	25	-13	8	13

Station \ Echantillon	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3	0	18	-10	6	-20	-56	22	-49	-58	56	-29	-10	-14	-2	-25	-6
5	-3	5	-34	6	-12	- 7	5	3	5	40	- 4	-28	- 8	-32	-26	-10
10	-8	9	-41	0	- 4	-18	10	- 6	21	0	-18	-34	-23	-14	-21	-29
14	-28	-20	- 5	-10	1	11	0	*	7	-12	*	-25	-11	*	-14	*
20	48	*	9	9	23	-10	23	41	46	21	19	0	-57	-47	-47	-47

Table 3,3: Déséquilibre ionique (en %)
(* échantillon incomplet)

totale:

$$DI = 2 \times 100 \times (Me^+ - Me^-) / (Me^+ + Me^-)$$

où Me^+ et Me^- sont les charges ioniques positives ou négatives exprimées en milliequivalents.

A la Table 3.4, nous avons calculé pour chaque échantillon, l'écart, en pourcentage (EC), entre la conductivité théorique calculée à partir de la composition en ions majeurs et la conductivité mesurée:

$$EC = 100 \times \frac{(\text{Conductivité théorique} - \text{Conductivité mesurée})}{\text{Conductivité mesurée}}$$

Dans ces calculs, nous n'avons pas pris en considération l'influence de l'ion hydrogène qui est négligeable dans la gamme de pH rencontrés.

L'étude simultanée des tableau 3.3 et 3.4 permet de détecter et de corriger éventuellement certaines erreurs d'analyse particulièrement flagrantes. Pour l'interprétation, on peut utiliser la Table 3.5. Les principales anomalies détectées sont explicitées à la Table 3.6.

Station \ Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	-17	*	2	20	- 6	21	4	-17	10	*	3	15	- 7	- 5	-10	- 8	- 1	- 7	3	- 2	-14	-47	11
2	-22	-14	-4	15	4	23	8	-20	30	4	0	5	-15	0	- 7	- 7	-13	-18	- 2	-12	-13	17	12
3	- 9	-19	-15	22	11	15	-1	- 9	- 1	-9	-1	15	-10	2	-13	-11	-20	-15	16	-11	-17	46	2
4	-13	-25	1	13	13	23	18	- 7	16	-3	-5	15	-10	-11	- 6	7	- 9	-19	36	- 7	-19	23	15
5	- 7	- 8	14	6	-1	7	0	-11	-2	-8	-1	-4	-6	-4	- 2	- 5	52	- 4	30	- 5	0	11	2

Station \ Echantillon	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
3	0	1	0	0	- 1	24	9	104	33	- 9	7	- 1	-17	- 3	33	15
5	-23	0	26	10	11	6	13	0	0	0	3	2	0	28	22	44
10	- 4	-5	- 5	2	7	1	1	- 3	7	- 3	1	21	4	3	0	- 3
14	8	-5	- 3	30	-11	1	5	*	4	- 6	*	12	-10	*	- 6	*
20	- 8	*	10	0	0	31	8	0	13	-22	-25	16	12	-12	- 3	- 3

Table 3.4: Ecart des conductivités théoriques et mesurées (en %)

(* Echantillon incomplet)

Bilan ionique Ecart de conductivité			
	> 0	= 0	< 0
> 0	Cations surévalués	Erreurs de conductivité possible	Anions surévalués
= 0	Cations surévalués et Anions sousévalués		Cations sousévalués et Anions surévalués
< 0	Anions sousévalués	Erreur de conductivité possible	Cations sousévalués

Table 3.5: Interprétation des valeurs aberrantes

Station	Echantillon	Bilan ionique %	Ecart de conductivité %	Erreur probable
1	22	+ 10	- 47	conductivité mesurée trop forte
2	9	- 47	+ 30	ions bicarbonates trop forts
3	22	+ 39	+ 46	ions sodium et potassium trop forts
4	2	+ 61	- 25	ions sulfates et chlorures trop faibles
5	17	+ 11	+ 52	ions chlorures et conductivité mesurée trop faibles
5	19	+ 54	+ 30	ions sodium et magnésium trop forts
8	5	- 34	+ 26	ions sulfates trop forts
11	3	- 56	+ 24	ions bicarbonates et sulfate trop forts
13	3	- 49	+104	ions bicarbonates trop élevés
14	3	- 58	+ 33	ions bicarbonates trop élevés
17	10	- 34	+ 21	ions bicarbonates trop élevés
20	20	- 47	- 3	ions calcium sousévalués

Table 3.6: Interprétation des principales erreurs détectées

3.1.c Analyse descriptive des paramètres

L'évolution temporelle de chaque paramètre aux stations de base est représentée aux Figures 3.1 à 3.11.

● Silice (SiO_2) (Figure 3.1)

La Silice en solution provient de l'altération des silicates. Les concentrations en cause sont très faibles (de 1.5 à 5.5 mg/l) et lentement variables. Aux stations de base, on observe 3 périodes:

- de la mi-août à la mi-avril, les concentrations s'élèvent progressivement;
- de la mi-avril à la fin-mai, les concentrations décroissent rapidement par effet de dilution;
- de la fin mai à la mi-août, les concentrations sont groupées et minimales.

Les stations 1,2 et 3 ont des comportements similaires. La station 4 montre en hiver des concentrations plus élevées et la station 5 (lac B-160), des concentrations moins élevées ainsi qu'une concentration très faible durant la fonte du mois de mai; cette dernière ne peut être attribuée à la croissance des diatomées qui a lieu surtout en juin.

Cette variabilité temporelle semble maintenue aux stations satellites. Quant à la variabilité spatiale, les stations des bassins amont semblent avoir des concentrations plus faibles, à cause du temps de contact plus court avec les sédiments en suspension.

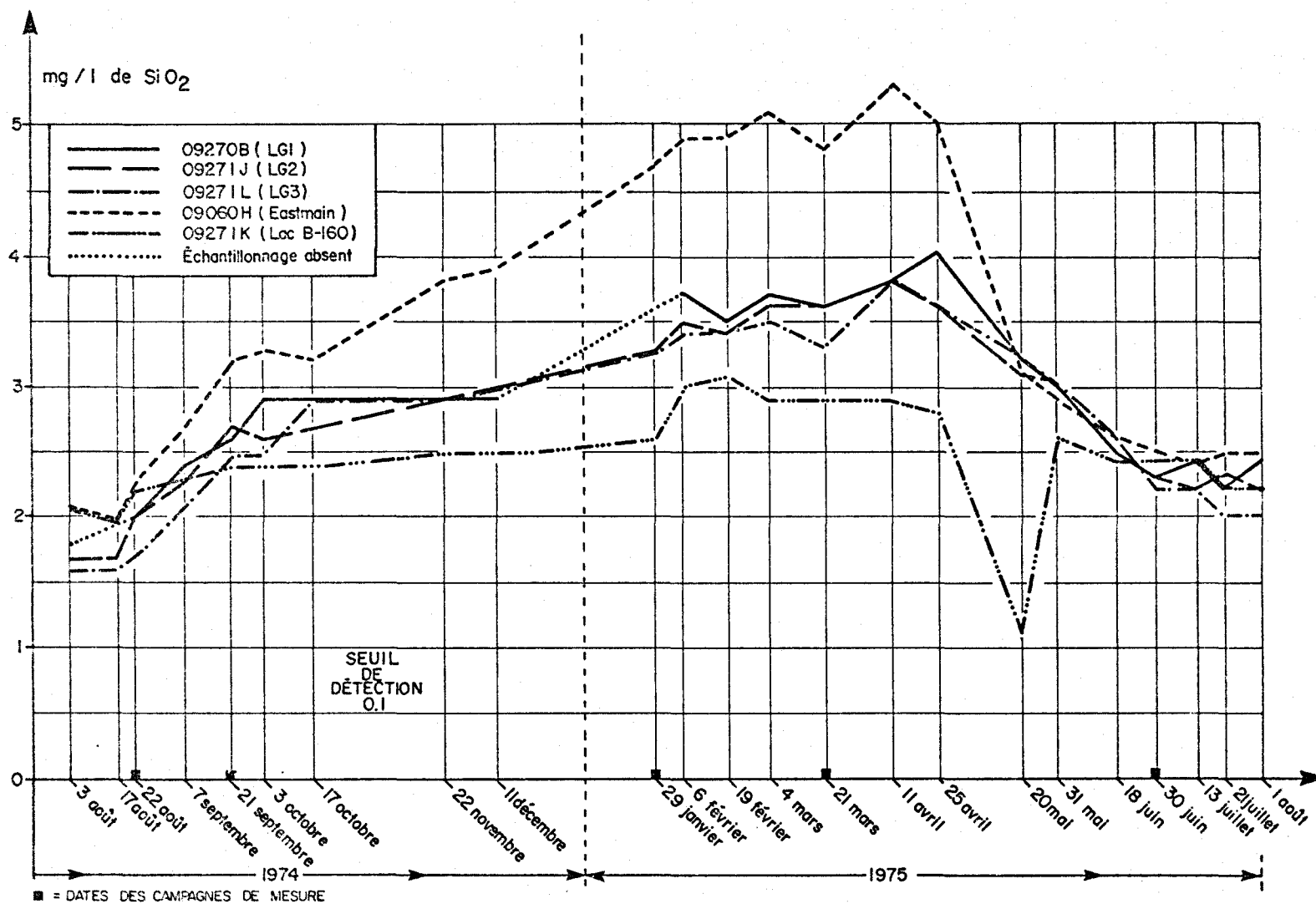


Fig. 3.1 . Évolution temporelle de la silice aux stations de base .

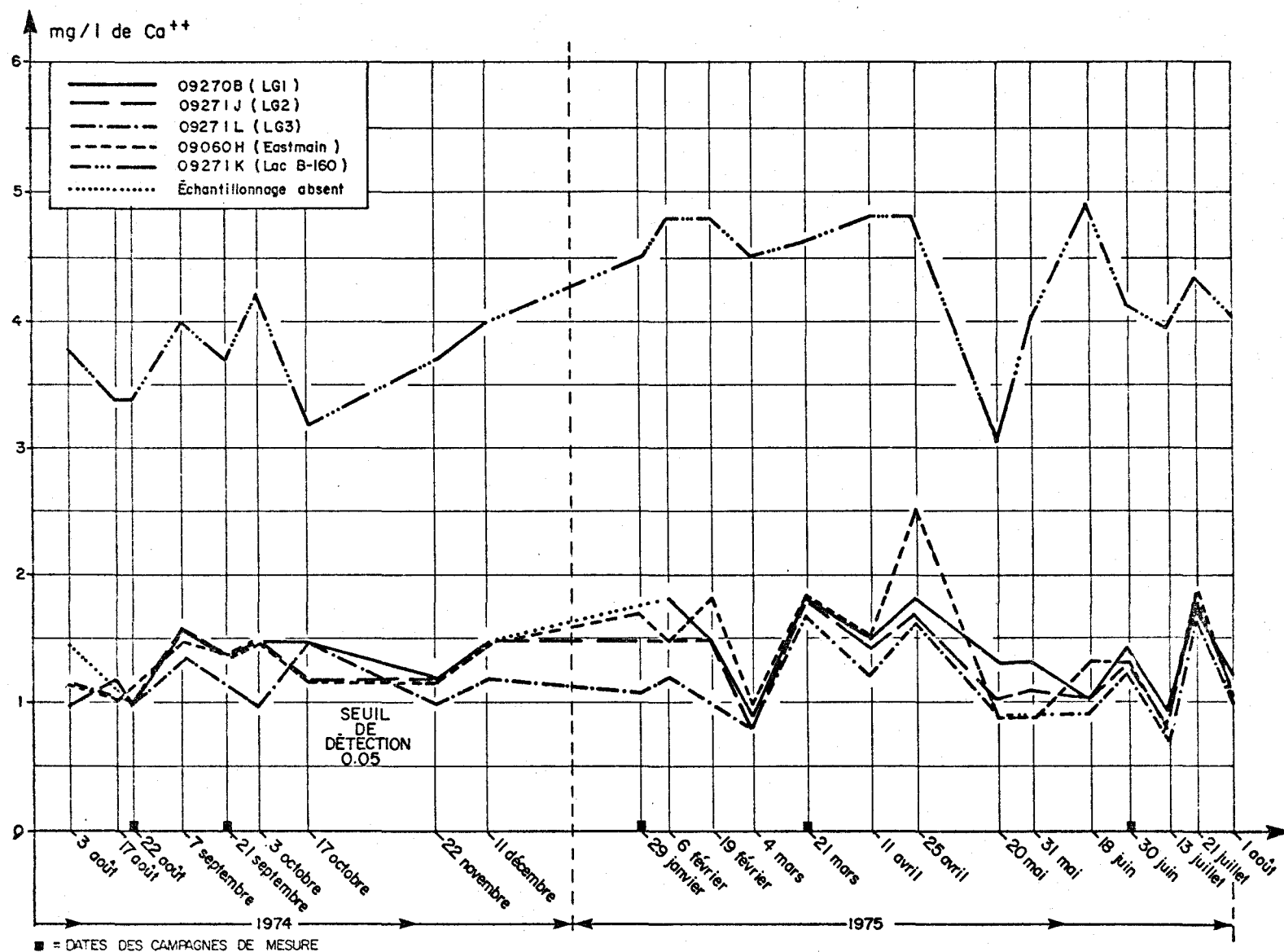


Fig. 3.2. Évolution temporelle du calcium aux stations de base .

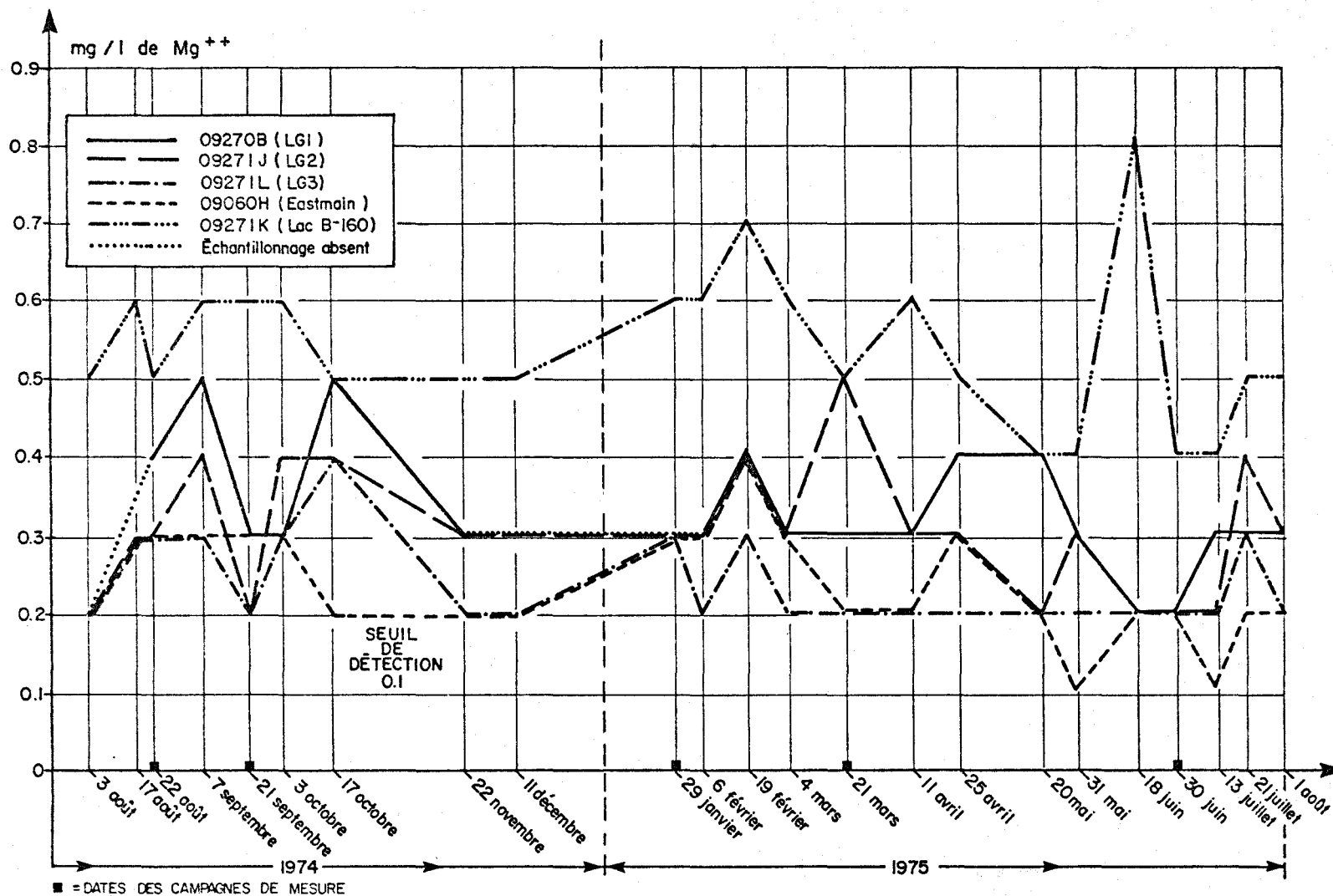


Fig. 3.3. Évolution temporelle du magnésium aux stations de base.

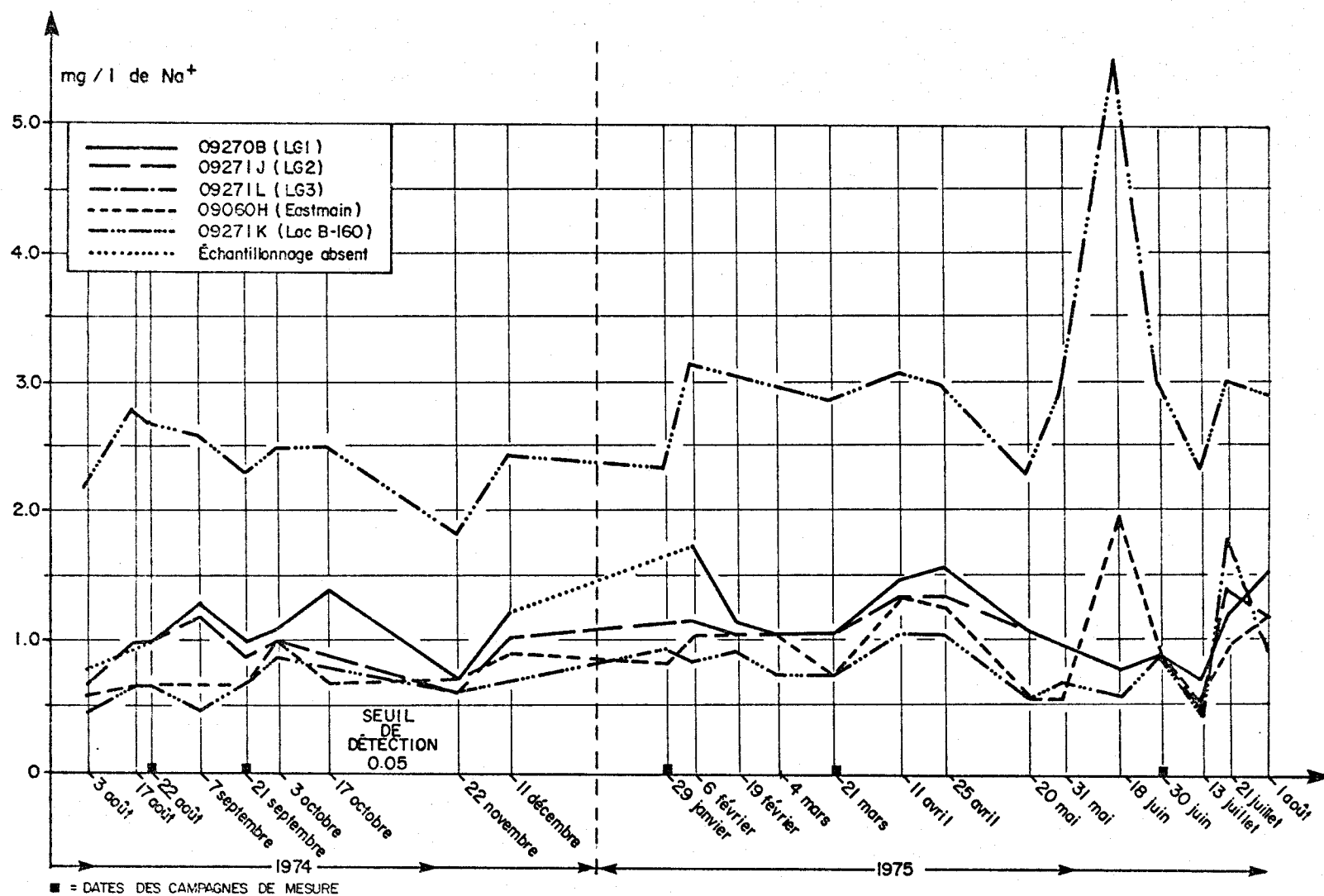


Fig.3.4. Évolution temporelle du sodium aux stations de base .

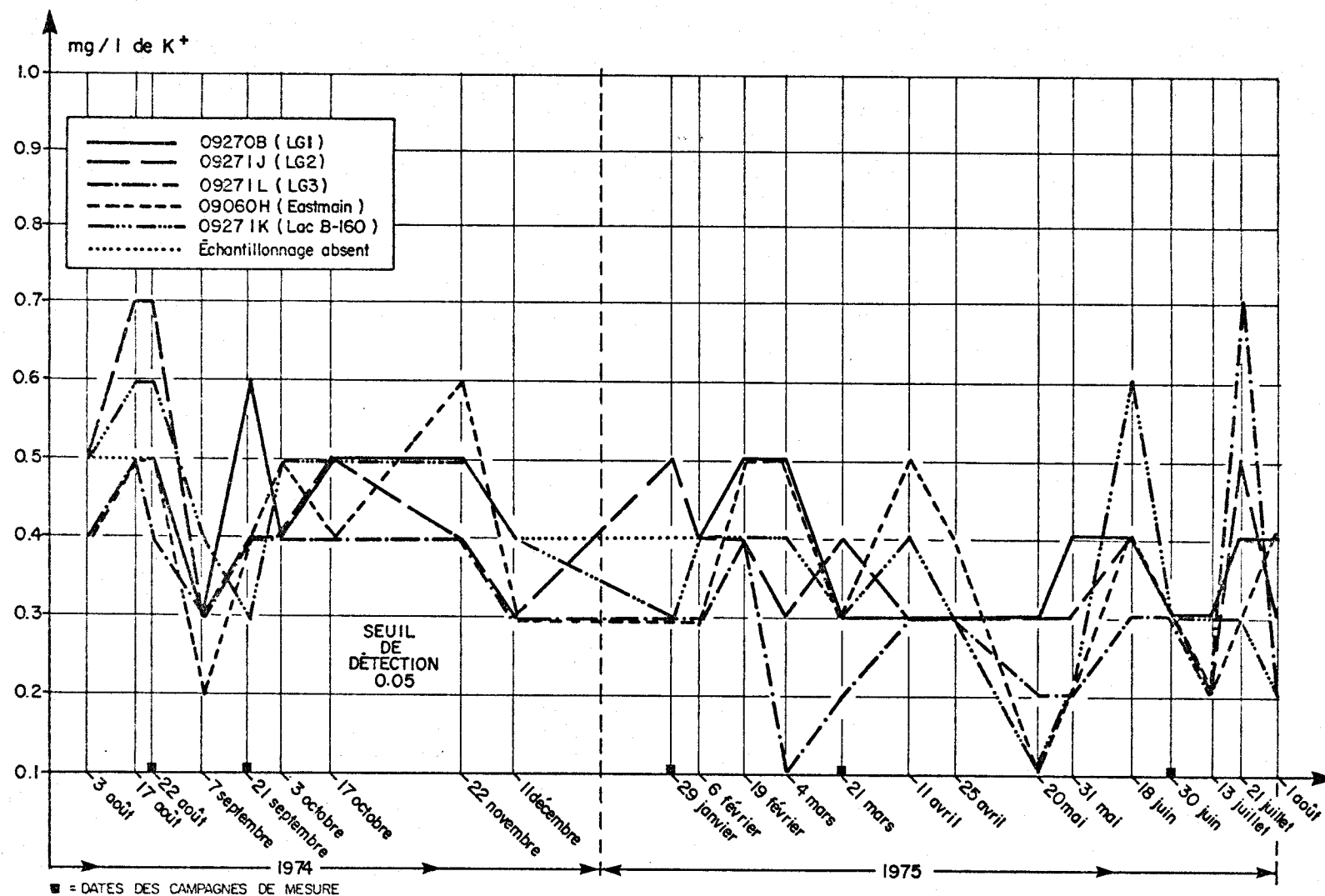


Fig.3.5. Évolution temporelle du potassium aux stations de base .

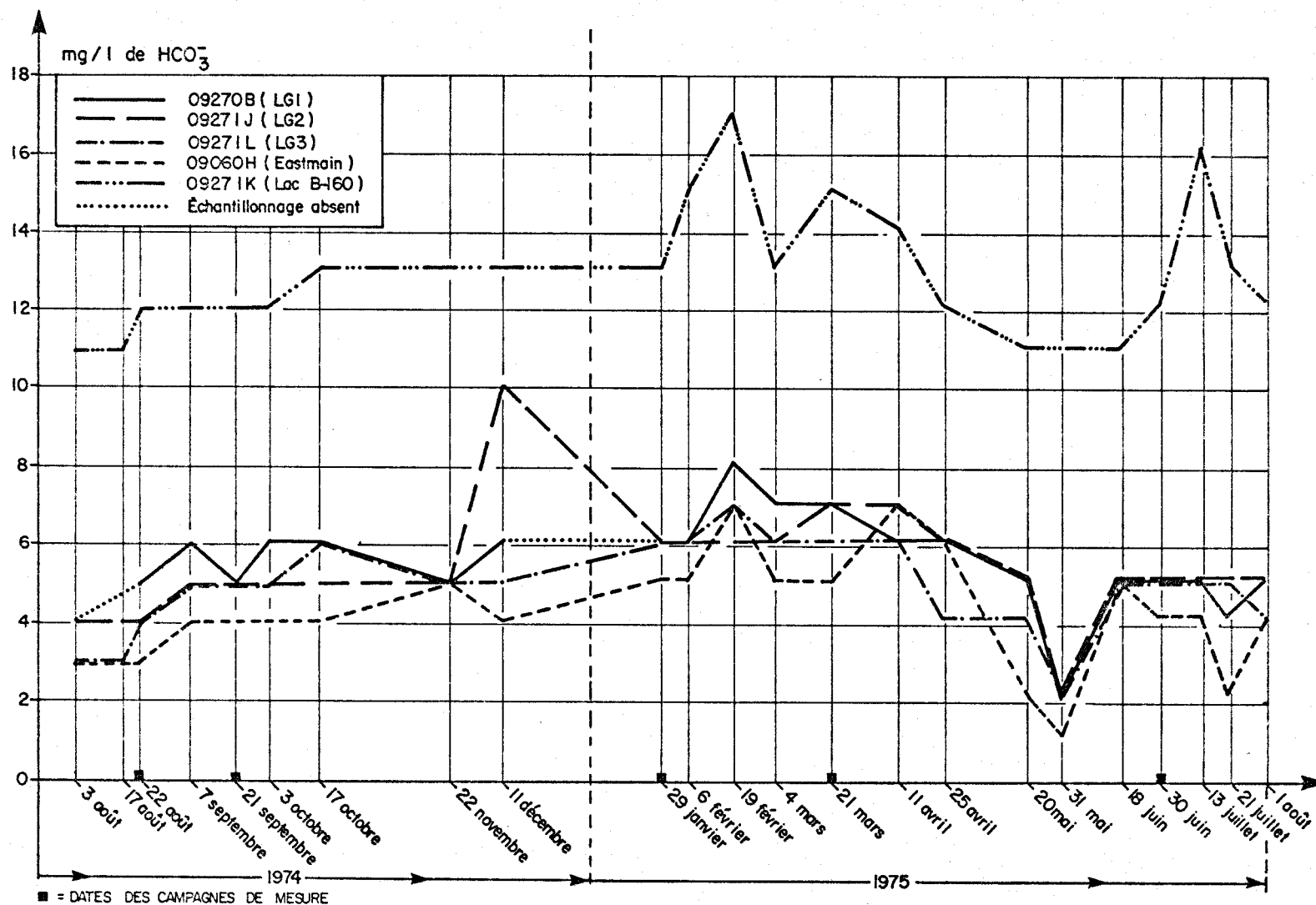


Fig. 3.6. Évolution temporelle de l'alcalinité totale aux stations de base.

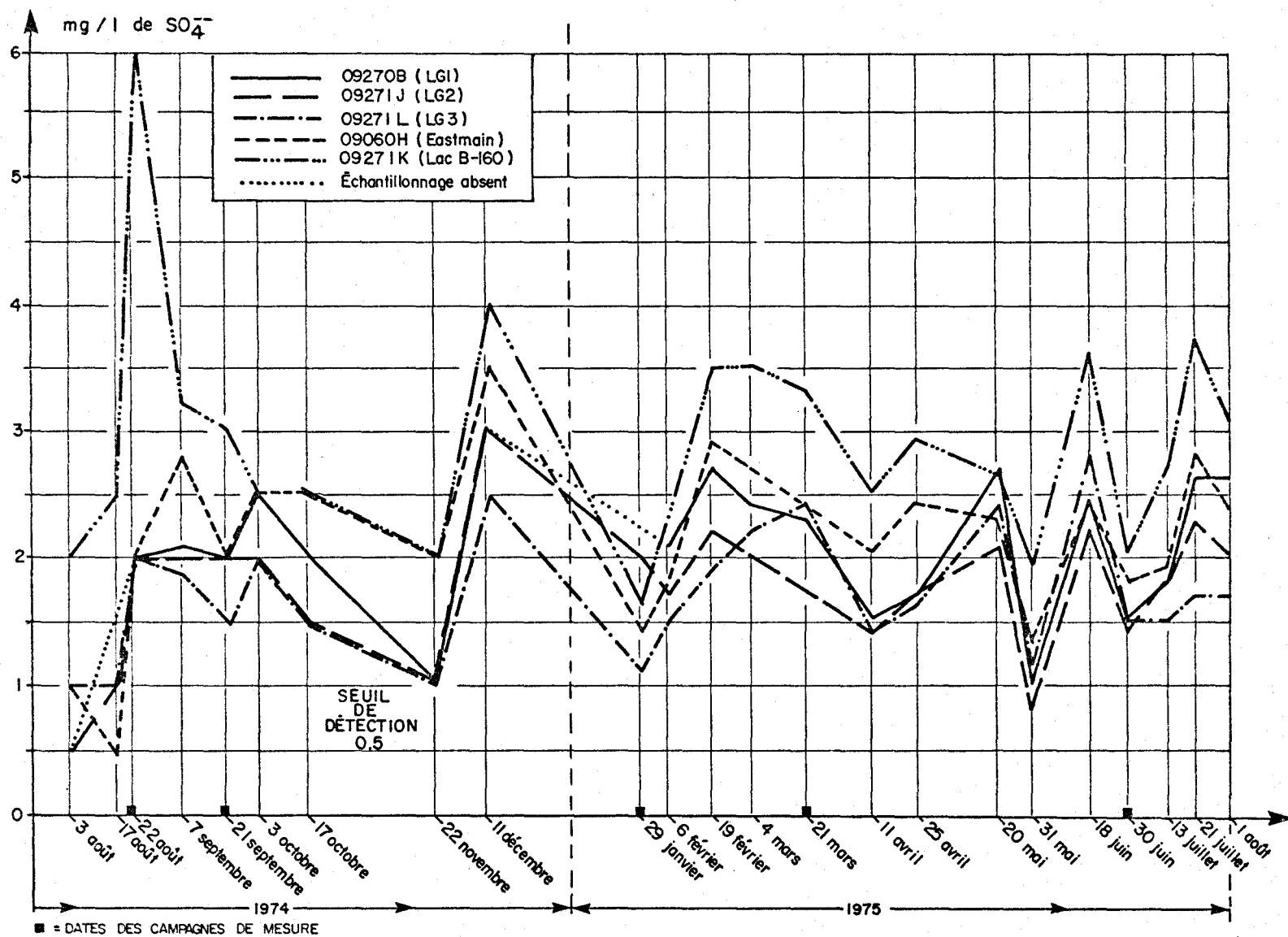


Fig. 3.7. Évolution temporelle des sulfates aux stations de base.

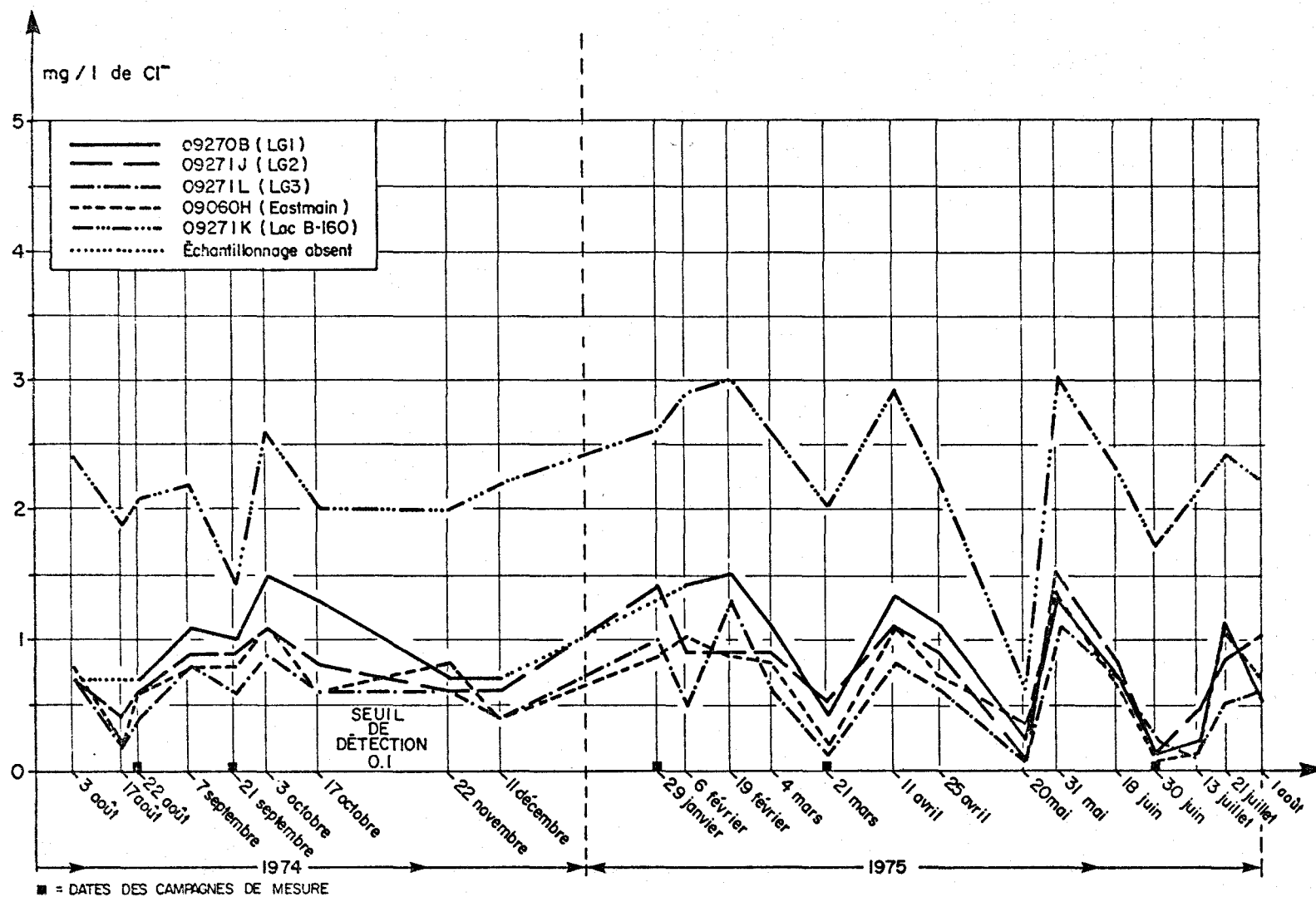


Fig.3.8. Évolution temporelle des chlorures aux stations de base.

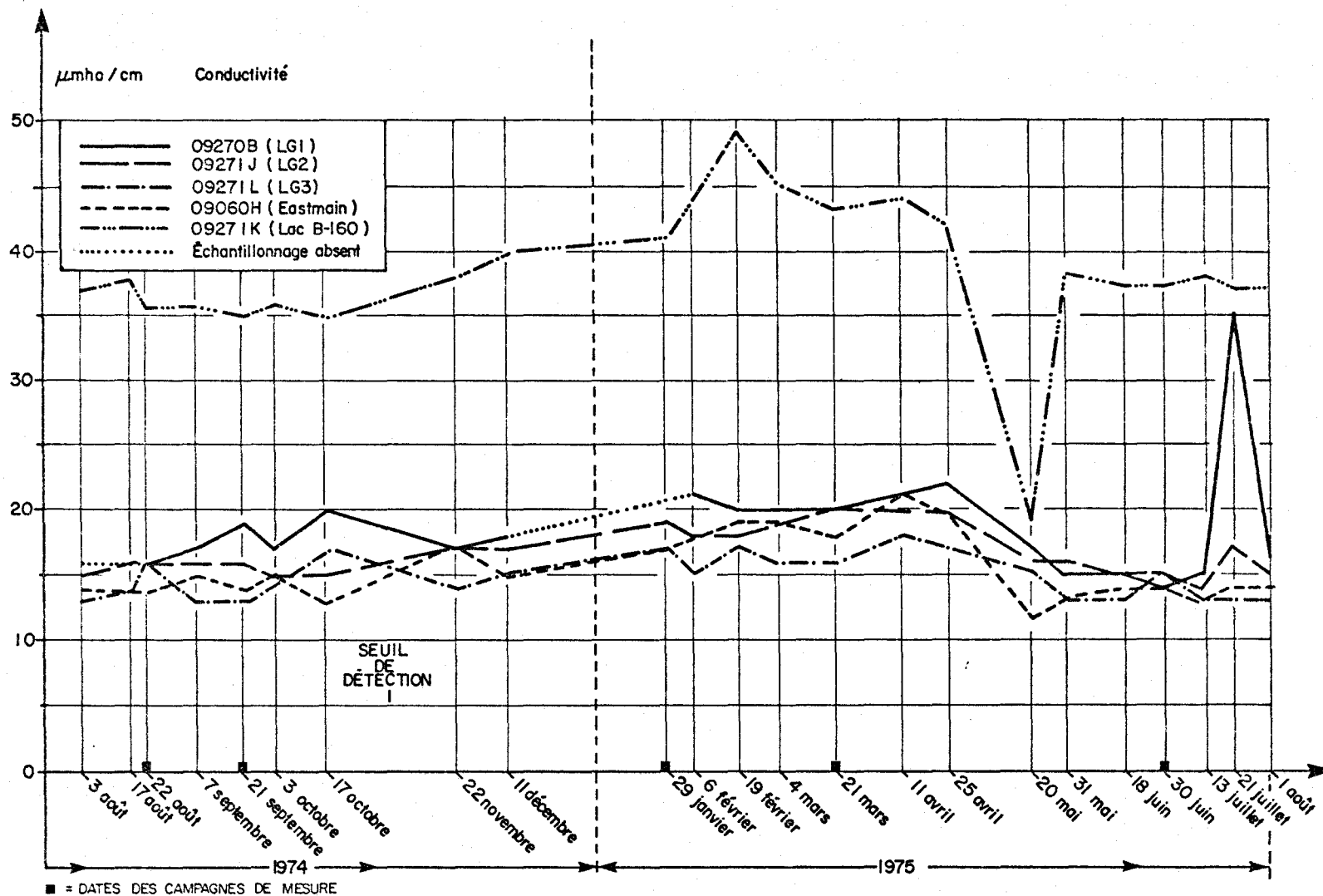


Fig.3.9. Évolution temporelle de la conductivité aux stations de base.

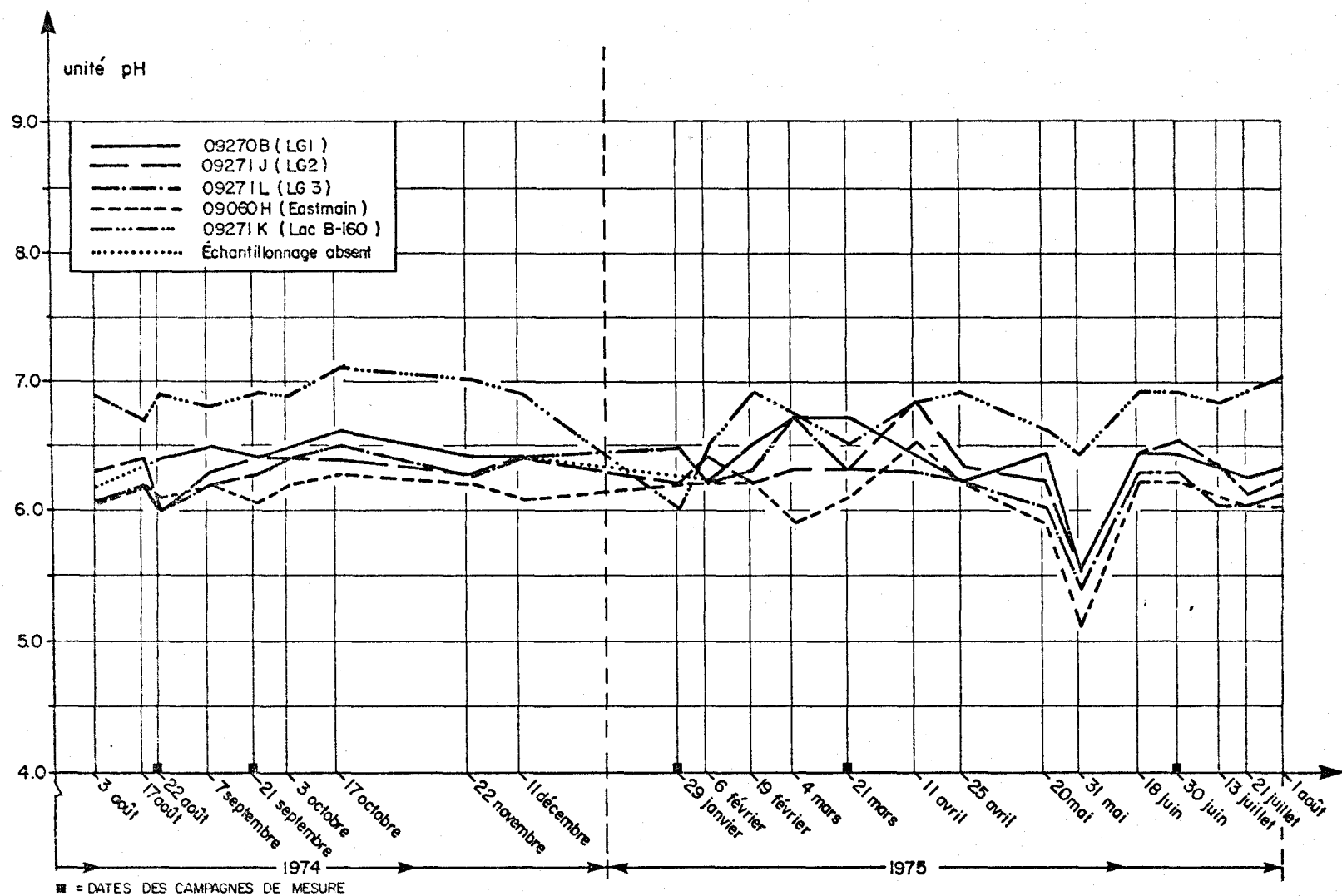


Fig.3.10. Évolution temporelle du pH aux stations de base.

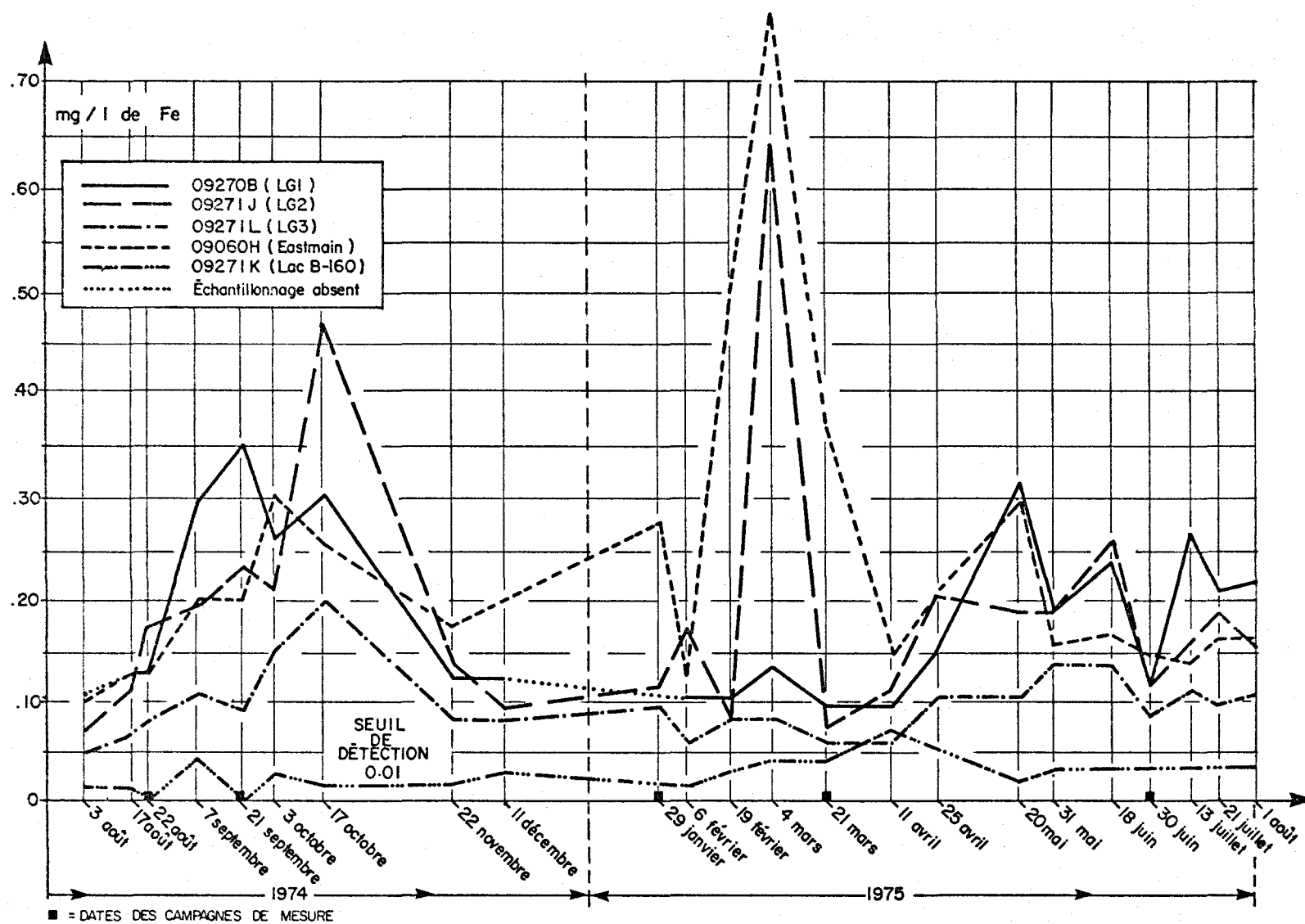


Fig.3.II. Évolution temporelle du fer aux stations de base.

Les solutions saturées contenant entre 50 et 400 mg/l pour des températures de 0 à 25°C, aucun phénomène de précipitation n'est possible.

- Calcium (Ca^{++}) [Figure 3.2]

Le calcium est un produit de l'altération des roches sédimentaires (calcite, aragonite, dolomie, etc...) ou ignées (apatites, feldspaths, amphiboles, etc...). Son niveau est très bas, entre 1 et 2 mg/l pour les rivières des stations de base et entre 3 et 4.8 mg/l à la station 5 (lac B-160). Sur les rivières, les variations sont synchrones et les évolutions des concentrations sont quasi-confondues. En rivière, le niveau général reste relativement stable, avec peut-être une influence de la température en hiver (4/3 et 21/3) (diminution de la vitesse de dissolution), mais pas d'effet de dilution à la débâcle. Par contre, en été, les précipitations semblent avoir une influence.

A la station 5, le comportement est différent avec augmentation progressive des concentrations durant l'hiver et baisse brutale au printemps.

A un pH de 6, la solution est loin de la saturation et aucune précipitation n'est possible.

- Magnésium (Mg^{+}) [Figure 3.3]

Les concentrations sont très faibles, de 0.1 à 0.5 mg/l aux 4 stations de base des rivières. Comme le seuil de sensibilité de l'appareil est de 0.1 mg/l, les variations sont mal représentées dans toute la

gamme. A la station 5 (lac B-160), le niveau du magnésium est environ le double de celui des rivières. Sur les rivières, ces concentrations présentent un maximum vers le 7/9, et un minimum vers le 21/9.

L'effet de dilution durant la débâcle n'est pas sensible.

- Sodium (Na^+) [Figure 3.4]

Le sodium provient principalement de l'altération des feldspaths ou des argiles. Les concentrations en ions sodium varient de 0.5 à 1.6 mg/l aux stations de base, sauf à la station 5 (B-160) où les niveaux mesurés sont environ 3.5 fois plus élevés, ce qui est relié au temps de contact avec les sédiments.

Les fluctuations temporelles aux stations de base sont faibles; on note cependant le maximum de concentration enregistré aux stations 4 et 5 qui correspond à l'étiage de la Eastmain du 186. Les concentrations rencontrées sont très éloignées de la saturation.

- Potassium (K^+) [Figure 3.5]

Le potassium provient de l'altération des roches: orthoclase, microcline, biotite, leucite et néphéline. Les concentrations en ions potassium sont très faibles et varient de 0.1 à 0.7 mg/l sur l'ensemble du bassin,

Aux stations de base, y compris la station 5 (lac B-160), les évolutions sont similaires, mais dans cette gamme, la sensibilité des analyses (0.1 mg/l) est trop faible pour une bonne définition des variabilités. On peut noter un effet de dilution entre le 22/8 et le 7/9

ainsi qu'entre le début de la fonte et le 20 mai. Le potassium est d'origine géologique et a tendance à être retenu par les argiles, ce qui explique la stabilité des concentrations durant l'année et le fait que celles-ci soient inférieures à celles du sodium.

• Alcalinité totale (HCO_3^-) [Figure 3.6]

Au valeurs de pH rencontrées, l'alcalinité totale correspond essentiellement à la concentration des ions bicarbonates. Ces ions représentent les produits de dissociation de l'acide carbonique, soit d'origine atmosphérique et entraîné par les précipitations, soit provenant de la respiration au niveau du sol. Aux stations de base, la gamme de variation de ce paramètre s'étend de 1 à 8 mg/l sauf à la station 5 (lac B-160), où les concentrations sont plus élevées (11 à 17 mg/l), ce qui s'explique par la minéralisation plus élevée liée aux temps de séjour plus longs. Comme la précision des mesures est de 1 mg/l, la définition des profils est relativement mauvaise. On peut noter cependant une baisse de ce paramètre durant la fonte (effet de dilution) et une remontée à partir du 31/5. A partir du 1er août et jusqu'à la fin janvier, les concentrations montent progressivement. Ces tendances se retrouvent aux stations satellites. Ces évolutions sont similaires à celles du pH.

• Sulfates ($\text{SO}_4^{=}$) [Figure 3.7]

Les sulfates proviennent des précipitations atmosphériques ou de l'oxydation des pyrites. Les concentrations mesurées varient de 0,5 à 6 mg/l et présentent des grandes fluctuations pour les 5 stations de base.

Il est à remarquer que pour ce paramètre, la concentration mesurée à la station 5 (lac B-160) est comparable aux autres concentrations.

L'origine météorologique prépondérante explique les augmentations des concentrations aux cinq stations de base synchronisées avec les principales pluies.

Les sulfates sont très solubles et stables dans les eaux courantes sauf en milieu anoxique.

● Chlorures Cl^-

Les chlorures ont trois origines possibles:

- l'altération des roches (sodalite, apatite, micas, hornblende) du Bouclier qui semble probable;
- l'influence des dépôts d'origine marine, surtout dans la partie ouest du bassin;
- les apports de précipitations (surtout à l'ouest).

Les concentrations de chlorures aux stations de base en rivière varient de 0.1 à 1.5 mg/l. A la station 5 (lac B-160), le niveau des chlorures est de 2 à 3 fois plus élevé. Les chlorures sont très solubles dans l'eau et ne sont pas utilisés par les organismes. Les évolutions temporelles aux stations de base sont synchrones et sont probablement liées aux temps de contact avec les sédiments en suspension, ce qui est confirmé par les augmentations de concentrations d'amont vers l'aval.

● Conductivité [Figure 3.9]

La conductivité est un paramètre intégrateur reflétant la charge totale en ions. C'est une variable non additive qui ne permet donc pas l'établissement de profils cumulatifs.

Les valeurs observées en rivière (à l'exception de la station 5) reflètent une très faible minéralisation avec une conductivité variant entre 9 et 25 $\mu\text{mho cm}^{-1}$.

Aux stations de base 1 à 4, les fluctuations restent faibles avec un minimum à la fin de la débacle (31/5), une lente croissance jusqu'à un maximum avant la fonte (31/4) et une brusque chute durant la fonte. En ce qui concerne la station 5 (lac B-160), la conductivité suit la même tendance générale que pour les rivières, mais à un niveau plus élevé (35-50 $\mu\text{mho cm}^{-1}$) dû au temps de contact plus long avec les sédiments, sauf durant la fonte, où l'eau se comporte comme une eau de rivière.

Les valeurs obtenues aux stations satellites montrent la même variabilité temporelle. La variabilité spatiale est légèrement croissante de l'amont vers l'aval.

● pH [Figure 3.10]

Le pH est un paramètre intégrateur reflétant l'acidité générale du milieu. Le pH est une variable non additive ne permettant pas l'établissement de profils cumulatifs. Les valeurs observées reflètent un milieu faiblement acide (pH entre 5.6 et 6.6), comparable à l'acidité des précipitations atmosphériques ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$), pour une pression partielle de CO_2 correspondant à $10^{-3.5}$ atmosphères. C'est une indication que les roches du territoire sont peu attaquées sous l'action de l'acide carbonique.

Aux stations de base, la seule chose qui ressort nettement est la diminution d'une unité de pH, liée à la minéralisation plus faible durant la débacle. Les autres variations sont mineures et non synchronisées. La station 5 (lac B-160) présente un comportement similaire mais avec une acidité plus faible.

Les stations satellites montrent la même variation temporelle. La variation spatiale n'est pas nette.

Les causes de cette acidité se trouvent dans les précipitations et peut-être dans le temps de résidence dans les marécages et les tourbières.

● Fer (Fe) [Figure 3.11]

Le Fer est un produit d'altération des pyroxènes, des amphiboles, des magnétites, des pyrites et des biotites. Le fer mesuré comprend les parties en solution et en suspension. Les concentrations mesurées sont généralement très faibles.

A la station de base 5 (lac B-160), le niveau est stable et faible (.01 à .07 mg/l). Aux autres stations de base, la variabilité est très grande, avec un maximum inexpliqué, mesuré aux stations 2 et 4 au début de mars 1975 et confirmé par 4 analyses.

Parmi les autres fluctuations, on peut noter les concentrations les plus fortes en septembre et octobre.

Les conclusions que l'on peut tirer de cette analyse descriptive des paramètres sont les suivantes:

- la station 5 (lac B-160) a un comportement particulier, différent des autres stations échantillonnées en rivière, à la fois par le niveau général des paramètres et par leur évolution au cours de l'année,
- les eaux sont en général très faiblement chargées.
- aux stations de base, les 23 échantillons définissent avec une assez bonne précision la variabilité temporelle qui est reliée aux épisodes hydrologiques.

3.2 Caractéristiques statistiques des données obtenues

3.2.a Moyenne et écart-type

Pour chaque paramètre et à chaque station on dispose d'une série de valeurs observées dont la taille varie avec le type de station (base ou satellite).

. Pour chaque station de base, il y a généralement 23 valeurs sauf pour la station 1 (LG 1) qui n'en comprend que 21, les prélèvements n'ayant pas été effectués le 17/8/74 et le 29/1/75.

. Pour chaque station satellite, on dispose de 5 valeurs obtenues lors des 5 campagnes, à l'exception de la station 7 pour laquelle on n'a pas mesuré la valeur du 30/6/75.

Pour certains paramètres, la concentration est inférieure au seuil de détection; on a alors systématiquement remplacé cette valeur par la moitié du seuil de détection.

Pour chacune des séries obtenues (à chaque station J et pour chaque paramètre I), on a calculé:

- la moyenne
$$\bar{X}_{I,J} = \sum_K X_{I,J,K}$$

la sommation est effectuée sur l'ensemble des données aux K dates de prélèvements.

- l'écart type (racine carrée de la variance non biaisée)

$$\sigma_{I,J} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_K (X_{I,J,K} - \bar{X}_{I,J})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Les Tables 3.7 et 3.8 donnent respectivement la moyenne $\bar{X}_{I,J}$ et l'écart type $\sigma_{I,J}$ pour chaque paramètre I à chacune des J stations.

Ces caractéristiques générales donnent une bonne idée du comportement global d'un paramètre à une station. D'autre part, compte tenu de la fréquence relativement élevée d'échantillonnage pour les stations de base 1 à 5, on peut considérer à ces stations que les moyennes sont réellement représentatives de la moyenne théorique μ que l'on obtiendrait avec un nombre infini de prélèvements ou, lorsque cela est possible, par un échantillonnage continu.

3.2.b Intervalle de confiance de la moyenne

Si l'on considère par exemple la conductivité à la station 2, on a un échantillon de 23 valeurs réparties au cours de l'année pour lequel on peut calculer:

$$\text{la moyenne} \quad \bar{X}_{9,2} = 15.74$$

$$\text{l'écart type} \quad \sigma_{9,2} = 1.84$$

La véritable valeur $\mu_{9,2}$, que l'on obtiendrait avec un nombre infini de mesures, est inconnue, mais il est possible de déterminer l'intervalle dans lequel cette valeur peut se trouver avec une certaine probabilité P (intervalle de confiance). On peut montrer que $\mu_{9,2}$ est telle que:

Paramètre Station I J	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND.	pH	Fe
1	2.89	1.40	.32	1.08	.40	5.43	2.02	.89	17.62	6.36	.18
2	2.78	1.30	.30	.97	.40	5.35	1.78	.78	15.74	6.29	.18
3	2.71	1.17	.24	.76	.33	4.87	1.70	.58	13.78	6.22	.09
4	3.47	1.39	.24	.86	.37	4.17	2.14	.69	14.52	6.10	.23
5	2.45	4.10	.54	2.74	.38	12.78	2.90	2.23	37.35	6.78	.03
6	2.96	1.72	.28	1.14	.38	7.00	1.72	.76	19.00	6.36	.14
7	3.25	1.70	.40	1.32	.42	6.75	2.20	.92	20.25	6.30	.16
8	2.54	1.20	.20	.64	.30	5.00	1.80	.48	12.60	6.24	.13
9	3.22	1.18	.18	.66	.32	3.80	1.80	.31	11.00	6.00	.13
10	2.36	1.38	.22	.66	.32	5.00	1.58	.41	13.20	6.24	.11
11	1.80	1.20	.24	.66	.32	5.30	1.52	.64	12.20	6.18	.11
12	3.14	1.50	.34	1.22	.40	4.60	2.42	.80	16.20	6.12	.24
13	2.48	1.24	.44	1.50	.50	6.50	2.10	1.18	17.40	6.22	.17
14	2.56	1.62	.40	1.38	.50	6.20	2.24	1.20	19.00	6.47	.11
15	2.68	1.16	.28	.80	.34	3.00	1.90	.52	13.80	5.68	.15
16	2.34	1.74	.20	.82	.42	7.80	1.84	.44	17.40	6.36	.08
17	2.14	1.50	.22	.68	.34	6.40	1.60	.88	14.20	6.30	.10
18	2.26	1.06	.20	.58	.38	4.80	1.54	.72	13.20	6.14	.07
19	1.78	.84	.28	.56	.26	3.75	1.66	.66	11.60	5.92	.05
20	1.88	.96	.28	.52	.24	4.80	1.54	.64	11.40	6.06	.05
21	1.54	.90	.30	.49	.30	4.25	1.58	.62	11.20	6.25	.04

Table 3.7 : Table des moyennes

$\bar{x}_{I,J}$

Paramètre I Station J	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND.	pH	Fe
1	.64	.28	.08	.29	.09	1.25	.64	.44	4.42	.25	.08
2	.64	.30	.08	.22	.13	1.47	.56	.35	1.84	.23	.13
3	.68	.27	.06	.26	.13	1.18	.51	.32	1.68	.25	.03
4	1.12	.38	.07	.32	.13	1.47	.67	.35	2.54	.25	.15
5	.42	.55	.10	.67	.13	1.65	.93	.54	5.60	.24	.01
6	.60	.26	.04	.18	.13	2.65	.54	.38	2.55	.15	.02
7	.52	.29	.08	.25	.15	2.50	.74	.36	2.22	.14	.07
8	.78	.37	.07	.09	.10	1.58	.84	.32	1.82	.26	.14
9	1.05	.33	.04	.05	.18	1.30	.38	.27	1.22	.22	.03
10	.75	.38	.04	.11	.08	1.22	.58	.34	1.64	.26	.12
11	.83	.43	.05	.26	.11	.97	.40	.32	2.59	.37	.03
12	.86	.23	.05	.28	.10	1.14	.72	.44	2.17	.19	.09
13	1.06	.43	.09	.26	.14	3.79	.76	.44	4.88	.36	.06
14	.53	.61	.07	.19	.14	2.17	.86	.41	2.35	.30	.02
15	.84	.17	.04	.12	.17	1.41	.54	.28	1.79	.16	.05
16	.68	.27	.07	.19	.13	2.68	.80	.36	1.82	.21	.02
17	.99	.41	.08	.15	.11	2.30	.45	.61	3.11	.16	.03
18	.61	.30	.07	.04	.08	1.30	.42	.26	1.92	.31	.06
19	.42	.27	.08	.09	.11	1.26	.63	.31	1.82	.57	.04
20	.74	.27	.08	.04	.11	.84	.50	.23	1.95	.18	.01
21	.52	.20	.07	.16	.16	1.26	.45	.16	2.68	.21	.03

Table 3.8: Table des écarts-types $\sigma_{I,J}$

$$\bar{X}_{9,2} - t_0 \frac{\sigma_{9,2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_{9,2} \leq \bar{X}_{9,2} + t_0 \frac{\sigma_{9,2}}{\sqrt{N}}$$

où t_0 est la variable de Student à $(N-2)$ degrés de liberté, de probabilité au dépassement $(1 - P/2)$; N est le nombre de valeurs de l'échantillon (ici, $N = 23$.)

Si l'on considère par exemple l'intervalle de confiance à 90%, c'est-à-dire l'intervalle qui contient $\mu_{9,2}$ avec une probabilité de 90%, la valeur correspondante de t_0 à 21 degrés de liberté et avec une probabilité au dépassement de 5% est d'après les tables $t_0 = 1.721$.

On en déduit alors l'intervalle de confiance à 90% de $\mu_{9,2}$:

$$15.74 - 1.721 \times \frac{1.84}{\sqrt{23}} \leq \mu_{9,2} \leq 15.74 + 1.721 \times \frac{1.84}{\sqrt{23}}$$

c'est-à-dire:

$$15.08 \leq \mu_{9,2} \leq 16.40 \quad (\text{I.C. à 90\%})$$

Pour une probabilité donnée (donc un niveau de confiance donné), on peut réduire l'intervalle de confiance, c'est-à-dire connaître plus précisément le domaine où se trouve la vraie moyenne en augmentant le nombre de mesures, mais aussi les coûts.

Si, d'autre part, pour un échantillon de taille N fixée, on augmente le niveau de confiance, on obtient un intervalle de confiance plus large; si par exemple on recherche l'intervalle de confiance à 95% de $\mu_{9,2}$ la valeur de t_0 (correspondant à une probabilité au dépassement de 2.5%) est $t_0 = 2.080$ et l'on obtient:

$$14.94 \leq \mu_{g,2} \leq 16.54 \quad (\text{I.C. à 95\%})$$

Ce calcul détaillé, que nous avons effectué à titre indicatif pour la conductivité à la station 2, peut se faire pour tous les paramètres à chacune des stations en utilisant les valeurs des tables 3.7 et 3.8.

Il est à noter que dans le cas des stations satellites (6 à 21), on ne dispose en général que de 5 valeurs, et l'on obtiendra alors des intervalles de confiance assez larges.

Si nous considérons la conductivité à la station 12, on a :

$$\bar{X}_{g,12} = 16.20 \quad \sigma_{g,12} = 2.17 \quad N = 5$$

L'intervalle de confiance à 90% pour lequel $t_0 = 2.353$ est tel que :

$$13.92 \leq \mu_{g,12} \leq 18.48 \quad (\text{I.C. à 90\%})$$

L'intervalle de confiance à 95% pour lequel $t_0 = 3.182$, est tel que :

$$13.11 \leq \mu_{g,12} \leq 19.29 \quad (\text{I.C. à 95\%})$$

Application à la détermination de la taille d'un échantillon

Pour un échantillon de taille N , on peut déterminer la moyenne $\bar{X}$ qui est une estimation de la moyenne théorique μ , et l'écart-type σ . L'écart-type sur la moyenne est alors $\sigma_{\bar{X}} = \sigma / \sqrt{N}$ et l'on peut montrer que :

$$(\bar{X} - \mu) / (\sigma / \sqrt{N}) \text{ suit une loi normale centrée réduite.}$$

Ce résultat peut être utilisé pour déterminer la taille N_0 que doit avoir un échantillon pour que l'écart admissible entre la moyenne de cet échantillon et la moyenne théorique μ soit inférieur à un seuil donné L avec un niveau de confiance $(1-\alpha)$. On a :

$$N_0 \geq \left(\frac{\sigma u_{\alpha/2}}{L} \right)^2$$

où $u_{\alpha/2}$ est la variable normale centrée réduite de probabilité au dépassement $\frac{\alpha}{2}$. Dans le cas de l'exemple précédent (conductivité à la station 12), si l'on veut que $|\bar{X}_{9,12} - \mu_{9,2}| \leq L = 1$, à un niveau de 90%, on a $u_{5\%} = 1.645$, $\sigma = 2.17$ et on en déduit la taille minimale N_0 qui devrait avoir l'échantillon :

$$N_0 \geq \left(\frac{2.17 * 1.645}{1} \right)^2 = 12.74$$

Ce résultat qui peut être utilisé avec des caractéristiques autres que la moyenne, les percentiles par exemple, est cependant conditionné par l'hypothèse théorique d'indépendance des éléments de l'échantillon.

3.2.c Représentativité des 5 campagnes de mesure

Les 5 campagnes de mesure sont effectuées à des dates réparties tout au long de l'année. En ce qui concerne les 16 stations satellites, les observations sont effectuées à ces dates, tandis que pour les 5 stations de base, on dispose en général de 23 observations (sauf pour la station 1, on a seulement 21 observations). Parmi ces 23 observations,

5 d'entre elles sont effectuées aux mêmes dates que les campagnes de mesure aux stations satellites.

Pour examiner si les échantillonnages à ces 5 dates conduisent, pour un paramètre donné I , à une moyenne représentative de la moyenne annuelle $\mu_{I,J}$, nous pouvons comparer pour chaque station de base J ($J = 1, \dots, 5$) la moyenne $\bar{X}'_{I,J}$ calculée sur l'ensemble des observations (Table 3.7), avec la moyenne $\bar{X}_{I,J}$ (Table 3.9) calculée sur l'échantillon des 5 dates correspondant aux 5 campagnes.

Cette comparaison de 2 moyennes peut s'effectuer à l'aide du test de Student. En fait, nous voulons examiner si $\bar{X}'_{I,J}$ calculée sur un échantillon réduit mais réparti au cours de l'année, conduit à une bonne estimation de la moyenne annuelle et donc est représentative de celle-ci.

Le test de Student prend 2 formes suivant que l'hypothèse d'égalité des variances est ou n'est pas vraie. C'est pourquoi, nous examinons préalablement cette hypothèse.

Test d'égalité des variances (test de F)

Pour le paramètre I et la station de base J , on dispose de 2 estimations de la variance,

$\sigma^2_{I,J}$ calculée sur l'ensemble des valeurs (Table 3.8)

$\sigma'^2_{I,J}$ calculée à partir des valeurs correspondant aux dates des campagnes (Table 3.9)

Le test F de Fischer permet d'examiner si il y a une différence

Paramètre												
Station		SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND.	pH	Fe
MOYENNE ($\bar{X}'_{I,J}$)	1*	2.63	1.40	.30	.95	.43	5.50	1.95	.55	16.25	6.48	.17
	2	2.78	1.40	.30	.96	.46	5.40	1.94	.70	16.20	6.28	.14
	3	2.60	1.24	.24	.76	.32	5.20	1.70	.46	14.40	6.28	.08
	4	3.50	1.48	.26	.74	.36	4.20	1.92	.51	14.40	6.14	.22
	5	2.50	4.06	.52	2.60	.36	12.80	3.18	1.96	37.40	6.64	.02
ECART-TYPE ($\sigma'_{I,J}$)	1*	.69	.33	.08	.10	.15	1.00	.33	.39	2.75	.15	.12
	2	.67	.29	.12	.11	.15	1.14	.33	.48	2.17	.19	.06
	3	.70	.27	.05	.09	.08	.84	.50	.36	1.52	.18	.01
	4	1.19	.26	.05	.05	.09	.84	.36	.37	1.95	.05	.10
	5	.26	.51	.08	.28	.13	1.30	1.72	.45	3.44	.40	.01

Table 3.9: Moyenne ($\bar{X}'$) et écart-type (σ') aux stations de base en considérant les valeurs relatives aux 5 campagnes.
(*seulement 4 valeurs, donnée absente pour le 29/1/75).

significative entre les variances théoriques estimées par $\sigma_{I,J}^2$ et $(\sigma'_{I,J})^2$.

On considère le rapport F donné par la Table (3.10):

$$F = \left(\frac{\sigma'_{I,J}}{\sigma_{I,J}} \right)^2$$

Pour un niveau de signification α , on peut déterminer les limites F_1 et F_2 de la zone d'acceptation de l'hypothèse d'égalité des variances:

Si $F_1 < F < F_2$, on accepte l'hypothèse que les 2 séries proviennent de population de même variance, autrement on rejette cette hypothèse.

Les limites F_1 et F_2 de la zone d'acceptation sont données par les tables de la loi F et dépendent du niveau de signification α et de la taille N et N' des 2 séries à partir desquelles on calcule les variances.

La Table 3.11 donne les valeurs de F_1 et F_2 correspondant aux niveaux de signification $\alpha = 5\%$ et $\alpha = 1\%$ pour les cas qui nous intéressent ici:

Station 1: série courte de 4 valeurs ($N' = 4$)
série longue de 21 valeurs ($N = 21$)

Station 2 à 5 : série courte de 5 valeurs ($N' = 5$)
série longue de 23 valeurs ($N = 23$)

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	CO ₃	COND.	pH	Fe
1	1.16	1.39	1.00	.12	2.78	.64	.27	.79	.39	.36	2.25
2	1.10	.93	2.25	.25	1.33	.60	.35	1.88	1.39	.68	.21
3	1.06	1.00	.69	.12	.38	.51	.96	1.27	.82	.52	.11*
4	1.14	.47	.51	.02**	.48	.33	.29	1.12	.59	.04**	.44
5	.38	.86	.64	.17	1.00	.62	3.42	.69	.38	2.78	1.00

Table 3.10: Test d'égalité des variances:

calcul de $F = \left(\frac{\sigma'_{I,J}}{\sigma_{I,J}} \right)^2$

* valeur significative (niveau 5%)

** valeur très significative (niveau 1%)

	$\alpha = 5\%$		$\alpha = 1\%$
Station 1	F ₁	0.070	0.023
	F ₂	3.859	5.818
Stations 2 à 5	F ₁	0.117	0.050
	F ₂	3.440	5.017

Table 3.11 Valeurs limites de la zone d'acceptation (Test F)

En comparant les valeurs calculées de F (données dans la Table 3.10) avec les limites F₁ et F₂ (Table 3.11), on constate que l'hypothèse d'égalité des variances est vraie dans pratiquement tous les cas. Seuls 3 cas font exception: Fe à la station 3, Na et P à la station 4. En examinant respectivement les figures 3.11, 3.4 et 3.10, qui indiquent les fluctuations de ces paramètres, on constate que dans ces cas les 5 valeurs de la série courte sont très voisines, ce qui conduit à un écart-type très faible et à une mauvaise représentativité de la variabilité générale de la série des 23 valeurs. Il en résulte de très faibles valeurs de F inférieures à la limite F₁ de la zone d'acceptation.

Test d'égalité des moyennes (test de Student)

Dans le cas où les 2 séries proviennent de populations de même variance, ce qui, comme l'indique la Table 3.10, est le cas général, nous pourrions examiner si les 2 séries proviennent de populations de même moyenne en calculant t_0 tel que:

$$t_0 = \frac{\bar{X}_{I,J} - \bar{X}'_{I,J}}{S_{I,J} \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{N'}}}$$

t_0 suit une loi de Student à $\nu = N + N' - 2$ degrés de liberté
 $S_{I,J}^2$ est la variance combinée telle que:

$$S_{I,J}^2 = \frac{(N-1) \sigma_{I,J}^2 + (N' - 1) (\sigma'_{I,J})^2}{N + N' - 2}$$

Pour un niveau de signification α donné, il est possible de tester l'égalité des moyennes théoriques, estimées par $\bar{X}_{I,J}$ et $\bar{X}'_{I,J}$, en comparant t_0 avec les valeurs critiques de la zone d'acceptation:

si $-t_{\alpha/2} \leq t_0 \leq t_{\alpha/2}$, ou encore $|t_0| \leq t_{\alpha/2}$

($t_{\alpha/2}$ étant la variable de Student à α degrés de liberté, de probabilité au dépassement $\alpha/2$) on accepte l'hypothèse d'égalité des moyennes.

La Table 3.12 donne la valeur de l'écart-type combiné $S_{I,J}$, calculé lorsque les 2 séries proviennent de population de même variance; la Table 3.13 donne la valeur de t_0 que l'on doit comparer aux valeurs critiques du test de Student:

- . pour la station 1, on a: $N = 21$, $N' = 4$ donc $\nu = 23$
 et $t_{2.5\%} = 2.069$; $t_{0.5\%} = 2.807$
- . pour les station 2 à 5, on a: $N = 23$, $N' = 5$ et $\nu = 26$
 on en déduit $t_{2.5\%} = 2.056$; $t_{0.5\%} = 2.779$

La Table 3.13 montre que dans tous les cas, la valeur calculée de t_0 est inférieure à la valeur critique $t_{2.5\%}$ au niveau de signification 5%. On en conclut que la série courte composée des 5 valeurs

Paramètre Station	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND.	pH	Fe
1	.65	.29	.08	.27	.10	1.22	.61	.43	4.24	.24	.09
2	.64	.30	.09	.21	.13	1.42	.53	.37	1.89	.22	.12
3	.68	.27	.06	.24	.12	1.13	.51	.33	1.66	.24	-
4	1.13	.36	.07	-	.12	1.39	.63	.35	2.46	-	.14
5	.40	.54	.10	.63	.13	1.60	1.09	.53	5.33	.27	.01

Table 3.12: Ecart-type combiné $s_{I,J}$ (lorsque les variances des 2 séries sont égales).

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND.	pH	Fe
1	.74	0	.46	.87	.55	.11	.21	1.44	.59	.92	.21
2	0	.68	0	.10	.91	.07	.61	.43	.49	.09	.67
3	.33	.53	0	0	.16	.59	0	.74	.76	.51	-
4	.05	.50	.60	-	.16	.04	.71	1.03	.10	-	.14
5	.25	.15	.42	.45	.31	.03	.52	1.04	.02	1.05	2.03

Table 3.13: Test d'égalité des moyennes, valeurs de $|t_o|$

correspondant aux campagnes de mesures conduit à l'estimation d'une moyenne non significativement différente de celle obtenue en considérant la série totale. Pour les 3 cas où l'égalité des variances a été rejetée, la valeur calculée t_0 est donnée par:

$$t_0 = \frac{\bar{X}_{I,J} - \bar{X}'_{I,J}}{\sqrt{\frac{\sigma^2_{I,J}}{N} + \frac{(\sigma'_{I,J})^2}{N'}}}$$

et t_0 suit une loi de Student à

$$v = \frac{\left[\frac{\sigma^2_{I,J}}{N} + \frac{(\sigma'_{I,J})^2}{N'} \right]^2 (N-1)(N'-1)}{\left(\frac{\sigma^2_{I,J}}{N} \right)^2 (N'-1) + \left(\frac{(\sigma'_{I,J})^2}{N'} \right)^2 (N-1)}$$

on obtient:

pour Fe à la station 3	$ t_0 = 1.30$	$v = 26$
Na à la station 4	$ t_0 = 1.71$	$v = 33$
pH à la station 4	$ t_0 = .71$	$v = 26$

Dans ces 3 cas on est conduit à accepter l'hypothèse d'égalité des moyennes, l'hypothèse d'égalité des variances étant rejetée.

En conclusion: A chaque station de base et pour chacun des paramètres, la moyenne calculée sur les 5 dates correspondant aux campagnes de mesures est représentative de la moyenne annuelle estimée par la moyenne de la série totale. Il est logique d'accepter ce résultat également pour les 16 stations satellites bien qu'on ne puisse le démontrer et nous supposons donc que les moyennes obtenues pour chacun des paramètres à chacune de ces stations sont représentatives de la moyenne annuelle.

3.2.d Evolution spatiale des moyennes des paramètres

Il a été admis par extension que les moyennes calculées aux stations satellites sont représentatives des moyennes annuelles. Ceci nous permet donc de comparer entre elles les moyennes annuelles présentée à la Table 3.7 et de vérifier si l'hypothèse de l'existence d'un gradient Est-Ouest des concentrations suggérée par GRISEL et BOBEE (1974) est vérifiée.

Pour cela, nous n'avons considéré que les stations situées à la hauteur du parallèle de la Rivière La Grande, indépendamment des bassins hydrographiques sur lesquelles elles se trouvent. Ceci revient à ne pas tenir compte directement du cumul des charges pour les stations situées en aval et à supposer une évolution continue de la géologie qui est l'origine principale des concentrations mesurées.

Dans la Table 3.14, nous avons comparé l'évolution Est-Ouest des paramètres pour les stations 21, 19, 20, 18, 10, 8, 3, 2 et 1, dans cet ordre.

Les paramètres Silice (SiO_2), Conductivité et Fer présentent un gradient Est-Ouest croissant particulièrement net; les paramètres Calcium (Ca), Sodium (Na), Bicarbonate (HCO_3), Sulfate (SO_4) et Chlorure Cl) semblent montrer un gradient Est-Ouest faiblement croissant; les paramètres Magnésium (Mg), Potassium (K) et le pH ne présentent aucune tendance nette.

En conclusion, l'hypothèse d'un gradient Est-Ouest de la plupart des paramètres paraît vérifiée, mais de façon bien moins nette que les données historiques ne l'auraient laissé prévoir.

Paramètre Station	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
21	1.54	.90	.30	.49	.30	4.25	1.58	.62	11.20	6.25	.04
19	1.78	.84	.28	.56	.26	3.75	1.66	.66	11.60	5.92	.05
20	1.88	.96	.28	.52	.24	4.80	1.54	.64	11.40	6.06	.05
18	2.26	1.06	.20	.58	.30	4.80	1.54	.72	13.20	6.14	.07
10	2.36	1.38	.22	.66	.32	5.00	1.58	.41	13.20	6.24	.11
8	2.54	1.20	.20	.64	.38	5.00	1.80	.48	12.60	6.24	.13
3	2.71	1.17	.24	.76	.33	4.87	1.70	.58	13.78	6.22	.09
2	2.78	1.30	.30	.97	.40	5.35	1.78	.78	15.74	6.29	.18
1	2.89	1.40	.32	1.09	.41	5.41	2.01	.89	17.34	6.36	.18
Tendance	+	+	0	+	0	+	+	+	+	0	+

Table 3.14: Evolution générale Est-Ouest des moyennes annuelles des paramètres

4. RELATIONS ENTRE STATIONS ET ENTRE PARAMETRES

4.1 Coefficient de corrélation

Lorsque pour deux grandeurs X et Y , on dispose d'une série de taille N , il est possible de mesurer leur degré de relation par le coefficient de corrélation r tel que;

$$r = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (X_i Y_i) - N \bar{X} \bar{Y} \right]}{(N-1) \sigma_X \sigma_Y}$$

$\bar{X}$ et $\bar{Y}$ étant respectivement la moyenne de la série de X et de celle de Y ,

σ_X et σ_Y étant les écart-types de la série de X et de celle de Y déduit des variances non biaisées (cf 3.2.a).

Un fort coefficient de corrélation est en général indicatif d'une bonne relation linéaire entre les variables X et Y , cette dépendance n'est pas cependant systématique en raison des possibilités de corrélation fictive que l'on peut détecter par un examen graphique.

Le coefficient r est déterminé à partir des 2 échantillons de X et Y et est une estimation de la valeur théorique ρ que l'on obtiendrait si l'on disposait de l'ensemble des valeurs de X et de Y .

Même lorsque la valeur r obtenue est élevée, il ne faut pas en déduire que la véritable valeur ρ (inconnue) est significativement différente de 0.

Pour tester si l'on peut admettre l'hypothèse que ρ est significativement différente de 0, on calcule pour r et N connus la quantité t telle que:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2} / \sqrt{N - 2}}$$

t suit une loi de Student à $\nu = (N-2)$ degrés de liberté.

Si pour un niveau de signification α on a $|t| \leq t_{\alpha/2}$ où $t_{\alpha/2}$ est la valeur de la variable de Student de probabilité au dépassement $\alpha/2$, on accepte que l'hypothèse $\rho = 0$ est vraie.

Connaissant N, donc ν , il est possible d'en déduire à partir de la relation précédente la valeur critique r_0 , que la valeur calculée r doit dépasser, pour que l'hypothèse $\rho \neq 0$ soit acceptée. On a :

$$|r_0| = \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{t_{\alpha/2}^2 + (N - 2)}}$$

Par exemple, si on considère des séries de taille $N = 23$ ($\nu = 21$) pour un niveau de signification de 5% on a $t_{\alpha/2} = 2.08$ et $r_0 = .413$; donc si la valeur calculée r est inférieure à r_0 , on ne peut dire que le coefficient de corrélation théorique ρ est significativement différent de 0.

4.2 Régression simple

Le principal intérêt d'un fort coefficient de corrélation entre les variables X et Y est de mettre en évidence l'existence d'une relation linéaire entre ces variables et de permettre la prédiction de Y en fonction de X .

Si X_i et Y_i sont les valeurs mesurées de X et Y , ($i = 1, \dots, N$), la valeur prédite y_i de Y est telle que:

$$y_i = a + b (X_i - \bar{X})$$

Les coefficients a et b de la régression sont déterminés de manière à minimiser la somme des carrés des écarts $e_i = Y_i - y_i$ entre la valeur mesurée Y_i et la valeur prédite y_i ; on montre que l'on a alors:

$$a = \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

$$b = r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X}$$

Il est possible de construire les intervalles de confiance au niveau $(1 - \alpha)$ de la valeur théorique η_i estimée par y_i pour x_i donné:

$$y_i - ts \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\Sigma}} \leq \eta_i \leq y_i + ts \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\Sigma}}$$

De la même manière les limites de l'intervalle de confiance au niveau $(1 - \alpha)$ d'une valeur individuelle Y_i pour X_i fixé sont données par:

$$y_i - ts \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\Sigma}} \leq Y_i \leq y_i + ts \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\Sigma}}$$

avec $\Sigma = (N-1) \sigma_X^2$

$$s^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2$$

t = valeur de la variable de Student à $\nu = (N-2)$ degrés de liberté et de probabilité au dépassement $\alpha/2$.

Lorsque l'on a déterminé la régression linéaire existant entre les variables X et Y , il est alors possible de ne mesurer que la variable X et de prédire à partir de X_i l'estimation y_i de la variable Y .

4.3 Relations entre paramètres

Pour chacune des stations de base, nous avons déterminé le coefficient de corrélation entre chaque couple de paramètres. Les résultats obtenus figurent dans les Tables 4.1 à 4.5 respectivement pour les stations 1 à 5.

Dans chaque cas on a examiné si le coefficient de corrélation est significativement différent de 0 aux niveaux ~~5%~~ et 1%. Une forte valeur de coefficient de corrélation est indicative d'une interrelation linéaire possible entre les 2 paramètres considérés.

Sur au moins 4 des 5 stations de base, on observe des corrélations significativement différentes de 0 entre:

Conductivité et Silice, Conductivité et Calcium,
Conductivité et Bicarbonates, Bicarbonates et Silice,
Bicarbonates et pH.

Toutes ces corrélations s'expliquent par la nature des roches altérées par l'eau de pluie. Il y aura lieu, lorsque davantage de mesures seront disponibles, de déterminer les relations régressives existant entre ces différents

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
SiO ₂		.36	.21	.51*	-.28	.57**	.27	.41*	.24	.14	-.26
Ca			.18	.64**	-.26	.23	.09	.38	.50*	-.05	-.20
Mg				.44*	-.03	.33	.25	.32	.15	.22	.37
Na					-.15	.38	.36	.54**	.38	.03	-.10
K						-.06	-.14	.30	.00	.06	.04
HCO ₃							.53**	.22	.13	.80**	-.20
SO ₄								.08	.31	.43*	.23
Cl									.40	-.13	-.03
COND										.05	-.06
pH											.06
Fe											

Table 4.1 Coefficients de corrélation entre paramètres: Station LG1 (09270B)

* valeur significativement différente de 0 (niveau 5%)

** valeur très significativement différente de 0 (niveau 1%)

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
SiO ₂		.35	.28	.38	-.42*	.51*	.27	.33	.82**	.13	.17
Ca			.63**	.63**	.04	.42*	.34	.21	.52*	.15	-.36
Mg				.48*	.18	.21	.28	.27	.40	-.09	.04
Na					.09	.27	.30	.37	.59**	.05	.02
K						-.29	-.19	-.04	-.06	-.10	-.08
HCO ₃							.65**	-.11	.51*	.55**	.09
SO ₄								-.07	.19	.11	.08
Cl									.28	-.30	.15
COND										.15	-.01
pH											.01
Fe											

Table 4.2 Coefficients de corrélation entre paramètres: Station LG2 (09271J)

* valeur significativement différente de 0 (niveau 5%)

** valeur très significativement différente de 0 (niveau 1%)

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
SiO ₂		.16	-.23	.11	-.44*	.52*	.19	.26	.67**	.30	-.02
Ca			.34	.54**	.43*	.31	.02	.08	.34	.16	.07
Mg				.32	.54**	.21	-.11	.26	.23	.20	.50*
Na					.60**	.26	-.09	.18	.26	.09	-.05
K						-.04	-.29	-.10	-.15	-.03	.00
HCO ₃							.31	.14	.54**	.71**	-.02
SO ₄								-.22	.07	.24	.12
Cl									.13	.01	.21
COND										.46*	-.09
pH											-.01
Fe											

Table 4.3 Coefficients de corrélation entre paramètres: Station LG3 (09271L)

* valeur significativement différente de 0 (niveau 5%)

** valeur très significativement différente de 0 (niveau 1%)

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
SiO ₂		.51*	.37	.29	.20	.73**	.31	.29	.89**	.22	.54**
Ca			.47*	.41	.15	.51*	.34	.22	.60**	.38	.05
Mg				.23	.44*	.45*	.14	.20	.48*	.40	.40
Na					.38	.55**	.31	.27	.42*	.36	.08
K						.47*	-.06	.23	.44*	.42*	.19
HCO ₃							.28	.07	.83**	.66**	.32
SO ₄								.05	.19	.15	.42*
Cl									.31	-.22	.07
COND										.38	.41
pH											-.09
Fe											

Table 4.4 Coefficient de corrélation entre paramètres: Station 09060H

* valeur significativement différente de 0 (niveau 5%)

** valeur très significativement différente de 0 (niveau 1%)

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
SiO ₂		.77**	.37	.21	.15	.62**	-.01	.75**	.94**	-.12	.44*
Ca			.52*	.55**	-.02	.43*	-.03	.67**	.75**	-.22	.60**
Mg				.62**	.54**	.11	.18	.38	.42*	.02	.10
Na					.29	-.10	.26	.26	.21	.06	.24
K						-.08	.29	.25	.25	.35	-.17
HCO ₃							.07	.37	.60**	-.07	.22
SO ₄								-.05	.05	.34	-.07
Cl									.79**	-.18	.37
COND										-.10	.41
pH											.02
Fe											

Table 4.5 Coefficient de corrélation entre paramètres: Station 09271K

* valeur significativement différente de 0 (niveau 5%)

** valeur très significativement différente de 0 (niveau 1%)

paramètres et d'examiner leur signification physico-chimique.

Dans la plupart des cas où l'on met en évidence un coefficient de corrélation significativement différent de 0, le coefficient n'est cependant pas suffisamment grand pour permettre d'établir une relation régressive. Dans quelques cas cependant où l'on observe un fort coefficient de corrélation, il est intéressant d'examiner les relations obtenues. A titre indicatif, nous envisageons ici la relation entre la conductivité et SiO_2 aux stations de base Eastmain et B-160 pour lesquelles le coefficient de corrélation vaut respectivement 0.89 et 0.94. Les points expérimentaux (Annexe 1) sont tracés sur les Figures 4.1 et 4.2 et sont numérotés de 1 à 23 dans l'ordre d'échantillonnage. Malgré les fortes valeurs du coefficient de corrélation, on note une dispersion assez grande des points. Dans le cas plus particulier du lac B-160 (Figure 4.2), le point 17 correspondant à la date du 20/5/74, donc à la débâcle, est nettement isolé. Dans le cas de cette station, il y aurait lieu, pour établir une relation rigoureuse entre la Conductivité et SiO_2 , de prélever des échantillons avec une fréquence plus élevée au moment de la crue de printemps. Cet exemple montre qu'une forte valeur du coefficient de corrélation ne correspond pas toujours à une relation linéaire étroite. Si on supprime le point correspondant au 20/5/75, on obtient un coefficient de corrélation moins élevé que traduit la dispersion du nuage de points restants.

Dans le cas de la relation entre la Conductivité et SiO_2 à la station de base 4 (Eastmain), nous allons déterminer la droite de régression qui ajuste le mieux le nuage de points (Figure 4.1). En utilisant les notations du paragraphe 4.2, X_i et Y_i étant respectivement les valeurs mesurées

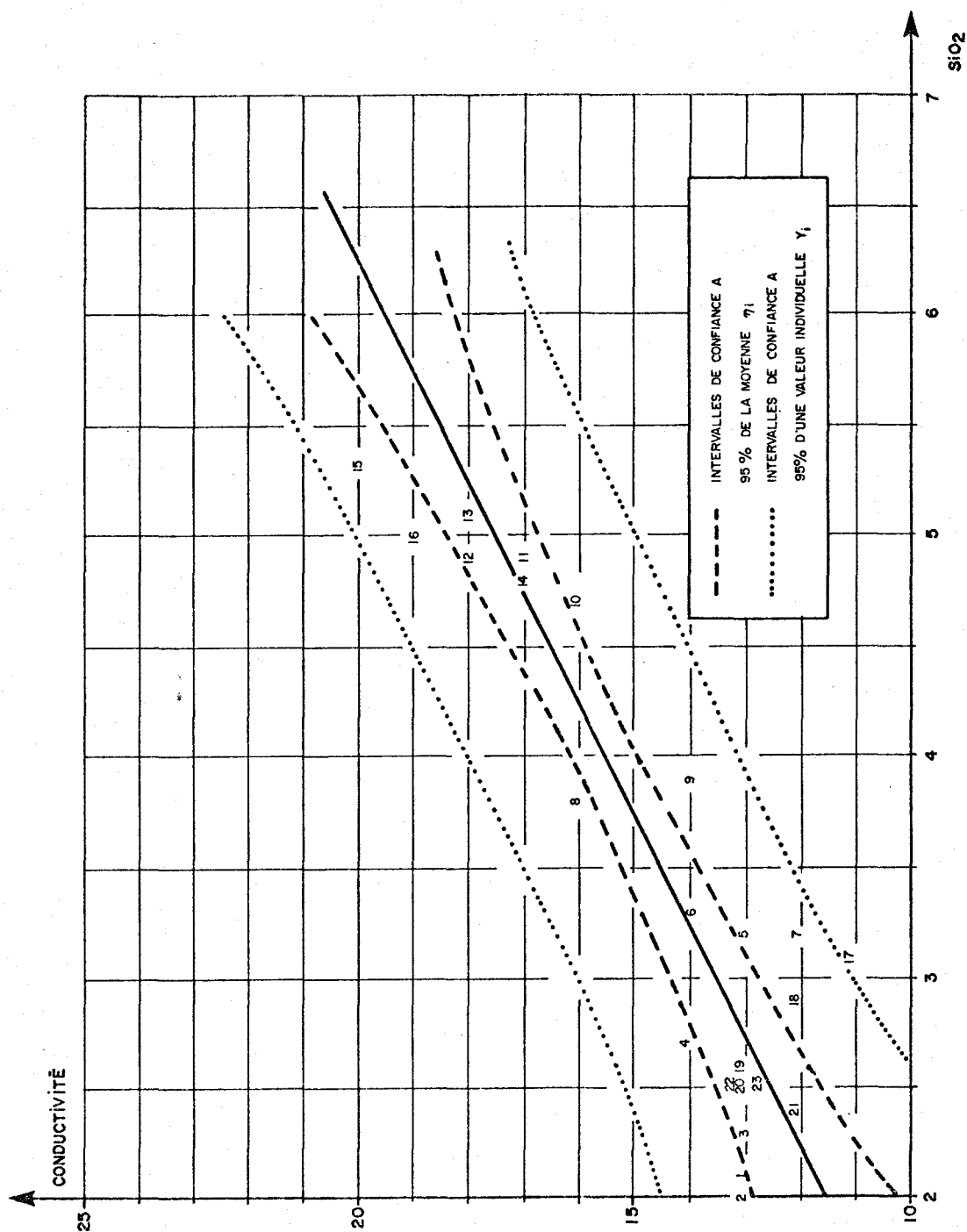


Fig. 4.1. Relation entre la conductivité et la silice - Station 4 (09060H) .

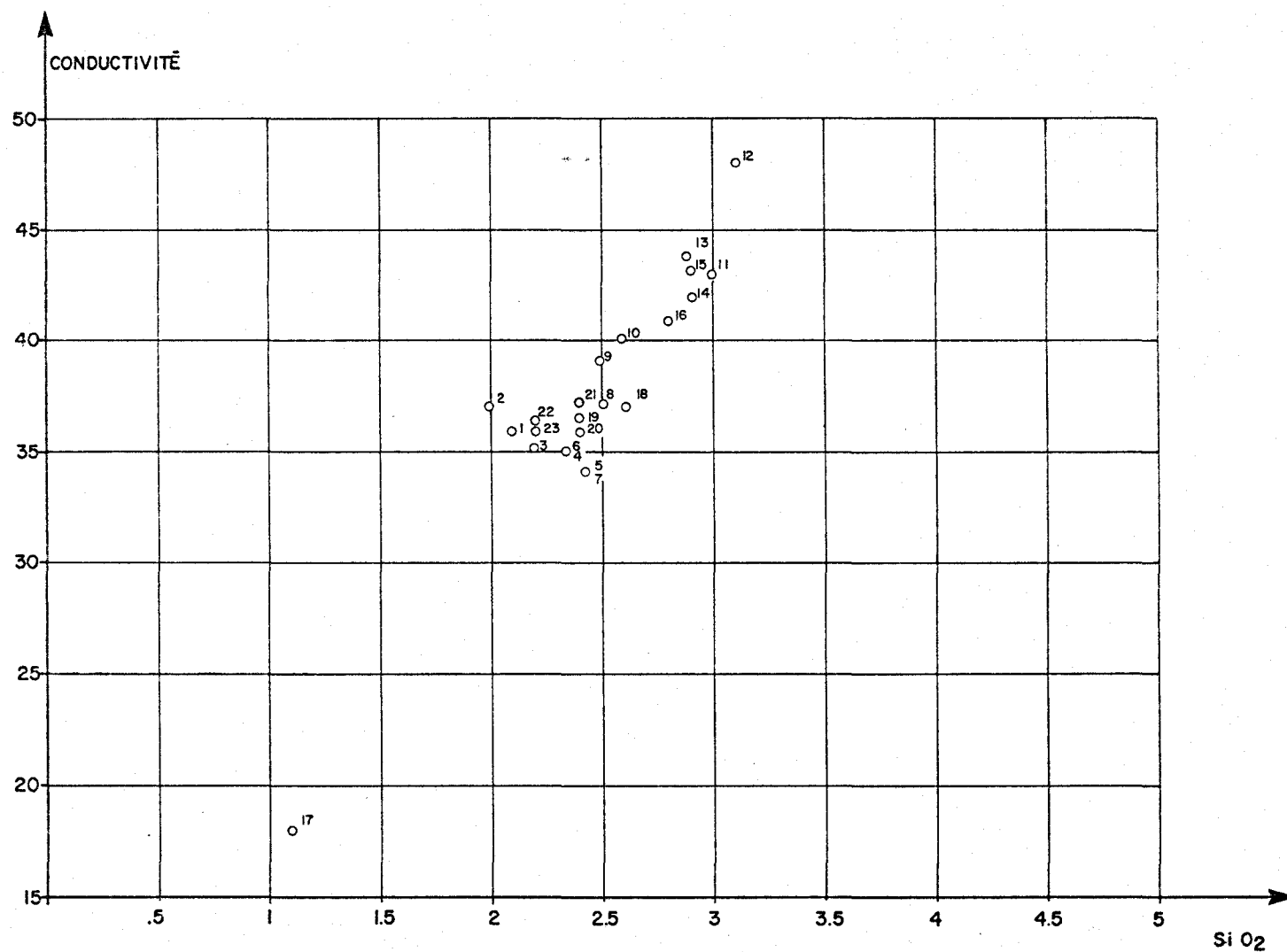


Fig. 4.2. Relation entre la conductivité et la silice - Station 5 (Lac B-160).

de SiO_2 et de la conductivité à une date i , on a :

$$a = 14.52$$

$$b = .89 \frac{2.54}{1.12} = 2.01$$

On en déduit la valeur prédite de la conductivité y_i à partir de la valeur mesurée de SiO_2 (X_i):

$$y_i = 7.53 + 2.01 X_i$$

Connaissant X_i , on peut en déduire à partir de la relation précédente y_i , valeur prédite de la conductivité. La Table 4.6 montre pour chacune des valeurs mesurées (X_i) la valeur prédite y_i , ainsi que la valeur y_i^* arrondie (puisque la conductivité est mesurée par valeurs entières). On a également calculé $\epsilon = 100(y_i^* - Y_i)/Y_i$ qui indique l'erreur relative commise dans la prédiction. Cette erreur est en général inférieure à 10%. Nous avons également déterminé en quelques points les limites des intervalles de confiance à 95% de la valeur moyenne théorique de la régression $\bar{y}_i$ et d'une valeur individuelle Y_i et nous avons ensuite tracé sur la Figure 4.1 ces intervalles de confiance. Pour ces calculs, nous avons utilisé les relations données en 4.2 avec:

$$N = 23 \quad \Sigma = 27.60 \quad s = 1.16 \quad \bar{X} = 3.47 \quad t = 2.080$$

Pour une valeur X_i donnée de concentration en SiO_2 , $X_i = 5$ par exemple, on peut, à partir de la Figure 4.1, en déduire que:

- la valeur moyenne correspondante de la conductivité pour $X_i = 5$ se trouvera avec une probabilité de 95% dans le domaine (16.72; 18.44);

$X_i(\text{SiO}_2)$	Conductivité prédite		Conductivité mesurée (Y_i)	Erreur (%) $\epsilon = \frac{y_i^* - Y_i}{Y_i}$
	y_i	y_i^* (arrondi)		
2.1	11.75	12	13	-8
2.0	11.55	12	13	-8
2.3	12.15	12	13	-8
2.7	12.96	13	14	-7
3.2	13.96	14	13	+7
3.3	14.16	14	14	0
3.2	13.96	14	12	+14
3.8	15.17	15	16	-6
3.9	15.37	15	14	+7
4.7	16.98	17	16	+6
4.9	17.38	17	17	0
4.9	17.38	17	18	-6
5.1	17.78	18	18	0
4.8	17.18	17	17	0
5.3	18.18	18	20	-10
5.0	17.58	18	19	-5
3.1	13.76	14	11	+27
2.9	13.36	13	12	+8
2.6	12.76	13	13	0
2.5	12.56	13	13	0
2.4	12.36	12	12	0
2.5	12.56	13	13	0
2.5	12.56	13	13	0

Table 4.6 Prédiction de la conductivité à partir de SiO_2 à la station de base 4 (Eastmain)

- une valeur individuelle de la conductivité pour $X_i = 5$ se trouvera avec une probabilité de 95% dans le domaine (15.01; 20.15).

Il est donc possible de construire les intervalles de confiance de la régression point par point, ces courbes peuvent ensuite être utilisées lors de la prédiction d'un paramètre en fonction d'un autre paramètre.

En pratique, lorsque le coefficient de corrélation est élevé, il est possible d'établir mathématiquement des relations régressives entre 2 paramètres, le pourcentage de la variance expliquée par la régression étant égale au carré du coefficient de corrélation (coefficient de détermination). Ces relations sont intéressantes si la dispersion des points expérimentaux autour de la droite de régression est faible. L'examen graphique des points expérimentaux est un préalable important à la détermination des coefficients de la régression si l'on veut éliminer les cas de corrélation fictive qui peuvent par exemple se produire lorsque les points sont regroupés en 2 nuages distincts.

Parmi les relations potentielles, on doit choisir celles qui ont un sens physique et pour lesquelles on peut donner une interprétation physico-chimique.

4.4 Relation entre stations pour un paramètre donné

4.4.a. Relations entre stations de base

Pour chaque paramètre (I) nous disposons à chaque station de base (J) de 23 valeurs, à l'exception de LG1 (station 1) pour laquelle nous avons seulement 21 valeurs. Ici encore lorsque une donnée est inférieure au seuil de détection, elle est remplacée par la moitié de la valeur correspondant au seuil de détection.

La Table 4.7 donne le coefficient de corrélation $r_{J,J'}$ qui existe entre 2 stations J et J' pour chaque paramètre I. Suivant le nombre de valeur des séries ($N = 21$ ou $N = 23$), on peut déterminer si le coefficient de corrélation est significativement différent de 0 aux niveaux de signification 5% et 1%. En reprenant les notations de 4.1, on a :

$$\text{si } N = 23 \quad \alpha = 5\% \quad |r_0| = .413$$

$$\alpha = 1\% \quad |r_0| = .526$$

$$\text{si } N = 21 \quad \alpha = 5\% \quad |r_0| = .433$$

$$\alpha = 1\% \quad |r_0| = .549$$

La Table 4.5 met en évidence le comportement particulier de la station 5 (lac B-160) ce qui n'est pas surprenant puisqu'il s'agit d'une station de lac. Pour l'ensemble des paramètres, cette station est en général faiblement corrélée aux quatre autres stations de base. Une étude de la S.E. B.J. (FOURNIER, 1976) traite de la qualité des eaux de 4 lacs du territoire, comprenant, en particulier, les données du lac B-160.

Paramètre I Station J, J'		SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND	pH	Fe
1	2	.98	.88	.47	.79	.56	.66	.94	.80	.46	.64	.31
	3	.97	.84	.66	.41	.34	.84	.81	.79	.17	.86	.67
	4	.94	.73	.36	.24	.57	.78	.83	.85	.29	.69	-.09
	5	.55	.29	.04	.00	.43	.60	.52	.68	.21	.35	-.35
2	3	.98	.82	.53	.65	.64	.60	.80	.83	.69	.70	.48
	4	.95	.84	.28	.28	.42	.56	.80	.84	.88	.87	.59
	5	.59	.42	.15	.07	.62	.45	.58	.72	.57	.31	.02
3	4	.92	.77	.38	.25	.31	.72	.73	.81	.66	.69	.02
	5	.54	.26	.20	.05	.41	.73	.61	.70	.39	.12	-.11
4	5	.70	.60	.60	.82	.67	.58	.49	.66	.75	.33	.18

Table 4.7: Corrélations entre stations de base

En ce qui concerne les quatre autres stations de base, il est possible de séparer les paramètres en 3 groupes:

- . SiO_2 , Ca, SO_4 , Cl, pH pour lesquels on a des coefficients de corrélation élevés (en général supérieurs à 0.7);
- . Mg, K, Fe pour lesquels les coefficients de corrélation prennent des valeurs assez faibles;
- . Na, HCO_3 , conductivité pour lesquels les coefficients de corrélation ont des valeurs intermédiaires.

Ces valeurs des coefficients de corrélation sont indicatives du comportement plus ou moins semblable des stations de base. Les résultats obtenus sur seulement une année ne permettent cependant pas d'éliminer la mesure de certains paramètres à plusieurs stations de base; il convient en effet d'examiner si les tendances observées se poursuivent ou non.

Si nous considérons par exemple SiO_2 sur la base des résultats obtenus, et si la forte corrélation entre les stations 1, 2, 3 et 4 se confirme, on peut être conduit à ne mesurer ce paramètre qu'à la station 2, par exemple, et ensuite à l'aide de relations de régression, il devient possible de prédire la valeur de SiO_2 aux autres stations.

A titre d'exemple, nous avons déterminé la relation linéaire qui existe, pour SiO_2 , entre les stations 1 et 2 (Figure 4.3). Chaque point est représenté par le numéro de la date de prélèvement, dans le cas des points 2 et 10 (17/8 et 29/01) pour lesquels les données à LGI sont absentes, nous avons considéré la moyenne arithmétique des 2 dates voisines. On note particulièrement bien, sur la Figure 4.3, l'opposition entre d'une part, les mois de juillet e

d'août correspondant aux fortes valeurs de débit et aux faibles concentrations en SiO_2 et, d'autre part, les mois de mars et avril correspondant à l'étiage d'hiver.

En procédant suivant la méthode décrite en 4.2, on peut déterminer l'équation de la régression linéaire entre les stations LG1 et LG2, on a :

$$\begin{array}{lll} \text{(LG1)} & \bar{Y} = 2,89 & \sigma_y = 0,64 \\ \text{(LG2)} & \bar{X} = 2,78 & \sigma_x = 0,64 \end{array}$$

Le coefficient de corrélation est $r = .98$, ce qui correspond à une variance expliquée par la régression de 96%. La droite de régression est donnée par :

$$y_i = 0,16 + 0,98 X_i$$

ou y_i est la concentration en SiO_2 prédite à LG1 à partir de la valeur X_i mesurée à LG2 à la date i . Les points relatifs aux dates 2 et 10, qui sont indiqués sur la Figure 4.3, n'ont pas été utilisés pour déterminer l'équation de régression.

La Table 4.8 montre l'erreur commise dans la prédiction pour chaque date; dans tous les cas, l'erreur relative est inférieure à 10%.

Là encore sur la Figure 4.3, nous avons tracé les limites de l'intervalle de confiance à 95% de :

- la valeur théorique moyenne η_i estimée par y_i ;
- d'une valeur individuelle Y_i .

Il est possible pour chaque paire de stations pour laquelle le coefficient de corrélation est assez élevé d'établir de telles régressions

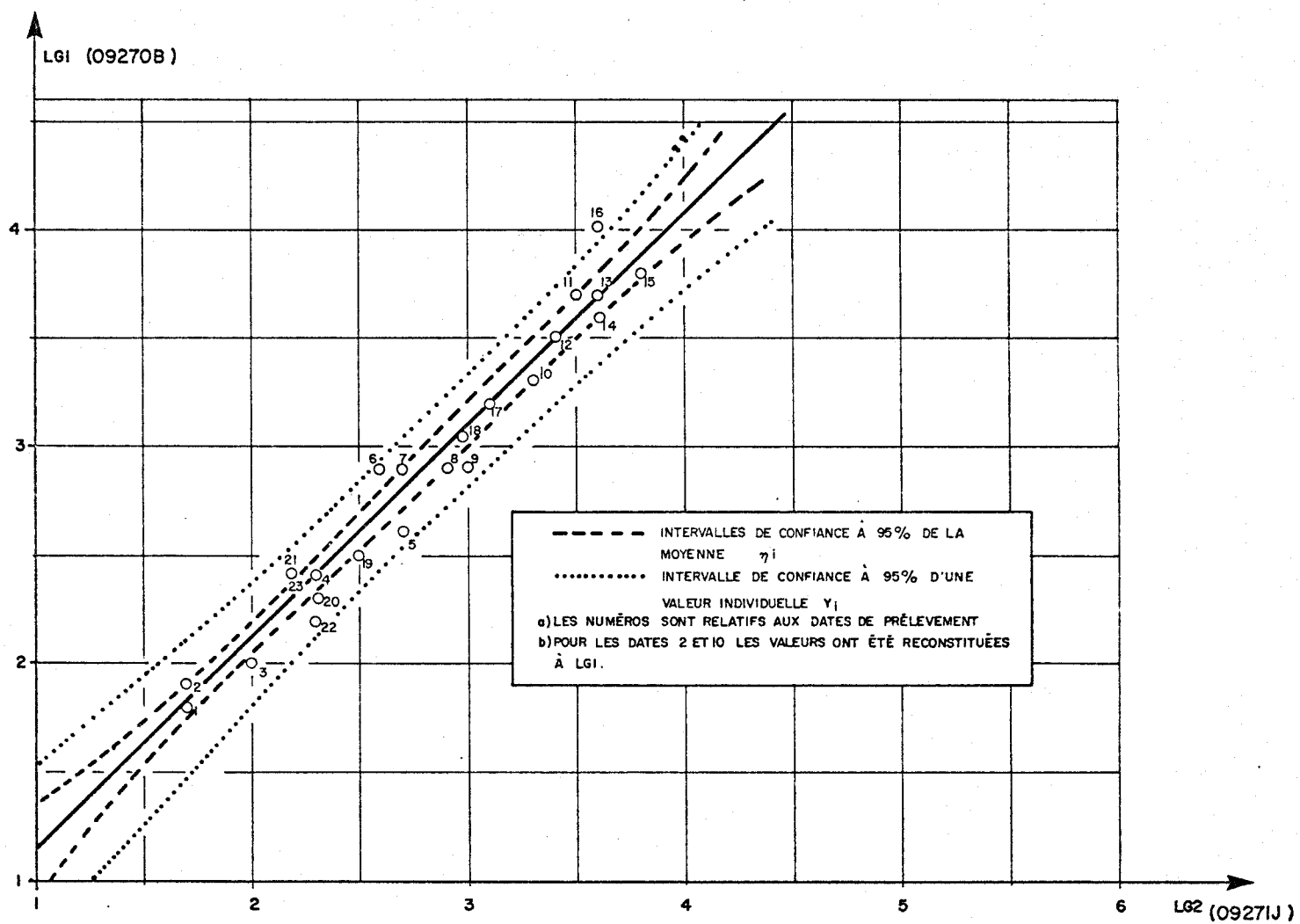


Fig . 4.3 .Relation entre les stations de base LGI et LG2 pour SiO_2 .

Date i	x_i (LG2)	(LG2)		$\varepsilon = \frac{y_i - Y_i}{Y_i} (\%)$
		y_i (prédit)	Y_i (mesuré)	
1	1.7	1.8	1.8	0
2	1.7	1.8	1.9*	-5
3	2.0	2.1	2.0	+5
4	2.3	2.4	2.4	0
5	2.7	2.8	2.6	+8
6	2.6	2.7	2.9	-7
7	2.7	2.8	2.9	-3
8	2.9	3.0	2.9	+3
9	3.0	3.1	2.9	+7
10	3.3	3.4	3.3*	+3
11	3.5	3.6	3.7	-3
12	3.4	3.5	3.5	0
13	3.6	3.7	3.7	0
14	3.6	3.7	3.6	+3
15	3.8	3.9	3.8	+3
16	3.6	3.7	4.0	-8
17	3.1	3.2	3.2	0
18	3.0	3.1	3.0	+3
19	2.5	2.6	2.5	+4
20	2.3	2.4	2.3	+4
21	2.2	2.3	2.4	-4
22	2.3	2.4	2.2	+9
23	2.2	2.3	2.4	-4

Table 4,8: Prédiction de la concentration en SiO_2
à LG1 à partir des valeurs mesurées à LG2

* valeurs interpolées

linéaires permettant la prédiction à une station donnée en fonction de la valeur mesurée à une autre station.

Avant d'établir et d'utiliser systématiquement de telles relations, il importe cependant d'en confirmer la validité à partir des données obtenues après plusieurs années de prélèvements.

Par ailleurs, la seule valeur du coefficient de corrélation, si elle est un indice de la possibilité d'une relation linéaire, n'est cependant pas suffisante. En effet, dans certains cas, de fortes valeurs du coefficient de corrélation peuvent être obtenues si, par exemple, les points sont séparés en deux nuages bien distincts. Si l'on considère la Figure 4.4 sur laquelle on a tracé les concentrations en Na à la station de base 4 (Eastmain) en fonction de ce même paramètre au lac B-160 (Station 5), le coefficient de corrélation $r = 0.82$ est assez bon, mais l'on observe cependant une dispersion assez grande autour de la droite de régression en raison de la position particulière du point correspondant à la date 19 (18/6/75), qui est très éloigné du nuage formé par les autres points. Cet exemple montre bien la nécessité de toujours tracer préalablement les points observés.

En conclusion, on peut dire que l'étude des corrélations entre stations de base pour les différents paramètres met en évidence l'existence possible de certaines relations. La validité de ces relations devrait, cependant, être confirmée à partir des données obtenues sur une année supplémentaire de prélèvements. Il deviendra alors possible de recommander, par exemple, qu'une ou plusieurs stations de base deviennent des stations satellites, et que la mesure de certains paramètres soit éventuellement abandonnée. La procédure conduisant à ces recommandations

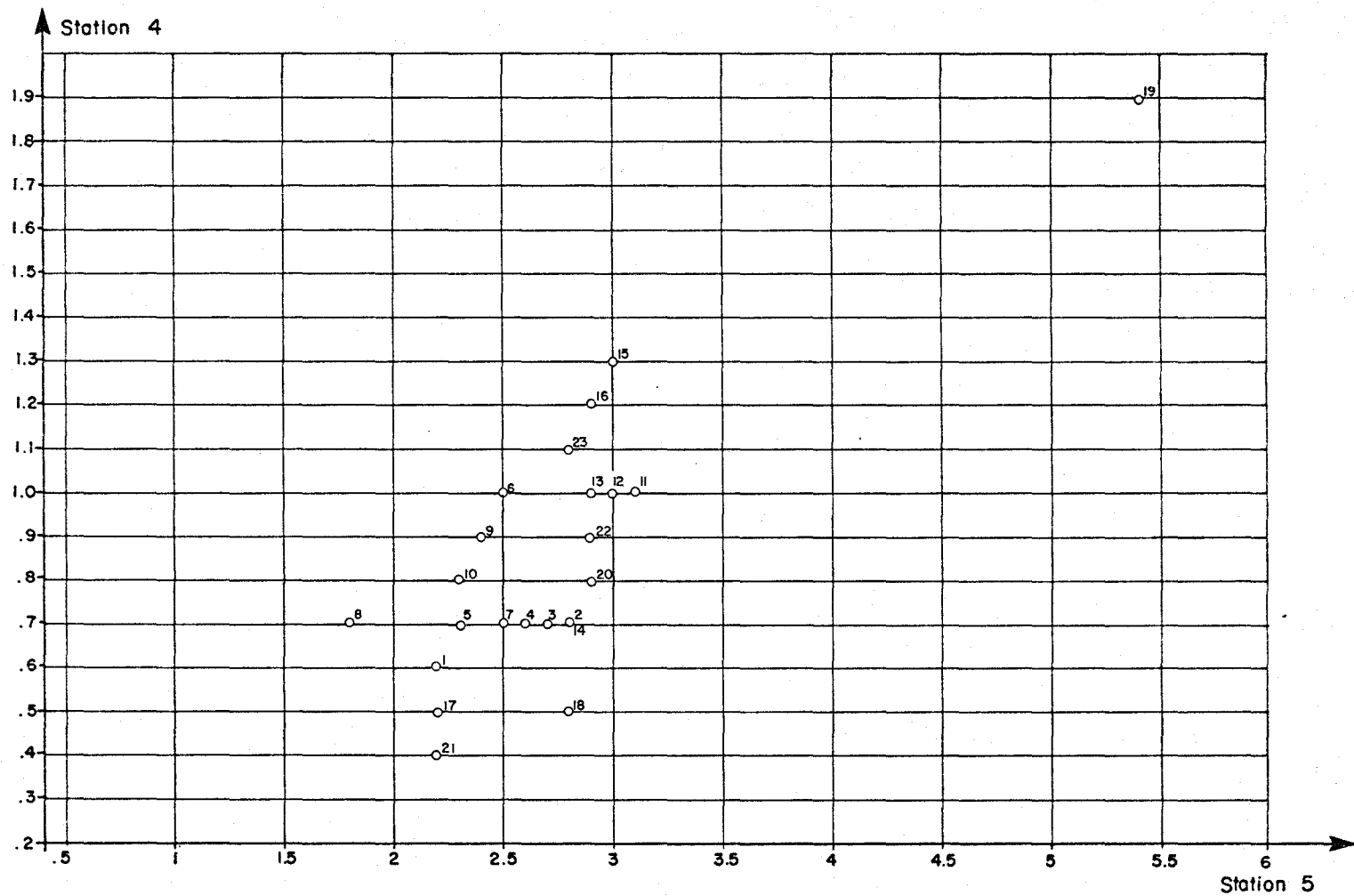


Fig . 4.4 . Relation entre les stations de base 4 (09060H) et 5 (09271K) pour Na .

comprendrait les étapes suivantes:

- . fixer un seuil de corrélation r_1 ;
- . pour l'ensemble des paires de stations de base pour lesquelles le coefficient de corrélation est supérieur à r_1 (cf. Table 4.7) effectuer une étude graphique qui consiste à tracer les valeurs d'un paramètre à une station en fonction des valeurs du même paramètre à l'autre station. Cette étude systématique a pour but d'éliminer les cas de corrélations fictives;
- . pour l'ensemble des paires de paramètres pour lesquelles le coefficient de corrélation à une station de base est supérieur à un seuil r_2 (pouvant ou non être égal à r_1) (cf. Tables 4.1 à 4.5), effectuer une étude graphique;
- . pour tous les cas retenus, établir l'équation de la droite de régression et déterminer les intervalles de confiance à un niveau donné;
- . éliminer les stations de bases ou les paramètres pour lesquels on peut utiliser une équation de prédiction.

Le choix des valeurs r_1 et r_2 dépend évidemment de la précision que l'on veut obtenir dans l'estimation. Comme nous l'avons dit précédemment, il serait prématuré d'appliquer cette procédure sur seulement un an de données. A titre indicatif, nous avons cependant appliqué cette procédure sans effectuer l'examen graphique pour montrer comment nous pouvons en arriver à certaines conclusions.

Si nous prenons $r_1 = r_2 = 0.80$ (ce qui correspond à une variance expliquée de 64%) et que nous retenions (à partir des Tables 4.1 à 4.5 et 4.7) les paires de stations de base ou les paires de paramètres pour lesquelles le coefficient de corrélation est supérieur à ce seuil, on peut tracer sur la Figure 4.5 les interrelations potentielles. L'examen de cette figure montre entre autre que:

- pour SiO_2 , Ca, SO_4 et Cl, la connaissance des valeurs de ces paramètres à la station 2 (LG2) peut permettre de prédire les valeurs de ces mêmes paramètres aux stations de base 1, 3 et 4. Ceci met en évidence une certaine similitude de comportement entre les 3 stations de base situées sur la rivière La Grande respectivement à LG1, LG2 et LG3. Nous reviendrons sur cette constatation lors de la comparaison globale effectuée au chapitre 5.
- La conductivité aux stations 2, 4 et 5 pourraient être déduite de la connaissance de SiO_2 à ces mêmes stations; ou ce qui d'un point de vue pratique serait plus intéressant, la Silice pourrait être déduite de la Conductivité.
- La station 5 située sur le lac B-160 a un comportement particulier et ne peut être reliée pour aucun paramètre aux autres stations de base. Elle s'oppose aux autres stations situées sur des rivières.

Cette étude indicative, si elle montre des tendances intéressantes surtout en ce qui concerne les liens entre stations pour un paramètre donné, devrait être poursuivie et étendue aux stations de base, lorsque nous disposerons pour ces dernières de séries de données plus longues.

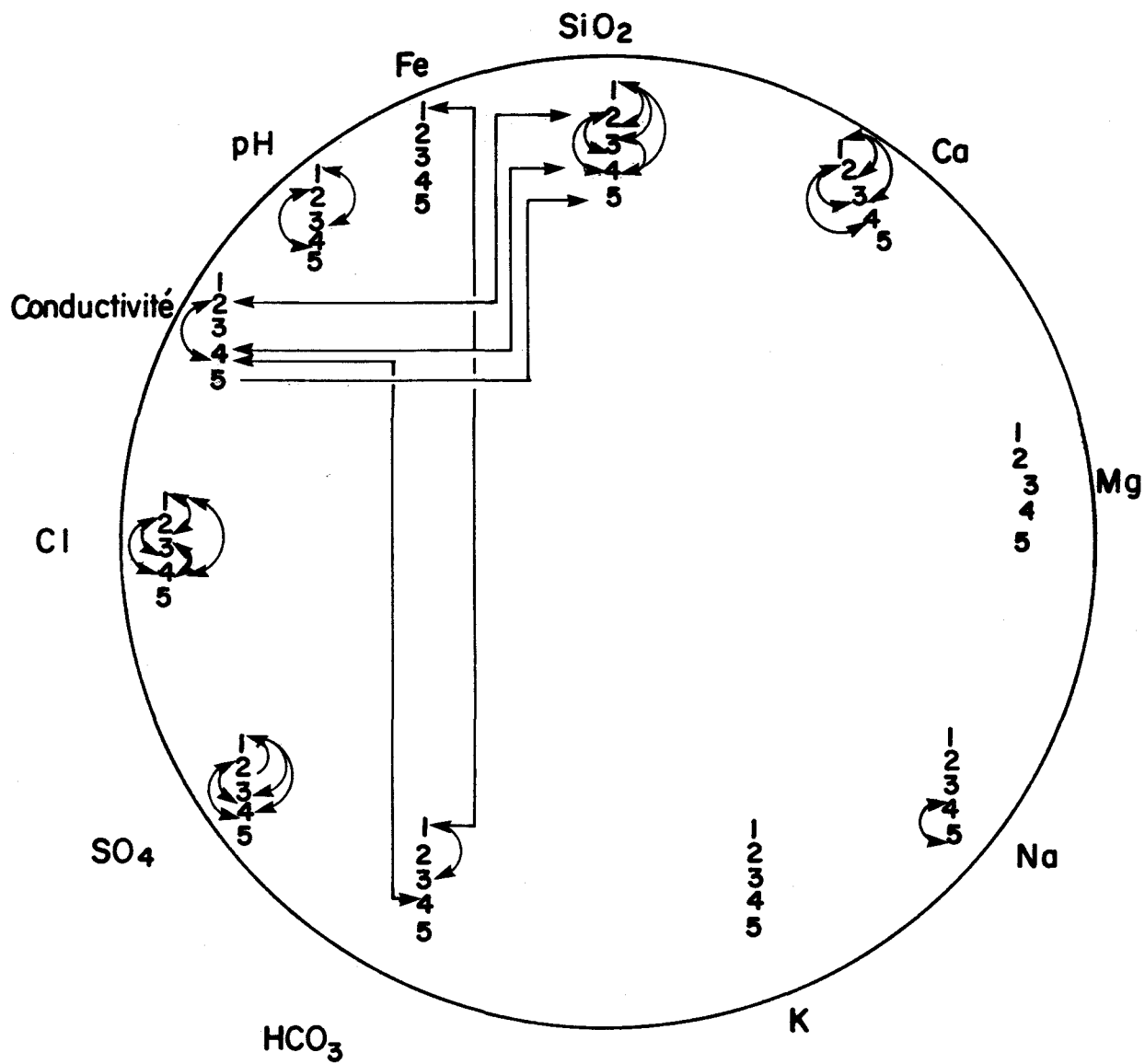


Fig . 4.5 . Graphique des interrelations potentielles .

4.4.b. Relations entre stations de base et stations satellites:

Les stations de base ont pour but de montrer l'évolution temporelle des concentrations des différents paramètres, alors que les stations satellites plus nombreuses mais échantillonnées moins fréquemment doivent permettre d'évaluer la variabilité spatiale.

Nous avons montré en 3.2c que l'on pouvait supposer que les moyennes et écart-types calculés à partir des séries de 5 valeurs (à chaque station satellite pour chaque paramètre) sont représentatives des moyennes et écarts-types annuels, ce qui revient à dire que les courtes séries aux stations satellites sont représentatives du comportement annuel.

Pour un paramètre donné, il est théoriquement possible de calculer les coefficients de corrélation entre une station de base et une station satellite et de déterminer éventuellement la régression linéaire qui existe entre ces 2 stations. En pratique cependant, nous disposons actuellement à chaque station satellite de 5 valeurs au maximum; ce qui est insuffisant pour déterminer des régressions valables.

Ceci nous incite à recommander l'opération des mêmes stations satellites pendant au moins une nouvelle année, les prélèvements étant bien répartis tout au long de l'année. Les séries dont nous disposerons alors, sans être de très grande taille, devraient être suffisantes pour établir des régressions ayant un sens physique entre station satellite et station de base.

La procédure à suivre pour étendre à une station satellite J les données relatives à un paramètre I pourrait être la suivante:

- rechercher la station de base J' la mieux corrélée avec J;
- effectuer un tracé graphique des données aux dates communes de mesure;
- déterminer la droite de régression linéaire entre le paramètre à la station J et le même paramètre à J';
- tracer les intervalles de confiance de la régression.

A titre indicatif, car un tel calcul ne peut être considéré comme final et utilisable en raison du petit nombre de données aux stations satellites, examinons le cas de la conductivité à la station satellite 09060A (12) pour laquelle on dispose de 5 valeurs.

- . Parmi les stations de base, c'est la station 09060H (4) qui présente le plus fort coefficient de corrélation avec la station satellite 09060A ($r = 0,982$).
- . En utilisant les résultats de 4.1 , on peut montrer que ce coefficient de corrélation est très significativement différent de 0.
- . En utilisant les notations de 4.2 , on a:

pour la station de base (4)	$\bar{X} = 14.4$	$\sigma_X = 1.95$
pour la station satellite (12)	$\bar{Y} = 16.2$	$\sigma_Y = 2.17$

L'équation de régression est;

$$y_i = 0.464 + 1.093 x_i$$

Sur la Figure 4.6, nous avons également tracé les intervalles de confiance à 95% de la moyenne théorique η_j et de la valeur individuelle Y_j correspondant à X_j .

Si on mesure à la station de base (4) une conductivité $X_j = 15$:

- la moyenne de la distribution que l'on peut observer à la station satellite (12) se trouve dans l'intervalle (16.15; 17.57) avec une probabilité de 95%;
- la valeur Y_j correspondante se trouve dans l'intervalle (15.19; 18.53) avec une probabilité de 95%. Dans le cas étudié, on trouve des intervalles de confiance assez larges en raison du petit nombre (5) des séries observées à partir desquelles la régression a été établie.

Rappelons que nous avons simplement voulu montrer ici comment il est possible d'étendre la courte série des données à une station satellite à partir de la longue série des données obtenues à une station de base.

En pratique pour que cette méthode puisse être utilisée systématiquement avec profit, il est nécessaire que la taille de la série observée à la station satellite soit suffisamment grande; une taille $N \geq 10$ permettrait, lorsque l'on est en présence de coefficients de corrélation assez élevés, d'utiliser cette méthode. Ceci nous conduit à recommander la poursuite des campagnes d'échantillonnage aux stations satellites afin de rechercher des équations de prédiction satisfaisantes.

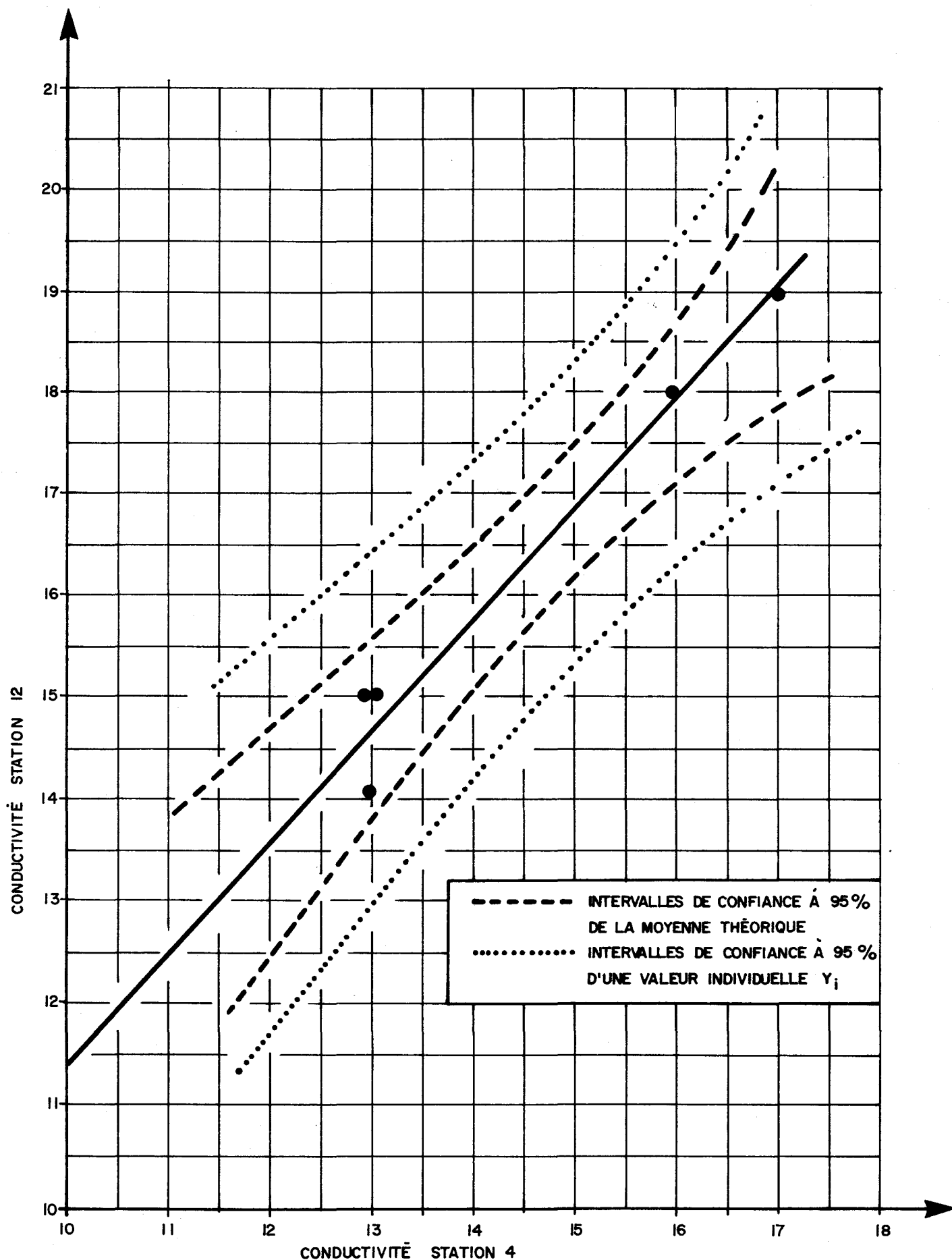


Fig. 4.6 .Relation entre la conductivité à la station satellite 12 (09060A) et à la station de base 4 (09060H)

5. TRAITEMENT GLOBAL PAR L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES (A.F.C.)

5.1 Description de la méthode

Les grandes lignes de l'analyse factorielle des correspondances, développée récemment (BENZECRI et al., 1973), et qui est une variante de l'analyse en composantes principales, sont décrites ci-dessous.

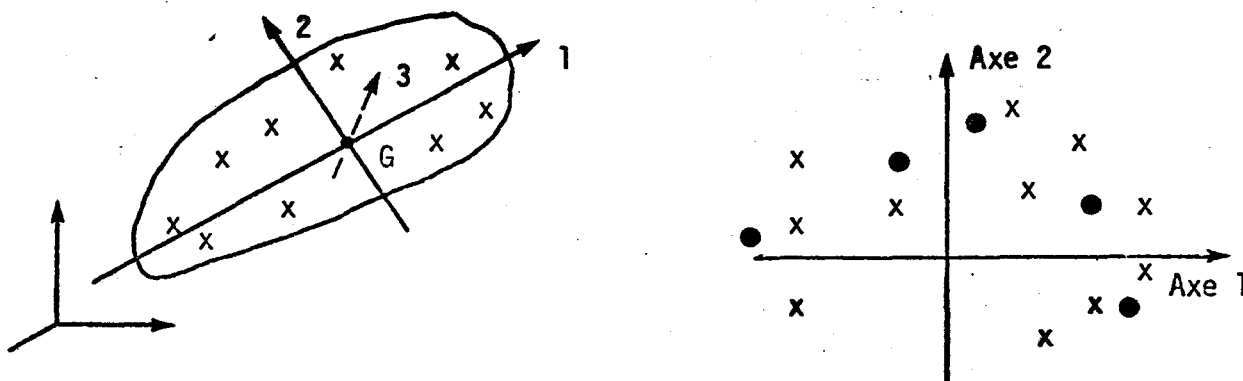
Considérons un tableau de N lignes et p colonnes composé de nombres positifs (représentant, par exemple, les valeurs de p paramètres, en N stations, à une date donnée), que l'on transforme en divisant chaque élément par la somme des éléments du tableau. Si l'on note respectivement $x_{.j}$ et $x_{i.}$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

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

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

La méthode permet de déterminer les axes principaux du nuage des p points P_j et du nuage des N points M_i et de projeter ensuite les points de chaque nuage dans le plan d'axes principaux pris 2 à 2. En pratique, on utilise, pour chaque nuage, surtout le plan des 2 premiers axes qui sont ceux qui l'ajustent le mieux. La projection d'un point (coordonnée)

sur un axe i est le facteur i relatif à ce point (voir schéma ci-dessous).



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

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

axes, de donner une signification physique à ces derniers.

La méthode d'AFC présente en outre plusieurs avantages:

- il est possible de considérer, dans l'analyse, des points supplémentaires (représentatifs de paramètres ou de stations). Ces points n'ayant aucun poids dans l'analyse, ils ne conditionnent pas la détermination des axes principaux, mais peuvent cependant être représentés graphiquement;
- elle peut également s'appliquer à des données classées qualitativement, ou à des données que l'on peut coder lorsque l'on considère, par exemple, un ensemble de paramètres qui sont de nature différente ou qui ont des gammes de variation très différentes (pH, coliformes, solides en suspension,...).

L'AFC est une méthode objective particulièrement apte à déceler et à mettre en évidence les principales caractéristiques de grands tableaux de données. Cette méthode est de plus très générale puisqu'elle peut être appliquée à tout tableau de nombres positifs. Il faut cependant souligner que la validité des conclusions que l'on peut tirer de son utilisation est fortement conditionnée par la représentativité des données considérées et donc par la qualité de l'échantillonnage du phénomène étudié.

5.2 Application de la méthode

Nous considérons la matrice formée des moyennes des 11 paramètres déjà considérés dans les chapitres précédents, aux 21 stations du réseau. Ces moyennes sont calculées pour les 5 valeurs correspondant aux dates

des campagnes de mesure. Nous avons de plus considéré comme observations supplémentaires les moyennes aux 5 stations de base calculées sur l'ensemble des 23 valeurs. Ces observations ne jouent aucun rôle dans la détermination des axes principaux puisqu'elles ont un poids nul, mais leurs points représentatifs peuvent être tracés dans le plan des axes principaux pris 2 à 2. En pratique, lorsqu'une des données est absente, on la remplace par la moyenne des 2 données adjacentes, ce qui ne modifie pas la valeur moyenne de la série. Lorsque des valeurs sont inférieures au seuil de détection, on les remplace par la moitié du seuil de détection. La matrice que nous considérons comprend donc:

- . 11 colonnes correspondant à chaque "variable" (paramètre);
- . 24 lignes correspondant aux points "station" représentatifs:
 - des moyennes aux 16 stations satellites (points de 6 à 21),
 - des moyennes calculées sur 5 valeurs aux 4 stations de base, la station 5, lac B-160, ayant été éliminée (points de 1 à 4),
 - des moyennes calculées sur 23 valeurs aux 4 stations de base, la station 5 étant également exclue (points 1A à 4A).

Dans un premier essai, nous avons utilisé la station de base 5 (lac B-160) et l'analyse avait fait ressortir le comportement particulier de cette station, comportement déjà mis en évidence précédemment. De manière à permettre une meilleure visualisation graphique, nous avons supprimé cette station dans l'analyse actuelle.

5.3 Résultats

La Figure 5.1 donne la projection des points "station" et des points "variable" dans le plan des 2 premiers axes principaux qui expliquent plus de 70% de la variabilité totale.

5.3.a. Représentation des points "station"

Dans le plan des axes 1 et 2, chaque point "station" représente la projection dans ce plan du point ayant pour coordonnées, les moyennes de 11 paramètres à la station considérée.

Si nous examinons tout d'abord les stations de base, la proximité entre les points 1 et 1A, pour la station 1 par exemple, montre que la moyenne calculée pour chaque paramètre à partir des 5 valeurs correspondant aux campagnes de mesure est représentative de la moyenne annuelle calculée pour chaque paramètre sur l'ensemble des 23 valeurs dont nous disposons généralement à chaque station de base. Ce résultat est également vrai pour les autres stations de base et confirme que l'on peut, dans le cas des stations satellites, considérer les moyennes des paramètres calculées sur 5 valeurs comme représentatives des moyennes annuelles (3.2.c).

Nous avons regroupé dans le plan des axes 1 et 2 (Figure 5.1) les stations voisines ou se trouvant sur la même rivière. Cette zonation sur laquelle nous reviendrons plus loin, met en évidence divers comportements :

- L'axe 1 montre l'opposition du système Opinaca-Eastmain et de la de Pontois pour lesquels les points 15, 4, 12 et 9 ont une forte valeur positive (du facteur (projection sur l'axe 1)) et des rivières Kanaapscow, de la Forge pour lesquelles les stations 7, 6, 16, 17, 11 et 9 ont des valeurs fortement négatives du facteur, ce qui semble donc opposer les stations qui sont au sud de la Grande et celles qui sont au nord; les stations 13 et 14 de part et d'autre du lac Sakami font exception à cette classification.

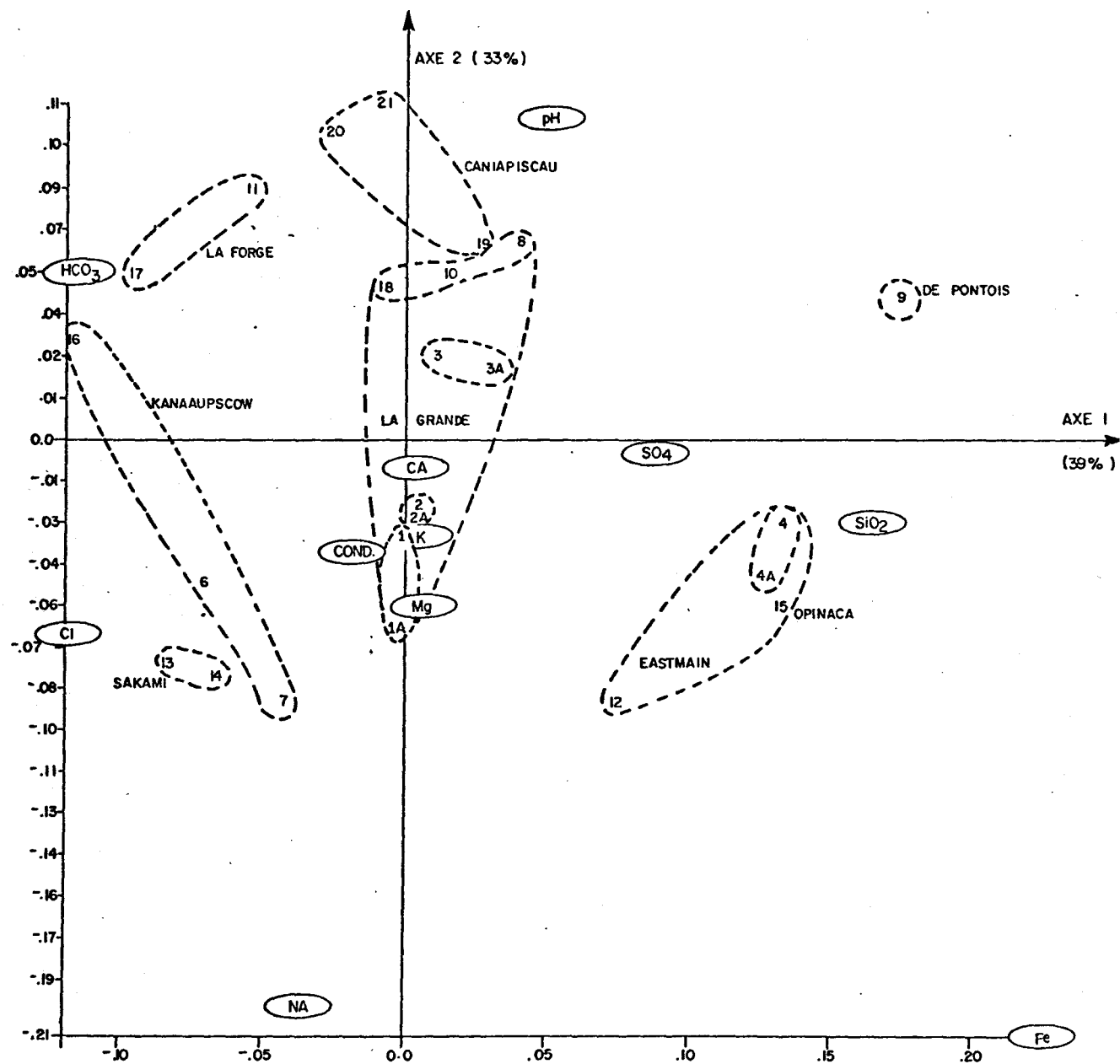


Fig. 5.1 .Représentation simultanée des points "station" et des points "paramètre" dans le plan factoriel 1-2 .

Il est également possible de donner une interprétation à l'axe 2 qui montre l'opposition entre les stations situées à l'est du territoire pour lesquelles la valeur du 2^{ième} facteur est fortement positive (stations 19, 20 et 21 de la rivière Caniapiscaw par exemple) et les stations situées près de la Baie de James (1, 2, 12 et 7) pour lesquelles le 2^{ième} facteur est négatif. L'axe 2 indique donc une évolution générale Est-Ouest. Ceci est d'ailleurs particulièrement net si l'on considère la rivière La Grande pour laquelle la valeur du second facteur croît algébriquement lorsque l'on s'éloigne de la Baie de James en se déplaçant vers l'Est. Cette même observation s'applique également à la Kanaaupscow, à la Forge et au système Opinaca-Eastmain.

3. système Opinaca-Eastmain

Il est donc possible de mettre en évidence d'une manière très générale une variabilité Nord-Sud représentée par l'axe 1 et une variabilité Est-Ouest représentée par l'axe 2.

La proximité des points "station" indique un comportement général voisin; ainsi en ce qui concerne d'une part, les stations de base 1 et 2 situées respectivement à LG1 et LG2, et d'autre part, par les stations satellites 13 et 14 situées de part et d'autre du Lac Sakami, la similitude de comportement pour l'ensemble des 11 paramètres considérés est nette. Il est d'autre part à noter que les stations de base 1, 2 et 3 sont voisines du centre de gravité du nuage, situé à l'intersection des axes, ce qui indique que ces stations sont représentatives d'une tendance moyenne parmi les stations considérées.

Paramètre Station	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	COND.	pH	Fe
01	2.76	1.46	0.30	1.06	0.42	5.60	2.08	0.66	16.70	6.44	0.16
02	2.78	1.40	0.30	0.96	0.46	5.40	1.94	0.70	16.20	6.28	0.14
03	2.60	1.24	0.24	0.76	0.32	5.20	1.70	0.46	14.40	6.28	0.08
04	3.50	1.48	0.26	0.74	0.36	4.20	1.92	0.51	14.40	6.14	0.22
06	2.96	1.72	0.28	1.14	0.38	7.00	1.72	0.76	19.00	6.36	0.14
07	3.25	1.70	0.40	1.32	0.42	6.75	2.20	0.92	20.25	6.30	0.16
08	2.54	1.20	0.20	0.64	0.30	5.00	1.80	0.48	12.60	6.24	0.13
09	3.22	1.18	0.18	0.66	0.32	3.80	1.80	0.31	11.00	6.00	0.13
10	2.36	1.38	0.22	0.66	0.32	5.00	1.58	0.41	13.20	6.24	0.11
11	1.80	1.20	0.24	0.66	0.32	5.30	1.52	0.64	12.20	6.18	0.11
12	3.14	1.50	0.34	1.22	0.40	4.60	2.42	0.80	16.20	6.12	0.24
13	2.48	1.24	0.44	1.50	0.50	6.50	2.10	1.18	17.40	6.22	0.17
14	2.56	1.62	0.40	1.38	0.50	6.20	2.24	1.20	19.00	6.47	0.11
15	2.68	1.16	0.28	0.80	0.34	3.00	1.90	0.52	13.80	5.68	0.15
16	2.34	1.74	0.20	0.82	0.42	7.80	1.84	0.44	17.40	6.36	0.08
17	2.14	1.50	0.22	0.68	0.34	6.40	1.60	0.88	14.20	6.30	0.10
18	2.26	1.06	0.20	0.58	0.38	4.80	1.54	0.72	13.20	6.14	0.07
19	1.78	0.84	0.28	0.56	0.26	3.75	1.66	0.66	11.60	5.92	0.05
20	1.88	0.96	0.28	0.52	0.24	4.80	1.54	0.64	11.40	6.06	0.05
21	1.54	0.90	0.30	0.49	0.30	4.25	1.58	0.62	11.20	6.25	0.04
1A	2.87	1.40	0.32	1.09	0.41	5.41	2.01	0.89	17.54	6.36	0.18
2A	2.78	1.30	0.30	0.97	0.40	5.35	1.78	0.78	15.74	6.29	0.18
3A	2.71	1.17	0.24	0.76	0.33	4.87	1.70	0.58	13.78	6.22	0.09
4A	3.47	1.39	0.24	0.86	0.37	4.17	2.14	0.69	14.52	6.10	0.23

Table 5.1: Valeurs moyennes des paramètres aux stations:

(1,---,21) moyenne sur les 5 valeurs correspondant aux campagnes de mesure;

(1A,---,4A) moyenne sur les 23 valeurs aux stations de base.

5.3.b Représentation des points "paramètre" et représentation simultanée

Le point représentatif d'un paramètre qui a pour coordonnées l'ensemble des moyennes prises par ce paramètre à chaque station peut également être représenté dans le plan des axes 1 et 2. Cette représentation indique les oppositions et les proximités des paramètres pour l'ensemble du territoire. En 4.3, nous avons recherché et trouvé certaines interrelations potentielles entre les différents paramètres aux 5 stations de base; cependant, en ce qui concerne l'ensemble du territoire, il ne semble y avoir aucune relation nette entre les paramètres pris 2 à 2 à l'exception, peut-être, de la Conductivité et du Calcium. Cette contradiction apparente est sans doute due au fait qu'il est possible régionalement de trouver certaines corrélations, mais que ces résultats ne peuvent être étendus à l'ensemble du territoire. Des études plus approfondies à ce sujet pourraient être entreprises lorsque l'on disposera, aux stations satellite, de plusieurs années de mesure; le nombre réduit de données (5 au maximum) pour l'année 1974-75 ne permet pas actuellement de mettre en évidence des interrelations entre paramètres valables régionalement.

La représentation simultanée des points "station" et des points "paramètre" permet de caractériser les groupes de stations déterminés précédemment. Les anomalies détectées en 3.1.b sur les données individuelles à partir de l'étude du déséquilibre ionique ont peu d'influence dans cette étude; en effet, nous considérons à chaque station la valeur moyenne d'un paramètre et non les valeurs individuelles au cours de l'année et nous admettons (cf. 3.2.c) que les moyennes à chaque station satellite sont représentatives de la moyenne annuelle.

Pour caractériser un groupe de points, on examine les paramètres voisins de ce groupe qui "attirent" les stations parce qu'ils prennent des valeurs moyennes relativement élevées à ces stations et les paramètres éloignés de ce groupe qui "repoussent" les points "station" parce qu'ils ont des valeurs moyennes faibles à ces stations. Il est important de noter que, lorsque nous disons qu'un paramètre prend une valeur élevée à une station, ceci doit se comprendre de manière relative et signifie une valeur plus élevée qu'à une autre station ou encore la valeur la plus élevée du territoire considéré. En effet, les valeurs observées dans le territoire de la Baie de James sont en général très faibles par rapport à celles que l'on pourrait mesurer dans d'autres régions du Québec.

A partir des valeurs moyennes des paramètres aux différentes stations (Table 5.1), nous pouvons examiner le comportement des différentes rivières:

- le système Opinaca-Eastmain (stations 4, 12 et 15) est caractérisé par de fortes valeurs de Silice et surtout de Fer et de faibles valeurs de Bicarbonates;
- la rivière Sakami (stations 13 et 14) est caractérisée par des valeurs moyennes relativement élevées de Magnésium, Sodium, Bicarbonates, Chlorures, Potassium et Conductivité;
- la station 9 située sur la Pontois a une moyenne élevée en Silice et faible en Magnésium, Conductivité et surtout en Chlorure pour lequel on observe la moyenne la plus faible du territoire;

- les stations 11 et 17 situées sur la rivière La Forge sont caractérisées par des moyennes peu élevées en Silice, Sulfates et Conductivité et par une moyenne assez élevée en Bicarbonates;
- les stations 19, 20 et 21 situées à l'est du territoire sur la Caniapiscau ne présentent de moyennes élevées pour aucun paramètre et sont caractérisées par de faibles valeurs moyennes de plusieurs paramètres: Bicarbonates, Conductivité, Fer et, surtout, Silice, Calcium, Sodium et Potassium;
- en ce qui concerne la rivière La Grande pour laquelle l'évolution générale Est-Ouest des moyennes des différents paramètres a déjà été décrite en 3.2.c (Table 3.8), on peut opposer de manière générale les stations de base 1 et 2 aux stations 8, 10 et 18. Pour le premier groupe, les moyennes des différents paramètres sont plus élevées que celles du second groupe. Les moyennes à la station de base 3 sont intermédiaires entre celles des 2 groupes précédents, ce qui se traduit par sa position sur la Figure 5.1. Pour l'ensemble de ces stations, on ne note pas cependant de valeurs extrêmes, fortes ou faibles. Dans le cas des stations de base 1 et 2, les paramètres ont des valeurs moyennes médianes dans la gamme observée, ce qui explique la position de ces stations près du centre de gravité du nuage de points (Figure 5.1). Les stations 8, 10 et 18 sont caractérisées par des moyennes assez faibles en Magnésium, Sodium, Potassium et Sulfates, et sont donc repoussées vers les valeurs positives de l'axe 2. Il en est de même pour la station 3 à un degré moindre, puisque cette station occupe une position intermédiaire entre d'une part le groupe 1, 2 et d'autre part, le groupe 8, 10 et 18.

6- ETUDE DES SUBSTANCES NUTRITIVES

6.1 Introduction

Les substances nutritives représentent une classe particulière de corps chimiques; en effet, ils représentent des composés indispensables à la croissance animale et végétale. Des concentrations excessives peuvent conduire à des croissances excessives d'algues, donc à des problèmes d'eutrophisation; en très faibles concentrations, ils limitent la productivité biologique des eaux des lacs et des rivières.

Les substances nutritives suivantes ont été mesurées: Carbone organique, Carbone inorganique, Phosphore total et Azote Kjeldahl. Les raisons suivantes ont motivé ce choix: les paramètres doivent être de bons indices de l'activité biologique, se trouver en quantités détectables dans les eaux analysées, être suffisamment stables pour être conservés sous leur forme d'origine entre l'échantillonnage et l'analyse (une semaine).

6.2 Analyse descriptive des paramètres

Les données des quatre paramètres concernant les substances nutritives sont rassemblées à l'Annexe 1. Pour les stations de base, les évolutions des paramètres sont représentées aux Figures 6.1 à 6.4.

• Carbone Organique (C-org.)

Le Carbone organique total provient essentiellement de la décomposition de la matière organique. Cette matière peut avoir une origine animale ou

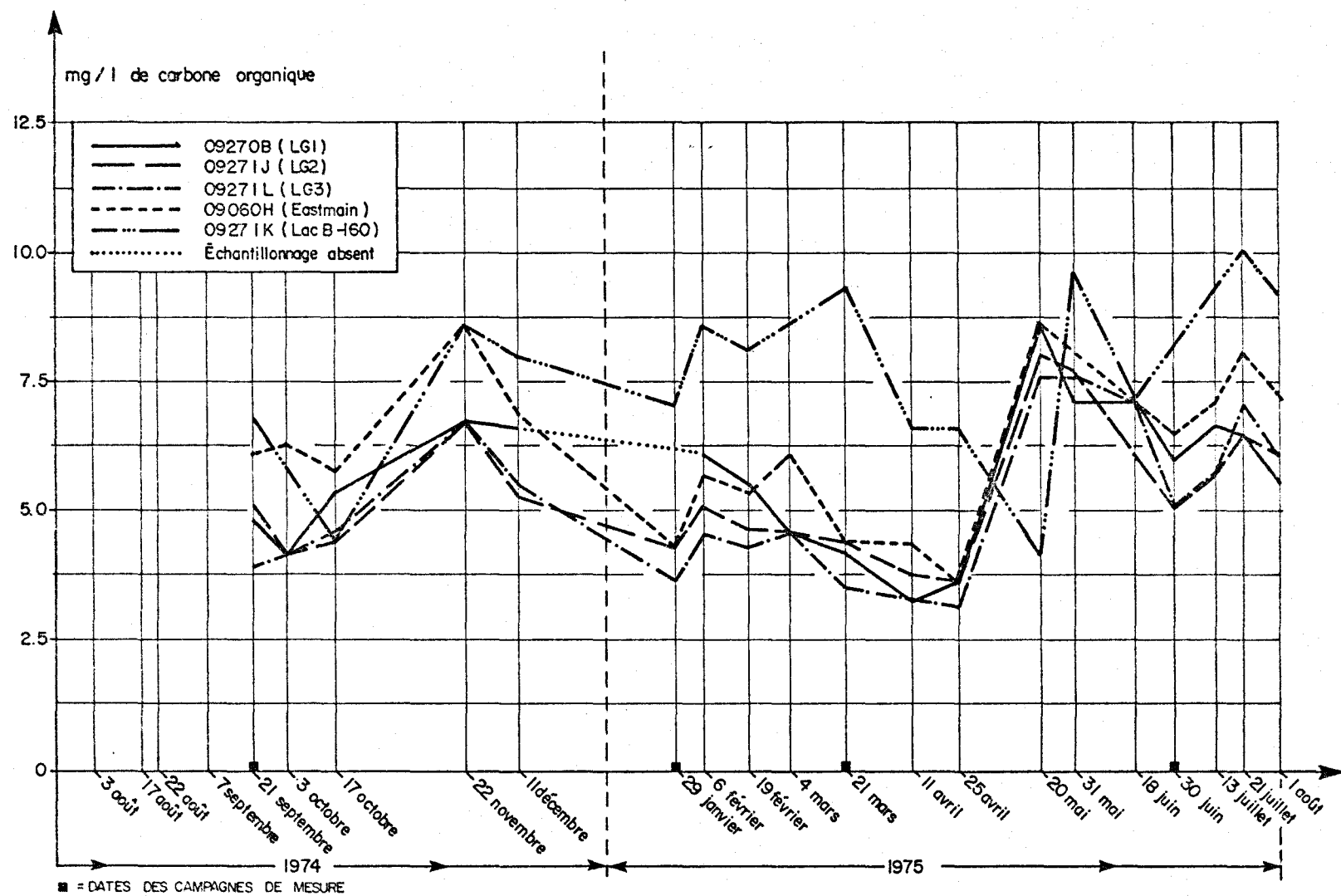


Fig.6.1. Évolution temporelle du carbone organique aux stations de base .

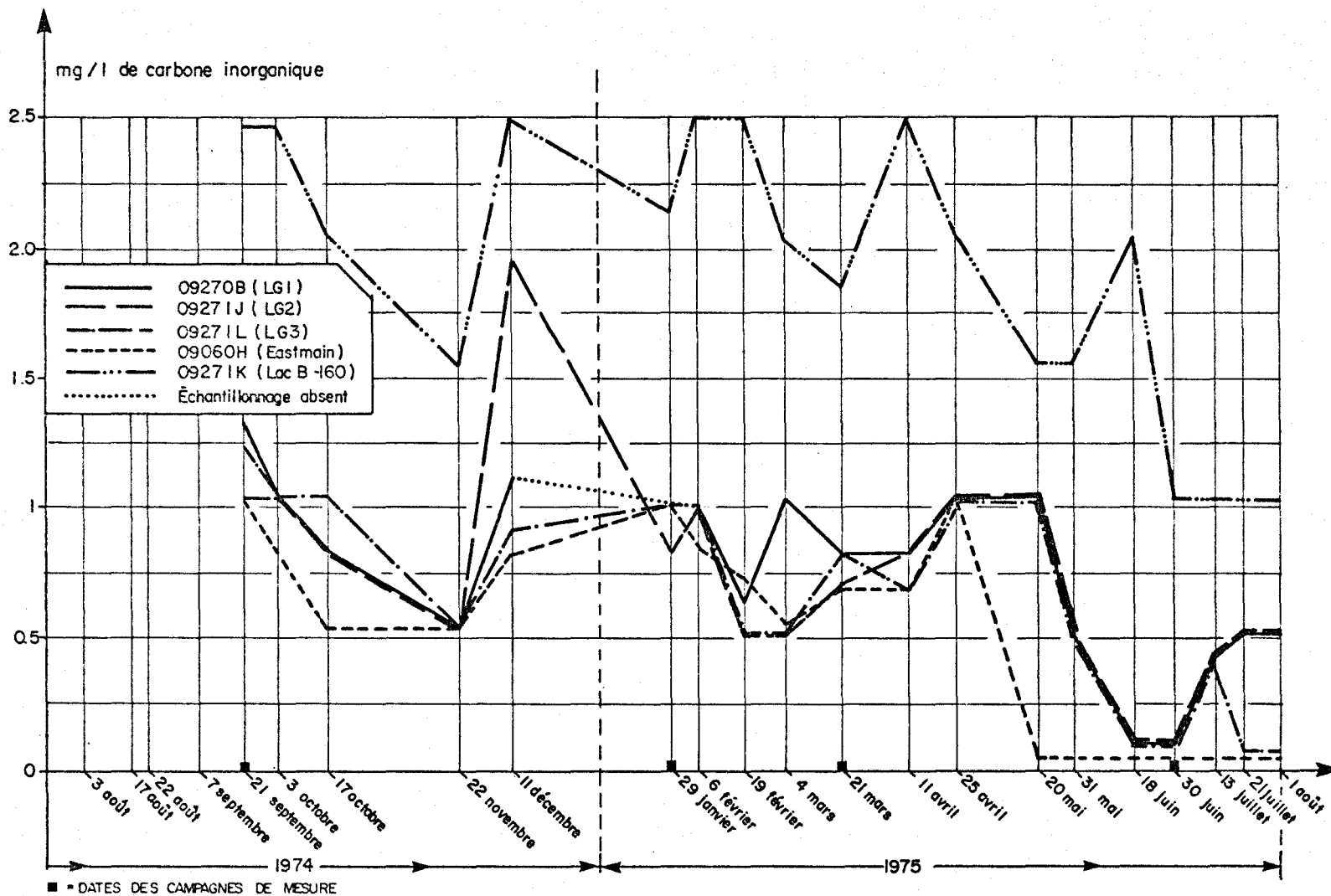


Fig. 6.2. Évolution temporelle du carbone inorganique aux stations de base .

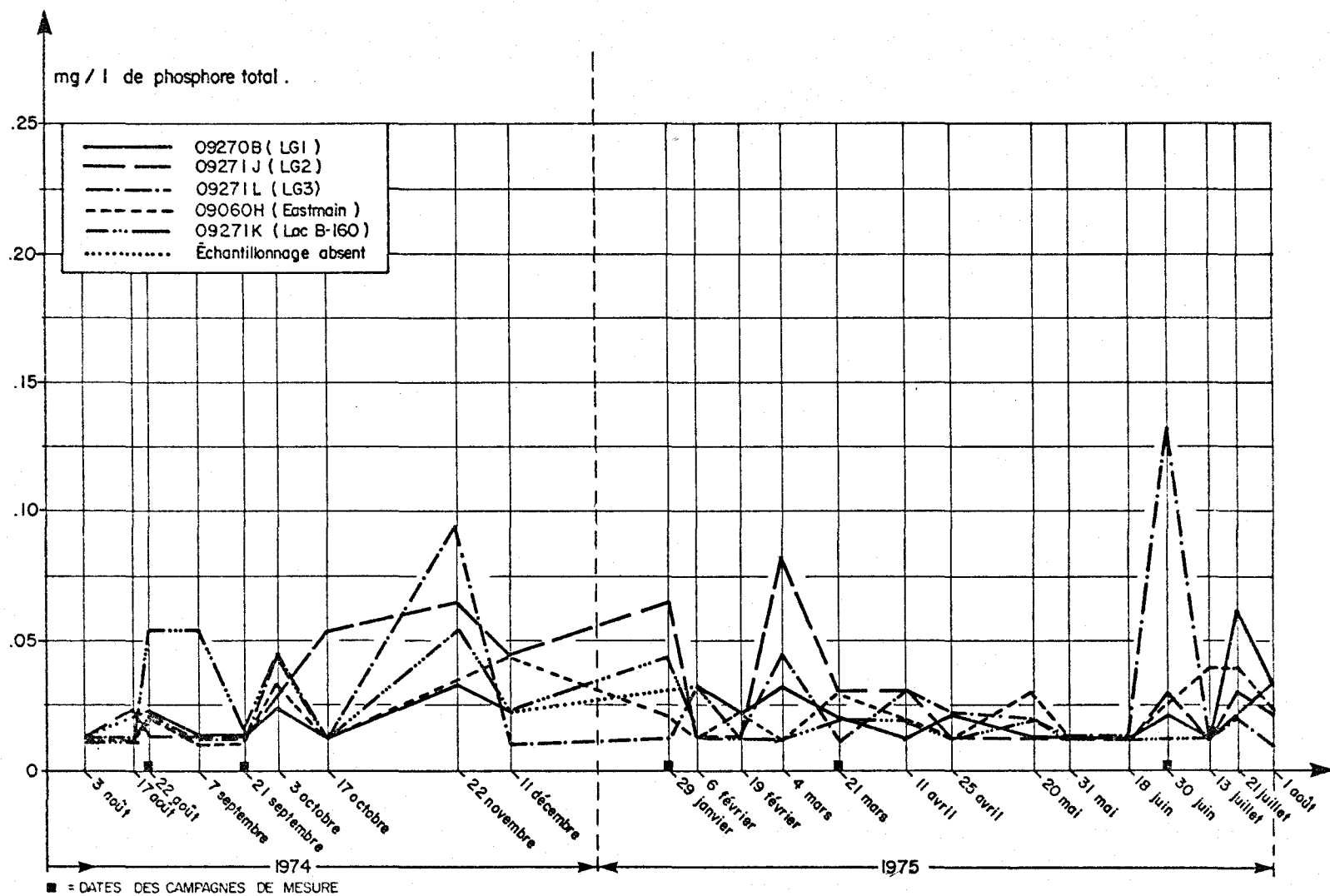


Fig. 6.3. Évolution temporelle du phosphore total aux stations de base .

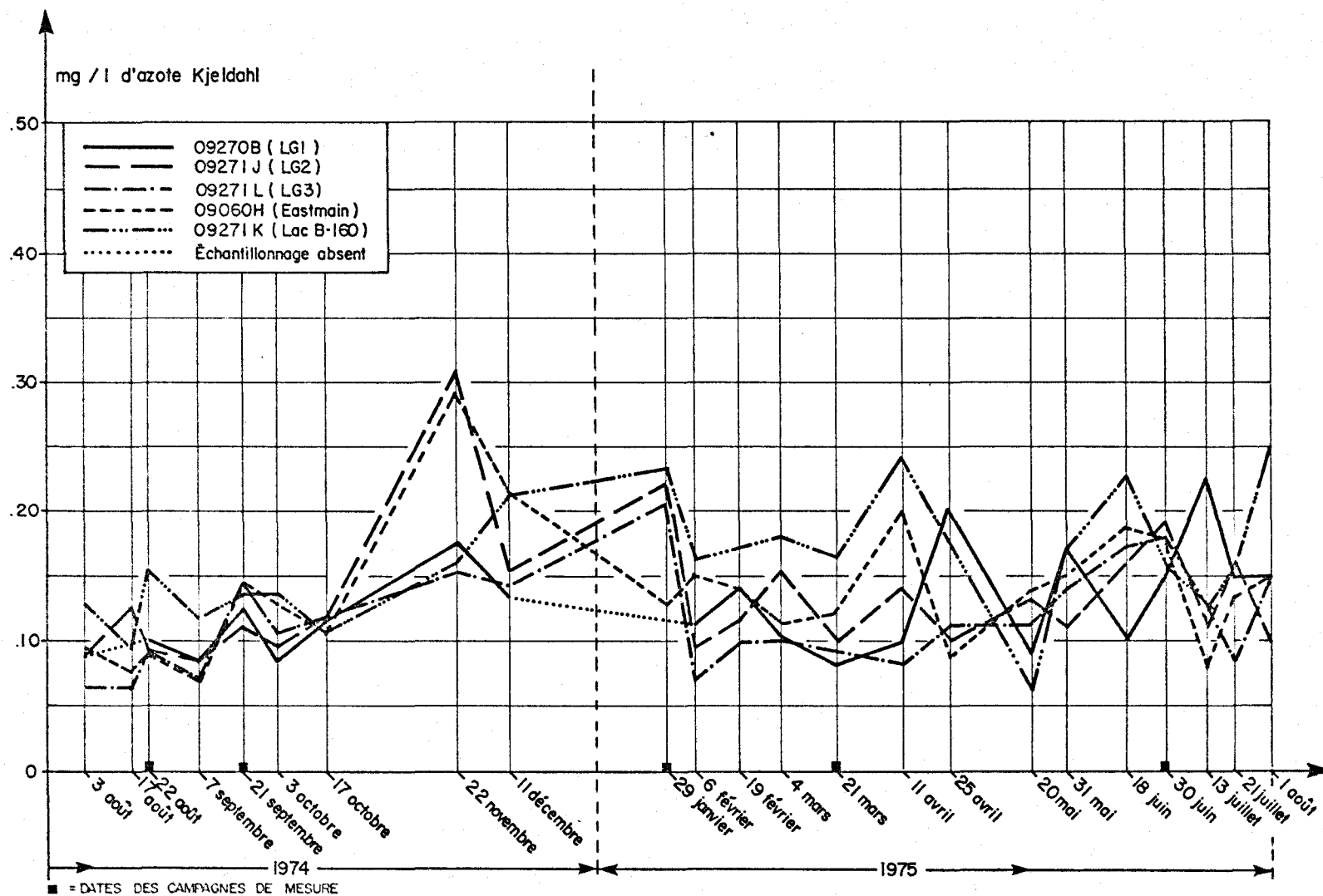


Fig. 6.4. Évolution de l'azote Kjeldahl aux stations de base .

pour origine aussi bien l'écosystème terrestre environnant que le milieu aquatique lui-même.

Aux stations de base, les concentrations varient de 3 à 10 mg/l.

Aux quatre stations situées en rivière, les concentrations très groupées suivent l'évolution générale des débits par l'intermédiaire des apports liés au ruissellement rapide: on note un maximum durant la crue d'automne (octobre, novembre), suivi d'une décroissance sous couvert de glace, puis une remontée brusque à la débâcle (mai).

A la station 5 (lac B-160), le schéma général est le même avec une plus grande stabilité des concentrations au début de l'hiver liée aux apports autochtones plus importants et un retard à la débâcle (calage du lac) fin mai, début juin.

. Carbone inorganique (C-inorg.)

Le Carbone inorganique provient de la dissolution du gaz carbonique dans l'eau, principalement, mais aussi des carbonates.

De sérieuses réserves doivent être apportées, comme nous le montrons en Annexe 2, en ce qui concerne la mesure du Carbone inorganique, spécialement en milieu acide, comme c'est le cas dans le territoire de la Baie de James.

L'évolution générale des concentrations est l'inverse de celle du Carbone organique, en particulier les concentrations sont faibles durant les crues d'automne (17/10 et 22/11) et à la débâcle (20/5 et 30/6). Durant ces périodes, l'oxygénation des eaux de rivière est excellente.

Le niveau des concentrations au Lac B-160 (Station 5) est environ le double de celles mesurées en rivière, où elles varient de la limite de détection à 2.5 mg/l.

. Phosphore total (P_T)

Le phosphore est l'un des éléments nutritifs les plus importants pour la croissance animale et végétale. La principale source de phosphore est le phosphate minéral; son origine peut être la dégradation des roches (origine géologique), la décomposition des organismes aquatiques des sédiments et les précipitations atmosphériques.

Dans notre cas, de nombreuses valeurs sont inférieures au seuil de détection (0.02 mg/l). Les moyennes et les écarts-types aux 5 stations de base sont de l'ordre de grandeur de ce seuil. Le maximum atteint à LG3 est de 0.14 mg/l, le 30 juin 1975. On ne note aucune fluctuation cohérente et significative.

. Azote Kjeldahl (N_K)

L'azote Kjeldahl est la mesure de l'azote lié à la matière organique. Les valeurs observées sont faibles, de 0.06 mg/l à 0.30 mg/l, mais nettement significatives par rapport au seuil de détection de 0.02 mg/l. Les maxima sont obtenus à l'automne et au début de l'hiver, ce qui correspond aux crues d'automne et à la fin du cycle végétatif annuel.

6.3 Caractéristiques statistiques des substances nutritives

6.3.a Moyennes et Ecart-types

Nous avons suivi ici la même procédure qu'au paragraphe 3.2.a.

Il faut noter pourtant qu'à cause de problèmes analytiques initiaux (Carbones organique et inorganique), les longueurs des séries valides varient de 18 à 23 aux stations de base et de 4 à 5 aux stations satellites.

Les moyennes et écart-types des séries obtenues aux stations de base sont présentés aux Tableaux 6.1 et 6.2.

Les moyennes et écart-types des séries obtenues aux stations satellites sont présentés aux Tableaux 6.3 et 6.4; sur ces mêmes tableaux se trouvent les moyennes et écart-types des valeurs mesurées aux stations de base échantillonnées aux mêmes dates.

6.3.b Représentativité des 5 campagnes de mesure

Comme au paragraphe 3.2.c, nous allons vérifier si les moyennes aux 5 dates d'échantillonnage sont représentatives des moyennes annuelles, c'est-à-dire des moyennes aux 23 dates d'échantillonnage des stations de base:

test d'égalité des variances - (Test F)

Nous calculons d'abord le rapport $F = \left(\frac{\sigma'_{I,J}}{\sigma_{I,J}} \right)^2$

où σ' représente les écart-types des séries courtes
et σ représente les écart-types des séries longues.

Paramètre Station	C-Org.	C-Inorg.	P _T	N _K
1	5.59	0.72	0.019	0.126
2	5.19	0.72	0.025	0.130
3	5.04	0.65	0.025	0.115
4	6.24	0.49	0.020	0.137
5	7.54	1.85	0.020	0.160

Table 6.1: Moyenne annuelle des concentrations mesurées aux stations de base (mg/l).

Paramètre Station	C-Org.	C-Inorg.	P _T	N _K
1	1.39	0.35	0.012	0.042
2	1.24	0.41	0.020	0.051
3	1.47	0.39	0.031	0.039
4	1.45	0.38	0.011	0.052
5	1.69	0.56	0.014	0.049

Table 6.2: Ecart-type des concentrations mesurées aux stations de base (mg/l).

Station Paramètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
C-org.	4.97	4.63	4.00	5.20	7.68	4.35	4.53	4.95	5.45	3.82	4.22	5.90	7.13	6.80	5.70	3.75	3.85	3.28	3.60	3.47	4.05
C-inorg.	0.72	0.64	0.76	0.69	1.83	1.02	1.13	0.69	0.69	0.69	0.86	0.61	0.89	0.71	0.44	1.38	1.00	0.81	0.71	1.40	0.79
P _T	0.018	0.028	0.038	0.022	0.026	0.016	0.017	0.020	0.032	0.014	0.040	0.026	0.024	0.018	0.018	0.016	0.024	0.024	0.020	0.012	0.020
N _K	0.113	0.142	0.140	0.132	0.166	0.112	0.100	0.118	0.094	0.112	0.132	0.132	0.160	0.148	0.116	0.142	0.148	0.112	0.134	0.106	0.140

Table 6.3: Moyennes des paramètres calculées à partir des 5 dates d'échantillonnage.

Station Paramètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
C-org.	0.93	0.44	0.68	1.24	1.18	1.14	1.15	1.27	1.00	0.89	2.03	0.84	1.84	0.74	0.35	1.19	1.55	0.95	1.79	0.81	2.73
C-inorg.	0.63	0.41	0.50	0.45	0.60	0.52	0.15	0.45	0.43	0.45	0.60	0.38	0.61	0.47	0.37	0.63	0.54	0.52	0.44	0.57	0.49
P _T	0.005	0.020	0.057	0.008	0.018	0.009	0.010	0.012	0.025	0.009	0.035	0.015	0.013	0.013	0.013	0.009	0.011	0.021	0.012	0.004	0.014
N _K	0.030	0.059	0.050	0.033	0.038	0.016	0.022	0.048	0.019	0.023	0.046	0.041	0.014	0.048	0.017	0.040	0.064	0.041	0.111	0.031	0.097

Table 6.4: Ecart-types des paramètres calculés à partir des 5 dates d'échantillonnage.

Ces valeurs de F sont données à la Table 6.5 et sont comparées aux valeurs F_1 et F_2 , limites inférieure et supérieure de la zone d'acceptation à des niveaux de signification de $\alpha = 5\%$ et $\alpha = 1\%$ pour des séries de même longueur (Table 6.6). Il en ressort que l'hypothèse d'égalité des variances est vérifiée dans tous les cas à un niveau de signification de 5%.

• Test d'égalité des moyennes (Test t)

Après avoir vérifié l'hypothèse d'égalité des variances, il est possible de tester l'égalité des moyennes (Test de Student).

Pour cela, on calcule d'abord la variance combinée S^2 (Table 6.7):

$$S^2 = \frac{(N-1) \sigma^2 + (N' - 1) \sigma'^2}{N + N' - 2}$$

où σ et σ' représentent les écart-types de 2 séries et N et N' leurs longueurs respectives. Nous pouvons alors calculer la variable de Student

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{X}'}{S \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{N'}}}$$

où $\bar{X}$ et $\bar{X}'$ représentent les moyennes des deux séries. Ces valeurs sont présentées pour chaque station et chaque paramètre à la Table 6.8. Il suffit de comparer ces valeurs aux valeurs critiques de t , tirées des tables de Student à $\nu = N + N' - 2$ degrés de liberté pour vérifier si les deux séries proviennent de population de même moyenne.

Paramètre Station	C-org.	C-inorg.	P _T	N _K
1	.448 (3 et 18)	3.24 (3 et 18)	.174 (4 et 21)	.51 (4 et 21)
2	.126 (4 et 19)	1.000 (4 et 19)	1.000 (5 et 23)	1.338 (5 et 23)
3	.214 (4 et 19)	1.644 (4 et 19)	3.381 (5 et 23)	.925 (5 et 23)
4	.731 (4 et 19)	1.402 (4 et 19)	.529 (5 et 23)	.403 (5 et 23)
5	.488 (4 et 19)	1.148 (4 et 19)	1.653 (5 et 23)	.601 (5 et 23)

Table 6.5: Test d'égalité des variances: calcul de $F = \left(\frac{\sigma'}{\sigma}\right)^2$

* Les valeurs entre parenthèses représentent les longueurs des séries.

Longueurs des séries	Niveau de signification	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 1\%$
3 et 18	F_1	.025	.005
	F_2	4.619	7.354
4 et 19	F_1	.070	.023
	F_2	3.954	6.028
4 et 21	F_1	.071	.023
	F_2	3.859	5.818
5 et 23	F_1	.117	.050
	F_2	3.440	5.017

Table 6.6: Valeurs critiques de Test F.

Limites inférieure (F_1) et supérieure (F_2) de la zone d'acceptation.

Paramètre Station	C-org.	C-inorg.	P _T	N _K
1	1,349	,389	,011	,041
2	1,160	,410	,200	,052
3	1,361	,408	,036	,041
4	1.422	,391	,011	,050
5	1,627	,566	,015	,047

Table 6.7: Ecart-type combiné S

Paramètre Station	C-org.	C-inorg.	P _T	N _K
1	.737	0	.167	.581
2	.878	.355	.030	.468
3	1.389	.490	.732	1.236
4	1.329	.930	.368	.203
5	.156	.064	.811	.259

Table 6.8: Test d'égalité des moyennes; valeurs de $|t_0|$

Les valeurs critiques selon la longueur des séries sont données à la Table 6.9.

En comparant ces valeurs aux valeurs correspondantes de t_0 de la Table 6.8, on constate que les valeurs de t_0 sont toujours inférieures à celles de t , ce qui vérifie l'hypothèse de l'égalité des moyennes au niveau de signification de 5%.

6.4 Relation entre stations de base pour chaque paramètre

Nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les stations de base pour chaque paramètre. Compte tenu de la longueur variable des séries, ces coefficients sont significativement différents de zéro, s'ils sont, en valeur absolue, supérieurs à r_0 . Au niveau de signification de 5%, r_0 varie de 0.413 à 0.468, alors la longueur de la série N passe de 18 à 23. Alors qu'au niveau de signification de 1%, r_0 varie de 0.526 à 0.596.

On note à la Table 6.10 que tous les coefficients de corrélation sont positifs, ce qui est indicatif d'un sens de variation identique d'un paramètre donné entre chaque couple de stations.

En ce qui concerne le carbone organique, la station 5 n'est pas significativement corrélée avec les autres stations. Ce qui indique des comportements du carbone organique différents, dans un lac et dans une rivière.

On peut noter aussi que, tout en étant significativement différents de zéro, les coefficients de corrélation de la station 3 avec les autres

Longueurs des séries	$\nu = N + N' - 2$ degrés de liberté	Valeurs de t critique pour $\alpha = 5\%$
3 et 18	19	2,093
4 et 19	21	2,080
4 et 21	23	2,069
5 et 23	26	2,056

Table 6,9: Valeurs critiques du test de Student

Paramètre	Station	2	3	4	5
C-org.	1	0.90	0.91	0.86	0.02
	2		0.95	0.89	0.08
	3			0.91	0.07
	4				0.05
C-inorg.	1	0.99	1.00	0.99	0.98
	2		0.99	0.98	0.98
	3			0.99	0.98
	4				0.99
P_T	1	0.99	0.50	0.70	0.85
	2		0.51	0.70	0.85
	3			0.46	0.54
	4				0.82
N_K	1	0.88	0.73	0.89	0.83
	2		0.76	0.87	0.77
	3			0.65	0.67
	4				0.81

Table 6.10: Coefficients de corrélation entre stations de base pour chaque paramètre.

stations sont plus faibles (P_T et N_K) que l'ensemble des autres coefficients.

Pour l'ensemble des cas non mentionnés, tous les coefficients sont très élevés, ce qui met en évidence des comportements similaires.

6.5 Relation entre paramètres à chaque station de base

Les coefficients de corrélation entre paramètres à chaque station de base sont donnés à la Table 6.11.

En utilisant les valeurs de r_0 définies en 6.4, trois coefficients de corrélation seulement sont très significativement différents de zéro. On note, en outre, que les coefficients de corrélation entre le carbone organique et le carbone inorganique sont toujours négatifs, ce qui est un indice de variation de sens opposé.

D'autre part, les corrélations entre l'Azote Kjeldahl et le Carbone organique ou le Phosphore total sont toujours positives, ce qui indique des variations dans le même sens.

En conclusion, les substances nutritives mesurées ne sont, en général, pas significativement corrélées.

6.6 Evolution spatiale des moyennes des substances nutritives

Comme l'hypothèse d'égalité des moyennes entre séries longues et courtes aux stations de base a été vérifiée, nous pouvons donc suivre la même procédure qu'au paragraphe 3.2.c et considérer les stations situées à la hauteur du parallèle de la rivière La Grande, indépendamment des bassins hydrographiques sur lesquelles elles se trouvent.

Station	Paramètre	C-inorg.	P _T	N _K
1	C-org.	-0.38	0.02	0.17
	C-inorg.		-0.08	-0.35
	P _T			0.17
2	C-org.	-0.20	-0.23	0.22
	C-inorg.		0.02	-0.23
	P _T			0.64*
3	C-org.	-0.53*	0.04	0.22
	C-inorg.		-0.32	-0.27
	P _T			0.31
4	C-org.	-0.72*	0.35	0.38
	C-inorg.		-0.26	-0.08
	P _T			0.33
5	C-org.	-0.41	-0.06	0.40
	C-inorg.		-0.03	0.12
	P _T			0.06

Table 6.11: Coefficients de corrélation entre paramètres à chaque station de base.

* Valeurs très significativement différentes de zéro.

A la Table 6.12, nous avons comparé l'évolution Est-Ouest des paramètres pour les stations 21, 19, 20, 18, 10, 8, 3, 2 et 1. Pour les paramètres Carbone inorganique, Phosphore total et Azote Kjeldahl, il ne semble pas y avoir de tendance Est-Ouest marquée. Pour le Carbone organique, il y a nettement augmentation des concentrations de l'amont vers l'aval, que ce soit vers l'ouest sur le bassin de la rivière La Grande (stations 18, 10, 3, 2 et 1), ou bien vers le nord sur le bassin de la rivière Caniapiscaw (stations 20, 19 et 21). Ceci est lié probablement à la faible productivité des têtes de bassins.

Paramètre mg/l Station	C-org.	C-inorg.	P _T	N _K
21	↑ 4.05	0.79	0.020	0.140
19	3.60	0.71	0.020	0.134
20	3.47	1.40	0.012	0.106
18	3.28	0.81	0.024	0.112
10	3.82	0.69	0.014	0.112
8	4.95	0.69	0.020	0.118
3	5.04	0.65	0.025	0.115
2	5.19	0.72	0.025	0.130
1	↓ 5.59	0.72	0.019	0.126
Tendance	+	0	0	0

Table 6.12: Evolution spatiale des moyennes des concentrations en éléments nutritifs.

7- CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au cours de cette étude, nous avons pu mettre en évidence certaines caractéristiques générales du comportement des paramètres de qualité du territoire de la Baie de James. Ceci a été possible, car malgré leur nombre réduit, les données recueillies pendant la période de 1974-1975 ont un contenu en information exploitable, supérieur aux données de la période 1968-1973:

- . aux 5 stations de base on dispose de données prises avec une fréquence d'environ 2 semaines de manière régulière, ce qui permet de bien suivre l'évolution temporelle des paramètres. De plus, les dates de prélèvement sont les mêmes pour chaque station, ce qui permet d'examiner les corrélations entre stations pour un paramètre donné ou entre paramètres à une station donnée;
- . les données prises durant les 5 campagnes aux 16 stations satellites le sont aux mêmes dates à toutes les stations et, de plus, ces dates correspondent aussi à des prélèvements aux stations de base. Ceci permet donc d'examiner la variabilité spatiale et de relier le comportement des stations satellites à celles des stations de base.

L'étude a principalement porté sur l'analyse statistique des données, le point de vue descriptif déjà étudié dans un précédent rapport (GRISEL et BOBEE, 1974) a, en effet, été volontairement limité. Nous avons cependant effectué en 3.1.b, un contrôle de qualité des données d'ions majeurs à l'aide du bilan ionique et des comparaisons de la conductivité théorique et la conductivité mesurée. Cette procédure simple pourrait être systématisée, afin de détecter et d'éliminer les principales erreurs occasionnées

lors de la prise de mesure, de l'analyse en laboratoire ou encore, lors de la transcription des résultats.

D'autre part, en raison de l'insuffisance actuelle de données aux stations satellites, nous n'avons pu établir de résultats positifs; nous avons, cependant, essayé de dégager les grandes lignes de méthodes simples qui ont été utilisées et qui pourront l'être avec encore plus de succès lorsque des séries plus longues seront disponibles aux stations satellites.

Les méthodes utilisées nous ont permis de mettre en évidence plusieurs résultats intéressants et conduisent à certaines recommandations:

- a) A partir d'une étude (3.2.c) sur les données des stations de base, nous avons pu faire ressortir que les moyennes calculées à partir des 5 campagnes de mesure sont représentatives des moyennes annuelles pour l'ensemble des paramètres considérés. Cette conclusion, qui a été transposée aux stations satellites, permet d'étudier la variabilité spatiale des différents paramètres à travers le territoire. La taille réduite (5) des séries obtenues aux stations satellites a seulement pour effet d'élargir l'intervalle de confiance de la moyenne. Compte tenu de l'évolution temporelle observée aux stations de base pour les paramètres liés au débit, il serait intéressant dans la planification des campagnes futures de les relier davantage aux événements hydrologiques saisonniers (crues ou étiage). Cette recommandation est également valable dans le cas des stations de base.

De plus, il est possible, comme nous l'avons montré (3.7.b), d'effectuer une détermination du nombre de mesures que l'on doit effectuer, à une station, pour atteindre une précision fixée à priori sur la moyenne avec un niveau de confiance donné. Pour cela, les objectifs de précision sur la moyenne doivent cependant être définis par l'utilisateur dans le cas de chaque paramètre. Cette méthode pourra également être généralisée dans le futur, au cas d'un événement de probabilité au dépassement donné, lorsque la taille des séries sera suffisante (>30) pour ajuster des distributions statistiques permettant de représenter le comportement d'un paramètre à une station.

- b) L'étude des corrélations entre paramètres (4.3 et 6.5) fait ressortir la difficulté d'établir des relations, sauf dans le cas de quelques-uns d'entre eux. L'établissement des régressions entre paramètres pourra être précisé lorsque nous disposerons de données supplémentaires aux stations satellites. L'analyse factorielle des correspondances (Chapitre 5) montre, cependant, que ces régressions doivent être établies sur une base régionale et ne peuvent être valables pour l'ensemble du territoire. Il serait important, dans cet ordre d'idées, de pouvoir effectuer des mesures à une station de base située dans l'est du territoire. La station de base de Nitchequon, qui avait été recommandée lors de l'étude précédente et qui n'avait pu être opérée en raison des contraintes logistiques, devrait être considérée.
- c) L'étude des corrélations entre stations de base pour un paramètre donné (4.4.a et 6.4), a permis de mettre en évidence le comportement particulier de la station 5 située sur le Lac B-160 et les profondes analogies entre les 4 autres stations de base, particulièrement entre les

stations 1, 2 et 3, situées sur la rivière La Grande. La station 2 joue un rôle particulier en raison de sa position géographique intermédiaire entre les stations 1 et 3, ce que confirme les résultats de l'analyse factorielle des correspondances. Ceci nous permet de suggérer deux solutions pour l'échantillonnage futur:

- si l'on veut accroître la précision sur la moyenne annuelle et améliorer la connaissance de la variabilité temporelle, il est recommandé d'accroître la fréquence de mesure à la station LG2 (1 fois par semaine, par exemple). La fréquence de 2 semaines étant conservée aux autres stations de base, il deviendra alors possible de reconstituer les données sur une base hebdomadaire à ces stations par des régressions avec la station 2;
- si la connaissance de la variabilité temporelle aux stations de base est jugée suffisante en fonction des objectifs de la S.E.B.J., il est possible d'éliminer la station de base 1 et de la transformer en station satellite.

La première solution nous semble préférable si l'on veut améliorer la connaissance de la variabilité temporelle des différents paramètres, notamment aux moments des événements hydrologiques extrêmes, et si l'on veut mieux détecter l'incidence des événements météorologiques sur le comportement de certains paramètres.

- d) En ce qui concerne les relations entre stations de base et stations satellite, nous avons montré à titre indicatif, puisque la taille actuelle des séries aux stations satellite commande la prudence, leur intérêt et de quelle manière elles pouvaient être déterminées.

L'opération des mêmes stations satellites pendant au moins une année supplémentaire nous permettra d'aller plus loin dans cette direction. Lorsque des relations précises pourront être établies avec une bonne précision, il deviendra possible d'étendre les données des stations de base aux stations satellites pour les dates où nous ne disposerons pas de données à ces dernières.

- e) Malgré l'apparente homogénéité des données, due principalement à la faible gamme de variation des paramètres considérés, l'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances (Chapitre 5) a permis une discrimination des principaux bassins du territoire. Nous avons pu également confirmer l'existence de gradients Est-Ouest et Nord-Sud. Cette méthode n'a pas été appliquée aux 4 paramètres représentatifs des substances nutritives, en raison du nombre assez important de données absentes pour plusieurs d'entre eux.

En conclusion, nous recommandons de continuer l'opération du réseau actuel en considérant certaines modifications:

- augmentation de la fréquence à LG2 ou transformation de LG1 en station satellite suivant l'hypothèse retenue;
- établissement d'une station de base dans l'est du territoire, à Nitchequon, si possible;
- en raison des objectifs de la S.E.B.J, d'autres paramètres pourraient également être considérés si l'importance de la connaissance de leur comportement le justifie. En ce qui concerne le Carbone inorganique, sa mesure semble présenter peu d'intérêt, et les valeurs obtenues ont peu de sens (cf. 6.2 et Annexe 2);

- relier, lorsque cela est possible, l'échantillonnage des stations satellites et des stations de base aux événements hydrologiques.

Il nous semble important de continuer à:

- effectuer un échantillonnage régulier aux stations de base, toutes les stations étant mesurées aux mêmes dates;
- effectuer les campagnes aux stations satellites à des dates correspondant aux dates de prélèvements des stations de base; cette synchronisation de l'acquisition des données permet en effet une meilleure exploitation de l'information disponible.

Les études qui seront effectuées à partir de l'acquisition de données supplémentaires, devraient comprendre la généralisation et la systématisation des méthodes de traitement décrites dans ce rapport, particulièrement en ce qui concerne l'établissement de relations entre paramètres à une station ou entre stations pour un paramètre. Dans le cadre de la rationalisation du réseau, il deviendra alors possible de réduire le nombre de stations et sans doute le nombre de paramètres à échantillonner.

Certaines autres méthodes pourront également être appliquées dans des études futures (lois statistiques, analyse discriminante). Elles ne l'ont pas été parce que, d'une part, les données ne le permettaient pas et que d'autre part, le temps et les montants investis dans cette étude étaient limités.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENZECRI, J.P. et al, (1973). Analyse des données. Tomes 1 et 2. Dunod.
- FOURNIER, J.J. (1976), Physico-chimie des lacs Nathalie, Hélène et Julie et d'une tourbière reticulée en 1974-1975. Division Ecologie, Service Environnement, S.E.B.J.
- GRISEL, H. et B. BOBEE, (1974). Analyse des données de qualité du réseau de la Baie de James. M.R.N., Service Qualité des Eaux.
- HEM, J.D. (1970). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geol. Survey Water Supply Paper 1473, 2ème édition.
- RODIER, J. (1971), L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau. Dunod, Paris. 4ème édition.

ANNEXE 1

DONNEES DE BASE

LEGENDES

NU = numéro d'ordre de la station d'échantillonnage

Station = nomenclature MRN des stations

- les concentrations sont exprimées en mg/l
 - . les Chlorures en mg/l de [Cl]
 - . les Sulfates en mg/l de [SO₄]
 - . le Carbone total en mg/l de [C]
 - . le Carbone inorganique en mg/l de [C]
 - . l'Azote Kjeldahl en mg/l de [N]
 - . le Phosphore total en mg/l de [PO₄]
 - . la Silice en mg/l de [SiO₂]
 - . le Sodium en mg/l de [Na]
 - . le Potassium en mg/l de [K]
 - . le Calcium en mg/l de [Ca]
 - . le Magnésium en mg/l de [Mg]
 - . le Fer en mg/l de [Fe]
- la Conductivité est exprimée en µmho/cm
- le pH est exprimé en unité
- -0,0 signifie absence de données
- -.10; -.02 signifie inférieur au seuils de détection 0.10, 0.02

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
1	LG1	30874	1.8	1.5	.2	.8	.5	4.0	.5	.7	15.0	6.2	.11	-0.00	-0.00	-.02	.08
1	LG1	170874	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
1	LG1	220874	2.0	1.0	.4	1.0	.5	5.0	2.0	.7	15.0	6.4	.13	-0.00	-0.00	.02	.10
1	LG1	70974	2.4	1.6	.5	1.3	.3	6.0	2.1	1.1	16.0	6.5	.29	-0.00	-0.00	-.02	.08
1	LG1	210974	2.6	1.4	.3	1.0	.6	5.0	2.0	1.0	18.0	6.4	.35	4.70	1.30	-.02	.12
1	LG1	31074	2.9	1.5	.3	1.1	.4	6.0	2.5	1.5	16.0	6.5	.26	4.00	1.00	.02	.08
1	LG1	191074	2.9	1.5	.5	1.4	.5	6.0	2.0	1.3	19.0	6.6	.30	5.20	.80	-.02	.11
1	LG1	271174	2.9	1.2	.3	.7	.5	5.0	1.0	.7	16.0	6.4	.12	6.50	.50	.03	.17
1	LG1	111274	2.9	1.5	.3	1.2	.4	6.0	3.0	.7	17.0	6.4	.12	6.40	1.10	.02	.13
1	LG1	290175	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
1	LG1	60275	3.7	1.8	.3	1.7	.4	6.0	2.1	1.4	20.0	6.2	.10	6.00	1.00	.03	.11
1	LG1	190275	3.5	1.5	.4	1.1	.5	8.0	2.7	1.5	19.0	6.5	.10	5.40	.60	.02	.14
1	LG1	40375	3.7	.9	.3	1.0	.5	7.0	2.4	1.1	19.0	6.7	.13	4.50	1.00	.03	.10
1	LG1	210375	3.6	1.8	.3	1.0	.3	7.0	2.3	.4	19.0	6.7	.09	4.20	.80	.02	.08
1	LG1	110475	3.8	1.5	.3	1.4	.3	6.0	1.5	1.3	20.0	6.4	.09	3.20	.80	-.02	.10
1	LG1	250475	4.0	1.8	.4	1.5	.3	6.0	1.7	1.1	21.0	6.2	.14	3.50	1.00	.02	.20
1	LG1	200575	3.2	1.3	.4	1.0	.3	5.0	2.7	.2	16.0	6.4	.31	8.50	1.00	-.02	.09
1	LG1	310575	3.0	1.3	.3	.9	.4	2.0	1.0	1.3	14.0	5.5	.18	7.00	.50	-.02	.17
1	LG1	180675	2.5	1.0	.2	.7	.4	5.0	2.4	.7	14.0	6.4	.23	7.00	-.10	-.02	.10
1	LG1	300675	2.3	1.4	.2	.8	.3	5.0	1.5	.1	13.0	6.4	.11	6.00	-.10	.02	.15
1	LG1	130775	2.4	.9	.3	.6	.3	5.0	1.8	.2	14.0	6.3	.26	6.60	.40	-.02	.23
1	LG1	210775	2.2	1.7	.3	1.1	.4	4.0	2.6	1.1	34.0	6.2	.20	6.50	.50	.06	.15
1	LG1	10875	2.4	1.2	.3	1.4	.4	5.0	2.6	.5	15.0	6.3	.21	5.50	.50	.03	.15

DONNEES DE BASE A LA STATION 1

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
2	LG2	30874	1,7	1,0	,2	,7	,5	4,0	,5	,7	14,0	6,3	,07	-0,00	-0,00	-,02	,08
2	LG2	170874	1,7	1,2	,3	1,0	,7	4,0	1,0	,4	15,0	6,4	,11	-0,00	-0,00	,02	,12
2	LG2	220874	2,0	1,0	,3	1,0	,7	4,0	2,0	,6	15,0	6,0	,17	-0,00	-0,00	-,02	,09
2	LG2	70974	2,3	1,6	,4	1,2	,3	5,0	2,0	,9	15,0	6,3	,19	-0,00	-0,00	-,02	,08
2	LG2	210974	2,7	1,4	,2	,9	,4	5,0	2,0	,9	15,0	6,4	,23	5,00	1,00	-,02	,11
2	LG2	31074	2,6	1,5	,4	1,0	,4	5,0	2,0	1,1	14,0	6,4	,21	4,00	1,00	,02	,09
2	LG2	171074	2,7	1,2	,4	,9	,5	5,0	1,5	,8	14,0	6,4	,47	4,20	,80	,05	,11
2	LG2	271174	2,9	1,2	,3	,6	,4	5,0	1,0	,6	16,0	6,3	,13	6,50	,50	,06	,30
2	LG2	111274	3,0	1,5	,3	1,0	,3	10,0	3,0	,6	16,0	6,4	,09	5,10	1,90	,04	,15
2	LG2	290175	3,3	1,5	,3	1,1	,5	6,0	2,0	1,4	18,0	6,2	,11	4,20	,80	,06	,22
2	LG2	60275	3,5	1,5	,3	1,1	,4	6,0	1,7	,9	17,0	6,4	,17	5,00	1,00	-,02	,09
2	LG2	190275	3,4	1,5	,4	1,0	,4	6,0	2,2	,9	17,0	6,2	,08	4,50	,50	-,02	,11
2	LG2	40375	3,6	,8	,3	1,0	,3	6,0	2,0	,9	18,0	6,3	,64	4,50	,50	,08	,15
2	LG2	210375	3,6	1,8	,5	1,0	,4	7,0	2,3	,5	19,0	6,3	,07	4,30	,70	,03	,10
2	LG2	110475	3,8	1,4	,3	1,3	,3	7,0	1,4	1,1	19,0	6,8	,11	3,70	,80	,03	,14
2	LG2	250475	3,6	1,7	,3	1,3	,3	6,0	1,7	,9	19,0	6,3	,20	3,50	1,00	-,02	,10
2	LG2	200575	3,1	1,0	,2	1,0	,3	5,0	2,1	,1	15,0	6,2	,18	8,00	1,00	-,02	,13
2	LG2	310575	3,0	1,1	,3	,9	,3	2,0	,8	1,5	15,0	5,5	,18	7,50	,50	-,02	,11
2	LG2	180675	2,5	1,0	,2	,7	,4	5,0	2,2	,8	14,0	6,4	,25	6,00	-,10	-,02	,16
2	LG2	300675	2,3	1,3	,2	,8	,3	5,0	1,4	,1	14,0	6,5	,11	5,00	-,10	,03	,19
2	LG2	130775	2,2	,8	,2	,4	,2	5,0	1,8	,4	13,0	6,3	,15	5,60	,40	-,02	,11
2	LG2	210775	2,3	1,8	,4	1,3	,5	5,0	2,3	,8	16,0	6,1	,18	6,50	,50	,03	,16
2	LG2	10875	2,2	1,1	,3	1,1	,3	5,0	2,0	1,0	14,0	6,2	,15	5,50	,50	,02	,10

DONNEES DE BASE A LA STATION 2

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
3	LG3	30874	1,6	1,2	,2	,5	,4	3,0	1,0	,7	12,0	6,1	,05	-0,00	-0,00	-.02	,06
3	LG3	170874	1,6	1,1	,3	,7	,5	3,0	1,0	,2	13,0	6,2	,07	-0,00	-0,00	-.02	,06
3	LG3	220874	1,7	1,0	,3	,7	,4	4,0	2,0	,4	15,0	6,0	,08	-0,00	-0,00	,02	,09
3	LG3	70974	2,1	1,4	,3	,5	,3	5,0	1,9	,8	12,0	6,2	,11	-0,00	-0,00	-.02	,07
3	LG3	210974	2,5	1,2	,2	,7	,4	5,0	1,5	,6	12,0	6,3	,09	3,80	1,20	-.02	,14
3	LG3	31074	2,5	1,0	,3	,9	,4	5,0	2,0	,9	13,0	6,4	,15	4,00	1,00	,04	,10
3	LG3	171074	2,9	1,5	,4	,8	,4	6,0	1,5	,6	16,0	6,5	,20	4,50	1,00	-.02	,11
3	LG3	271174	2,9	1,0	,2	,6	,4	5,0	1,0	,6	13,0	6,3	,08	6,50	,50	,09	,15
3	LG3	111274	3,0	1,2	,2	,7	,3	5,0	2,5	,4	14,0	6,4	,08	5,10	,90	-.02	,14
3	LG3	290175	3,3	1,1	,3	,9	,3	6,0	1,1	1,0	16,0	6,5	,09	3,50	1,00	-.02	,20
3	LG3	60275	3,4	1,2	,2	,8	,3	6,0	1,5	,5	14,0	6,2	,06	4,50	1,00	,03	,07
3	LG3	190275	3,4	1,5	,3	,9	,4	7,0	1,9	1,3	16,0	6,3	,08	4,00	,50	-.02	,10
3	LG3	40375	3,5	,8	,2	,7	,1	6,0	2,2	,6	15,0	6,7	,08	4,50	,50	,04	,10
3	LG3	210375	3,3	1,7	,2	,7	,2	6,0	2,4	,1	15,0	6,3	,06	3,70	,80	-.02	,09
3	LG3	110475	3,8	1,2	,2	1,0	,3	6,0	1,4	,8	17,0	6,3	,06	3,30	,70	,03	,08
3	LG3	250475	3,6	1,6	,2	1,0	,3	4,0	1,6	,6	16,0	6,2	,10	3,00	1,00	,02	,11
3	LG3	200575	3,2	,9	,2	,5	,2	4,0	2,4	,1	14,0	6,0	,10	7,50	1,00	,02	,11
3	LG3	310575	3,0	,9	,2	,6	,2	2,0	1,1	1,1	12,0	5,4	,13	7,50	,50	-.02	,14
3	LG3	180675	2,6	,9	,2	,5	,3	5,0	2,7	,7	12,0	6,3	,13	7,00	-.10	-.02	,17
3	LG3	300675	2,2	1,2	,2	,8	,3	5,0	1,5	,2	14,0	6,3	,08	5,00	-.10	,14	,18
3	LG3	130775	2,2	,7	,2	,4	,2	5,0	1,5	,1	12,0	6,0	,11	5,50	,50	-.02	,13
3	LG3	210775	2,0	1,6	,3	1,7	,7	5,0	1,7	,5	12,0	6,0	,09	7,00	-.10	,02	,09
3	LG3	10875	2,0	1,0	,2	,8	,2	4,0	1,7	,6	12,0	6,1	,10	6,00	-.10	-.02	,15

DONNEES DE BASE A LA STATION.3

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
4	EASTM,	30874	2.1	1.2	.2	.6	.4	3.0	1.0	.8	13.0	6.1	.10	-0.00	-0.00	-.02	.09
4	EASTM,	170874	2.0	1.1	.3	.7	.5	3.0	.5	.2	13.0	6.2	.12	-0.00	-0.00	-.02	.07
4	EASTM,	220874	2.3	1.2	.3	.7	.5	3.0	2.0	.6	13.0	6.1	.12	-0.00	-0.00	.02	.09
4	EASTM,	70974	2.7	1.5	.3	.7	.2	4.0	2.8	.8	14.0	6.2	.20	-0.00	-0.00	-.02	.07
4	EASTM,	210974	3.2	1.4	.3	.7	.4	4.0	2.0	.8	13.0	6.1	.20	6.00	1.00	-.02	.14
4	EASTM,	31074	3.3	1.5	.3	1.0	.5	4.0	2.5	1.1	14.0	6.2	.30	6.20	.80	.03	.12
4	EASTM,	171074	3.2	1.2	.2	.7	.4	4.0	2.5	.6	12.0	6.3	.25	5.50	.50	-.02	.10
4	EASTM,	271174	3.8	1.2	.2	.7	.6	5.0	2.0	.8	16.0	6.2	.17	8.50	.50	.03	.29
4	EASTM,	111274	3.9	1.5	.2	.9	.3	4.0	3.5	.4	14.0	6.1	.20	6.70	.80	.04	.21
4	EASTM,	290175	4.7	1.7	.3	.8	.3	5.0	1.4	.9	16.0	6.2	.27	4.00	1.00	.02	.13
4	EASTM,	60275	4.9	1.5	.3	1.0	.3	5.0	1.8	1.0	17.0	6.2	.12	5.70	.80	-.02	.15
4	EASTM,	190275	4.9	1.8	.4	1.0	.5	7.0	2.9	.9	18.0	6.2	.49	5.30	.70	.02	.14
4	EASTM,	40375	5.1	1.0	.3	1.0	.5	5.0	2.7	.8	18.0	5.9	.77	6.00	.50	-.02	.11
4	EASTM,	210375	4.8	1.8	.2	.7	.3	5.0	2.4	.2	17.0	6.1	.37	4.30	.70	.03	.12
4	EASTM,	110475	5.3	1.5	.2	1.3	.5	7.0	2.0	1.1	20.0	6.5	.14	4.30	.70	.02	.20
4	EASTM,	250475	5.0	2.5	.3	1.2	.4	6.0	2.4	.7	19.0	6.2	.20	4.00	1.00	-.02	.09
4	EASTM,	200575	3.1	.9	.2	.5	.1	2.0	2.3	.3	11.0	5.9	.29	8.50	-.10	.03	.14
4	EASTM,	310575	2.9	.9	.1	.5	.2	1.0	1.3	1.3	12.0	5.1	.15	8.00	-.10	-.02	.15
4	EASTM,	180675	2.6	1.3	.2	1.9	.4	5.0	2.4	.7	13.0	6.2	.16	7.00	-.10	-.02	.19
4	EASTM,	300675	2.5	1.3	.2	.8	.3	4.0	1.8	.1	13.0	6.2	.14	6.50	-.10	.03	.18
4	EASTM,	130775	2.4	.8	.1	.4	.2	4.0	1.9	.1	12.0	6.1	.13	7.00	-.10	.04	.08
4	EASTM,	210775	2.5	1.8	.2	.9	.3	2.0	2.8	1.1	13.0	6.0	.16	8.00	-.10	.04	.14
4	EASTM,	10875	2.5	1.3	.2	1.1	.4	4.0	2.3	.6	13.0	6.0	.16	7.00	-.10	.02	.15

DONNEES DE BASE A LA STATION 4

NU	STATION	DATE	8102	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
5	B-160	30874	2,1	3,8	,5	2,2	,5	11,0	2,0	2,4	36,0	6,9	,02	-0,00	-0,00	-.02	,12
5	B-160	170874	2,0	3,4	,6	2,8	,6	11,0	2,5	1,9	37,0	6,7	,02	-0,00	-0,00	-.02	,09
5	B-160	220874	2,2	3,4	,5	2,7	,6	12,0	6,0	2,1	35,0	6,9	,01	-0,00	-0,00	,05	,15
5	B-160	70974	2,3	4,0	,6	2,6	,4	12,0	3,2	2,2	35,0	6,8	,04	-0,00	-0,00	,05	,11
5	B-160	210974	2,4	3,7	,6	2,3	,3	12,0	3,0	1,4	34,0	6,9	,01	6,60	2,40	-.02	,13
5	B-160	31074	2,4	4,2	,6	2,5	,5	12,0	2,5	2,6	35,0	6,9	,03	5,60	2,40	,04	,13
5	B-160	171074	2,4	3,2	,5	2,5	,5	13,0	2,5	2,0	34,0	7,1	,02	4,20	2,00	-.02	,10
5	B-160	271174	2,5	3,7	,5	1,8	,5	13,0	2,0	2,0	37,0	7,0	,02	8,50	1,50	,04	,16
5	B-160	111274	2,5	4,0	,5	2,4	,4	13,0	4,0	2,2	39,0	6,9	,03	7,50	2,50	,02	,21
5	B-160	290175	2,6	4,5	,6	2,3	,3	13,0	1,6	2,6	40,0	6,0	,02	6,90	2,10	,04	,23
5	B-160	60275	3,0	4,8	,6	3,1	,4	15,0	2,3	2,9	43,0	6,5	,02	6,50	2,50	-.02	,16
5	B-160	190275	3,1	4,8	,7	3,0	,4	17,0	3,5	3,0	48,0	6,9	,03	8,00	2,50	-.02	,17
5	B-160	40375	2,9	4,5	,6	2,9	,4	13,0	3,5	2,6	44,0	6,7	,04	8,50	2,00	-.02	,18
5	B-160	210375	2,9	4,6	,5	2,8	,3	15,0	3,3	2,0	42,0	6,5	,04	9,20	1,80	,02	,16
5	B-160	110475	2,9	4,8	,6	3,0	,4	14,0	2,5	2,9	43,0	6,8	,07	6,50	2,50	,02	,24
5	B-160	250475	2,8	4,8	,5	2,9	,3	12,0	2,9	2,2	41,0	6,9	,05	6,50	2,00	-.02	,18
5	B-160	200575	1,1	3,0	,4	2,2	,1	11,0	2,6	,6	18,0	6,6	,02	4,00	1,50	,02	,06
5	B-160	310575	2,6	4,0	,4	2,8	,2	11,0	1,9	3,0	37,0	6,4	,03	9,50	1,50	-.02	,17
5	B-160	180675	2,4	4,9	,8	5,4	,6	11,0	3,6	2,3	36,0	6,9	,03	7,00	2,00	-.02	,23
5	B-160	300675	2,4	4,1	,4	2,9	,3	12,0	2,0	1,7	36,0	6,9	,03	8,00	1,00	-.02	,16
5	B-160	130775	2,4	3,9	,4	2,2	,3	16,0	2,7	2,1	37,0	6,8	,03	9,00	1,00	-.02	,13
5	B-160	210775	2,2	4,3	,5	2,9	,3	13,0	3,7	2,4	36,0	6,9	,03	10,00	1,00	,02	,16
5	B-160	10875	2,2	4,0	,5	2,8	,2	12,0	3,0	2,2	36,0	7,0	,03	9,00	1,00	,03	,25

DONNEES DE BASE A LA STATION 5

NU	STATION	DATE	SiO2	CA	Mg	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
6	09270E	220874	2,3	1,4	,3	1,3	,6	6,0	2,0	,9	18,0	6,1	,14	-0,00	-0,00	-,02	,10
6	09270E	210974	3,0	1,5	,3	,9	,4	6,0	2,0	,5	21,0	6,4	,16	4,70	1,30	-,02	,12
6	09270E	290175	3,5	1,8	,3	1,2	,3	8,0	1,1	1,3	20,0	6,4	,13	3,00	1,50	,03	,09
6	09270E	210379	3,6	2,0	,3	1,3	,3	11,0	2,3	,8	21,0	6,4	,11	4,00	1,00	-,02	,13
6	09270E	300675	2,4	1,9	,2	1,0	,3	4,0	1,2	,3	15,0	6,5	,15	5,70	,30	,02	,12

NU	STATION	DATE	SiO2	CA	Mg	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
7	09270Y	220874	2,5	1,4	,4	1,6	,6	4,0	3,0	1,0	19,0	6,2	,23	-0,00	-0,00	-,02	,10
7	09270Y	210974	3,4	1,5	,5	1,0	,5	6,0	2,3	,6	18,0	6,2	,22	5,70	1,30	-,02	,13
7	09270Y	290175	3,4	1,9	,4	1,4	,3	7,0	1,2	1,4	21,0	6,3	,11	3,40	1,10	,03	,09
7	09270Y	210375	3,7	2,0	,3	1,3	,3	10,0	2,3	,7	23,0	6,5	,09	4,50	1,00	,02	,08
7	09270Y	300675	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00

NU	STATION	DATE	SiO2	CA	Mg	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
8	09270Z	220874	1,6	,7	,2	,7	,4	3,0	2,0	,4	11,0	5,9	,06	-0,00	-0,00	-,02	,08
8	09270Z	210974	2,4	1,2	,2	,5	,4	4,0	3,0	,9	12,0	6,2	,09	5,40	1,10	,04	,12
8	09270Z	290175	3,0	1,0	,2	,7	,2	7,0	1,0	,7	14,0	6,5	,38	3,20	,80	,02	,20
8	09270Z	210375	3,6	1,5	,3	,7	,2	6,0	2,0	,1	15,0	6,1	,06	6,20	,80	,02	,09
8	09270Z	300675	2,1	1,6	,1	,6	,3	5,0	1,0	,3	11,0	6,5	,07	5,00	-,10	-,02	,10

NU	STATION	DATE	SiO2	CA	Mg	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
9	09270G	220874	2,1	,7	,2	,7	,6	2,0	2,0	,6	11,0	5,7	,09	-0,00	-0,00	,04	,12
9	09270G	210974	2,9	1,0	,2	,6	,4	3,0	2,0	,2	10,0	6,0	,13	5,60	,90	-,02	,10
9	09270G	290175	4,0	1,5	,2	,7	,2	5,0	1,3	,6	13,0	6,1	,17	4,00	1,00	,07	,08
9	09270G	210375	4,6	1,3	,2	,7	,2	5,0	2,2	,1	10,0	5,9	,12	6,20	,80	,03	,07
9	09270G	300675	2,5	1,4	,1	,6	,2	4,0	1,5	,1	11,0	6,3	,12	6,00	-,10	-,02	,10

DONNEES DE BASE AUX STATIONS 6-7-8 et 9

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
10	09271G	220874	1.4	.8	.2	.7	.4	4.0	2.0	.4	12.0	5.9	.04	-0.00	-0.00	-.02	.10
10	09271G	210974	2.2	1.2	.2	.6	.4	4.0	2.0	.7	12.0	6.1	.06	4.00	1.00	-.02	.11
10	09271G	290175	2.9	1.7	.3	.8	.3	7.0	1.0	.8	15.0	6.5	.05	3.00	1.00	-.02	.15
10	09271G	210375	3.3	1.5	.2	.7	.2	5.0	2.0	.1	15.0	6.2	.06	3.30	.70	.03	.09
10	09271G	300675	2.0	1.7	.2	.5	.3	5.0	.9	.1	12.0	6.5	.32	5.00	-.10	-.02	.11

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
11	09270S	220874	.9	.8	.2	.5	.5	6.5	2.0	.5	11.0	6.7	.06	-0.00	-0.00	.03	.14
11	09270S	210974	1.2	1.0	.2	.5	.3	4.0	1.5	.2	10.0	6.0	.10	5.10	.90	-.02	.14
11	09270S	290175	2.4	1.5	.3	.5	.3	6.0	1.5	.9	15.0	6.2	.15	3.50	1.50	.10	.20
11	09270S	210375	2.9	1.8	.3	.7	.2	5.0	1.7	.6	15.0	5.7	.13	1.80	1.00	.03	.08
11	09270S	300675	1.6	.9	.2	1.1	.3	5.0	.9	1.0	10.0	6.3	.12	6.50	-.10	.03	.10

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
12	09060A	220874	2.3	1.4	.3	1.0	.5	3.0	2.5	.7	14.0	5.8	.15	-0.00	-0.00	-.02	.08
12	09060A	210974	3.1	1.4	.4	.9	.5	4.0	2.7	.9	15.0	6.2	.28	6.10	.90	.02	.15
12	09060A	290175	3.3	1.5	.4	1.3	.3	5.0	1.5	1.5	18.0	6.3	.37	5.20	.80	.05	.18
12	09060A	210375	4.5	1.9	.3	1.3	.3	6.0	3.4	.5	19.0	6.1	.19	5.30	.70	.03	.10
12	09060A	300675	2.5	1.3	.3	1.6	.4	5.0	2.0	.4	15.0	6.2	.23	7.00	-.10	.02	.15

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
13	09271H	220874	1.9	.7	.5	1.6	.7	12.0	2.0	1.1	11.0	6.7	.15	-0.00	-0.00	.04	.16
13	09271H	210974	1.7	1.0	.4	1.1	.6	4.0	2.0	1.2	16.0	6.2	.25	5.00	1.00	-.02	.14
13	09271H	290175	2.8	1.2	.5	1.4	.4	6.0	1.5	1.9	20.0	6.2	.09	7.00	1.00	-.02	.16
13	09271H	210375	4.2	1.8	.5	1.8	.4	-0.0	3.4	1.0	24.0	5.7	.18	9.50	1.50	.03	.18
13	09271H	300675	1.8	1.5	.3	1.6	.4	4.0	1.6	.7	16.0	6.3	.18	7.00	-.10	.03	.16

DONNEES DE BASE AUX STATIONS 10-11-12 et 13

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
14	092700	220874	2,0	,8	,4	1,3	,7	10,0	3,5	1,1	17,0	6,9	,08	-0,00	-0,00	,02	,13
14	092700	210974	2,1	1,4	,4	1,1	,6	5,0	2,0	1,2	18,0	6,2	,11	5,90	1,10	-.02	,12
14	092700	290175	3,0	1,7	,5	1,6	,4	5,0	1,5	1,9	22,0	6,2	,12	6,50	1,00	,04	,23
14	092700	210375	3,2	1,7	,4	1,5	,4	6,0	2,7	,9	21,0	-0,0	,11	7,30	,70	-.02	,11
14	092700	300675	2,5	2,5	,3	1,4	,4	5,0	1,5	,9	17,0	6,4	,13	7,50	-.10	-.02	,15

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
15	090600	220874	1,8	1,0	,3	,7	,6	1,0	1,5	,7	12,0	5,5	,13	-0,00	-0,00	-.02	,10
15	090600	210974	2,4	1,0	,3	1,0	,4	2,0	2,0	,4	12,0	5,6	,16	5,80	,70	-.02	,12
15	090600	290175	3,3	1,2	,3	,8	,2	4,0	1,6	,9	14,0	5,8	,24	5,20	,80	,04	,10
15	090600	210375	3,8	1,2	,3	,7	,2	4,0	2,8	,4	15,0	5,6	,13	5,80	,20	,02	,12
15	090600	300675	2,1	1,0	,2	,8	,3	4,0	1,6	,2	16,0	5,9	,11	6,00	-.10	-.02	,14

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
16	09271A	220874	1,7	1,4	,2	,7	,6	6,0	3,0	,6	16,0	6,2	,09	-0,00	-0,00	-.02	,12
16	09271A	210974	2,2	1,5	,3	,7	,5	6,0	2,0	,3	15,0	6,5	,10	4,50	1,50	-.02	,10
16	09271A	290175	3,1	1,9	,2	1,1	,4	9,0	1,3	1,0	19,0	6,4	,06	2,50	2,00	-.02	,18
16	09271A	210375	3,0	2,0	,2	-0,0	,3	12,0	2,0	,2	19,0	6,1	,06	3,00	1,50	,02	,19
16	09271A	300675	1,7	1,9	,1	,8	,3	6,0	,9	,1	18,0	6,6	,10	5,00	,50	,03	,12

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HCO3	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
17	09271B	220874	1,0	1,0	,2	,7	,5	4,0	2,0	,5	13,0	6,1	,06	-0,00	-0,00	,02	,14
17	09271B	210974	1,5	1,2	,1	,5	,3	5,0	1,5	,6	12,0	6,2	,08	3,80	1,20	-.02	,12
17	09271B	290175	2,9	1,8	,3	,9	,4	10,0	1,6	1,2	17,0	6,4	,15	3,80	1,20	,03	,26
17	09271B	210375	3,0	2,0	,3	,7	,2	7,0	2,0	1,8	18,0	6,3	,11	2,00	1,40	,04	,10
17	09271B	300675	1,9	1,5	,2	,6	,3	6,0	,9	,3	11,0	6,5	,11	5,80	,20	,02	,12

DONNEES DE BASE AUX STATIONS 14-15-16 et 17

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HC03	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
18	09270P	220874	1.9	.8	.2	.9	.4	3.8	2.8	.4	13.8	5.8	.02	-0.00	-0.00	-.02	.08
18	09270P	210974	2.1	1.0	.2	.6	.5	4.0	1.5	.6	12.0	6.2	.05	2.80	1.20	-.02	.11
18	09270P	290175	2.6	1.2	.3	.6	.4	6.0	1.5	.8	14.0	6.2	.17	3.50	1.00	.02	.18
18	09270P	210375	3.1	1.5	.2	.6	.3	5.0	1.8	.7	16.0	5.9	.08	2.30	1.00	.06	.03
18	09270P	300675	2.0	.8	.1	.6	.3	6.0	.9	1.1	11.0	6.6	.05	4.50	-.10	.02	.11

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HC03	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
19	10370R	220874	1.4	.6	.3	.5	.3	2.0	2.0	.4	10.0	5.1	.02	-0.00	-0.00	.02	.10
19	10370R	210974	1.3	1.0	.2	.5	.3	4.0	2.5	.5	10.0	6.2	.02	3.10	.90	-.02	.08
19	10370R	290175	2.0	1.0	.4	.7	.4	5.0	1.5	1.0	14.0	6.0	.07	3.60	.90	.04	.33
19	10370R	210375	2.3	1.1	.3	.6	.1	-0.0	1.5	.4	13.0	-0.0	.03	1.70	1.00	.02	.06
19	10370R	300675	1.9	.5	.2	.5	.2	4.0	.8	1.0	11.0	6.4	.10	6.00	-.10	-.02	.10

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HC03	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
20	10370S	220874	1.2	1.0	.3	.5	.4	5.0	2.0	.5	10.0	6.1	.04	-0.00	-0.00	-.02	.09
20	10370S	210974	1.2	1.0	.2	.5	.3	4.0	2.0	.6	10.0	6.1	.06	3.70	.80	-.02	.12
20	10370S	290175	2.5	1.2	.4	.5	.2	6.0	1.4	.7	14.0	6.0	.04	3.60	1.40	-.02	.14
20	10370S	210375	2.8	1.1	.3	.6	.1	5.0	1.5	.4	13.0	5.8	.04	1.60	1.00	.02	.06
20	10370S	300675	1.7	.5	.2	.5	.2	4.0	.8	1.0	10.0	6.3	.06	5.00	-.10	-.02	.12

NU	STATION	DATE	SI02	CA	MG	NA	K	HC03	SO4	CL	COND	PH	FE	CORG	CINORG	PTOT	NK
21	10370N	220874	1.1	.8	.3	.5	.5	3.0	2.0	.5	10.0	6.0	.02	-0.00	-0.00	-.02	.09
21	10370N	210974	1.1	1.0	.4	.5	.3	4.0	2.0	.6	9.0	6.5	.03	2.90	1.10	-.02	.09
21	10370N	290175	2.0	1.0	.3	.7	.4	6.0	1.5	.9	15.0	6.2	.05	3.50	1.00	-.02	.30
21	10370N	210375	2.2	1.1	.3	.5	.1	-0.0	1.5	.5	13.0	-0.0	.03	1.80	1.00	.03	.06
21	10370N	300675	1.3	.6	.2	.3	.2	4.0	.9	.6	9.0	6.3	.09	8.00	-.10	.04	.16

DONNEES DE BASE AUX STATIONS 18-19-20 et 21

ANNEXE 2

VERIFICATION DE LA VALIDITE DES
MESURES DE CARBONE INORGANIQUE

Afin de vérifier la validité des mesures de Carbone inorganique, une comparaison des valeurs mesurées de bicarbonates avec celles calculées à partir de la concentration de Carbone inorganique et du pH a été effectuée. Les détails du calcul de la concentration de bicarbonates sont donnés ci-dessous.

On peut écrire:

$$[\text{HCO}_3^-] = C_I \alpha_1 \quad (2.1)$$

où, C_I est la concentration de Carbone inorganique

α_1 est donné par l'expression:

$$\alpha_1 = \frac{K_1 [\text{H}^+]}{[\text{H}^+]^2 + K_1 [\text{H}^+] + K_1 K_2} \quad (2.2)$$

Dans cette dernière équation, K_1 et K_2 sont respectivement les première et deuxième constantes de dissociation de l'acide carbonique et leurs valeurs respectives, à 25°C et à dilution infinie sont de $10^{-6.35}$ et $10^{-10.33}$. Ces constantes sont corrigées pour tenir compte de la force ionique du milieu; on a donc:

$$K'_1 = \frac{K_1}{\gamma_{\text{HCO}_3}} \quad (2.3)$$

$$K'_2 = \frac{K_2 \gamma_{\text{HCO}_3}}{\gamma_{\text{CO}_3}} \quad (2.4)$$

où γ_{HCO_3} et γ_{CO_3} sont respectivement les coefficients d'activité des ions.

bicarbonate et carbonate. Ils sont calculés par l'équation de Guntelberg:

$$\log \gamma_i = \frac{-0.512 z_i^2 \sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} \quad (2.5)$$

où z_i est la charge de l'ion dont on veut calculer le coefficient d'activité et μ est la force ionique du milieu. Cette dernière est obtenue par l'équation suivante:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2 \quad (2.6)$$

où c_i est la concentration des ions exprimée en molarité.

Les concentrations de bicarbonates ont été calculées en tenant compte de la force ionique du milieu. Etant donné la faible minéralisation des eaux du territoire de la Baie de James, la correction apportée aux constantes d'équilibre est cependant peu importante. Les calculs ont été effectués pour une température de 25°C, étant donné que les données de température de l'eau n'étaient pas disponibles.

Une comparaison entre valeurs calculées et valeurs mesurées de Bicarbonates est effectuée dans la Table A. On constate que les valeurs calculées sont systématiquement inférieures à celles qui ont été mesurées. Ceci est dû, de toute évidence, à une perte de CO₂ lors de l'entreposage ou de l'analyse; cette perte est plus importante pour les pH bas, ce qui est normal, puisque la proportion de carbone inorganique sous forme de CO₂ dissous augmente avec une diminution du pH. Pour être plus rigoureux dans le calcul, il aurait fallu corriger les constantes d'équilibre K_1 et K_2 pour la température du milieu. Cependant, même sans cette correction, on peut avancer que les valeurs de carbone inorganique ne correspondent pas à la réalité dans ces milieux de bas pH et devraient conséquemment être abandonnées.

Station d'échantillonnage	Date d'échantillonnage	pH	[HCO ₃ ⁻] (mg/l HCO ₃ ⁻)		% de perte ¹ de CO ₂
			mesurée	calculée	
LG1	31-05-75	5,5	2.0	0.32	84
LG2	31-05-75	5,5	2.0	0.32	84
LG3	31-05-75	5.4	2.0	0.26	87
LG1	6-02-75	6.2	6.0	2.1	65
LG1	25-04-75	6.2	6.0	2.1	65
LG2	29-01-75	6.2	6.0	1.7	72
LG2	20-05-75	6.2	5.0	2.1	58
LG2	1-08-75	6.2	5.0	1.1	78
B-160	21-09-74	6.9	12.0	9.6	20
B-160	31-05-74	6.9	12.0	9.6	20
B-160	11-12-74	6.9	13.0	10.0	23
B-160	25-04-75	6.9	12.0	8.0	33
B-160	18-06-75	6.9	11.0	8.0	27

¹: rapport{([HCO₃] mesuré - [HCO₃] calculé) / [HCO₃] mesuré} multiplié par 100.

Table A.: Comparaison de concentrations de bicarbonate calculées et mesurées