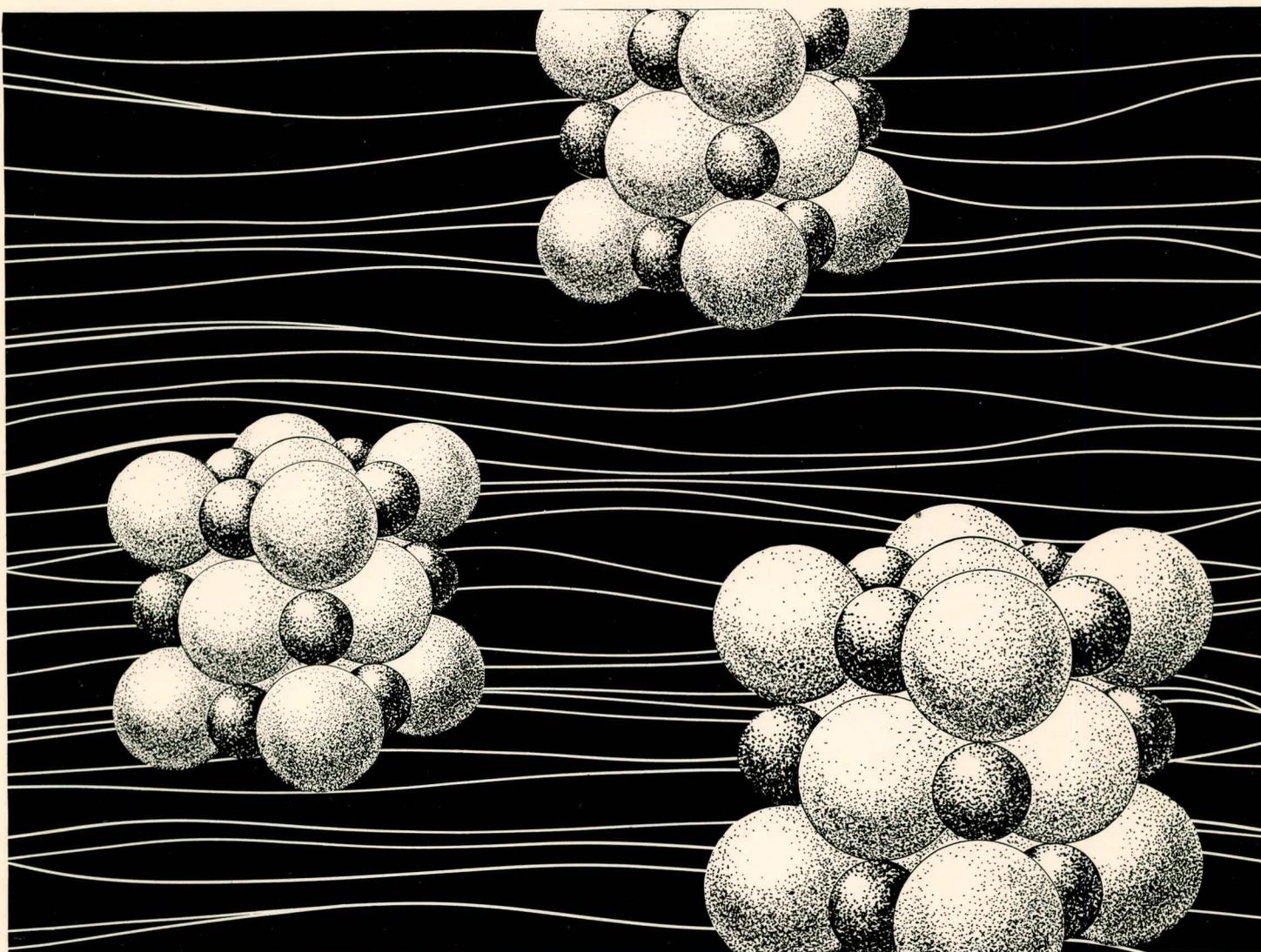
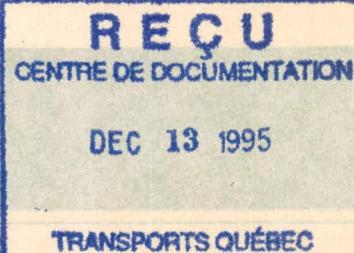




Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Service de l'Environnement



Modèle de calcul de la concentration en chlorures des lacs situés en bordure des routes

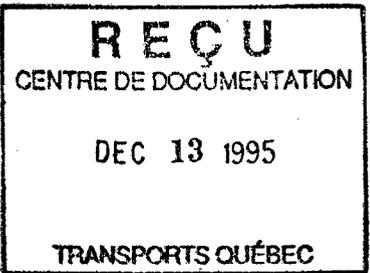


554280



Gouvernement du Québec
Ministère des Transports

Service de l'Environnement



MODÈLE DE CALCUL DE LA CONCENTRATION EN CHLORURES DES LACS SITUÉS EN BORDURE DES ROUTES

Chargé de projet: MOZHER SORIAL, M.Sc.A.

Réalisé par: PIERRE GAMACHE, M.Sc.
MOZHER SORIAL, M.Sc.A.
YVES STE-MARIE, M.Sc.

Septembre 1983

Page couverture : H. Khandjian

CANQ
TR
GE
EN
165
1983
Sept.
Ex. 1

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier monsieur Daniel Waltz, Chef du Service de l'Environnement, pour son appui continué tout au cours de l'étude, ainsi que les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'étude:

Kathleen Carrière, biologiste

Marie-José Auclair, biologiste

Ronald Piché, tech. en eau et assainissement

Micheline Lapointe, tech. en eau et assainissement

Daniel Legault, tech. en eau et assainissement

Hrant Khandjian, tech. graphiste

TABLE DES MATIERES

Remerciements i

Liste des tableaux v

Liste des figures vi

Preface par Daniel Waltz, chef du service de l'Environnement vii

Introduction 1

1. Problématique 2

2. Programme - Eté 1980 3

3. Echantillonnage des lacs 4

 3.1 Période d'échantillonnage 4

 3.2 Méthode d'échantillonnage 4

 3.3 Stations d'échantillonnage 4

 3.4 Méthodes d'analyses de l'eau 4

4. Vérification des résultats d'analyse physico-chimiques des lacs 5

 4.1 Tests à l'aide du bilan ionique et de la conductivité 5

 4.1.1 Test à l'aide du bilan ionique 5

 4.1.2 Test à l'aide de la conductivité 7

 4.2 Résultats des tests du bilan ionique et de conductivité 7

5. Résultats d'analyse physico-chimique de l'eau 8

 5.1 Traitement statistique des données 8

 5.2 Interprétation des résultats d'analyse d'eau 8

6. Evaluation de la concentration d'équilibre en chlorures des lacs 9

 6.1 Concept de concentration d'équilibre 9

| | | |
|---------|---|----|
| 6.2 | Développement d'un modèle de calcul pour évaluer la concentration d'équilibre en chlorures d'un lac | 9 |
| 6.2.1 | Modèle de calcul de la concentration d'équilibre | 9 |
| 6.2.2 | Calcul du débit de l'émissaire et de la quantité de chlorures parvenant au lac | 11 |
| 6.2.2.1 | Débit de l'émissaire | 11 |
| 6.2.2.2 | Quantité de chlorures parvenant au lac | 11 |
| 1.0 | Tonnes de chlorures épandues par kilomètre de route | 11 |
| 2.0 | Longueur de route se drainant au lac | 13 |
| 3.0 | Pourcentage de chlorures épandus sur la route parvenant au lac .. | 13 |
| 4.0 | Quantité de chlorures en provenance d'un autre lac | 13 |
| 6.2.3 | Pourcentage d'erreur sur la concentration d'équilibre en chlorures | 13 |
| 6.3 | Temps requis pour atteindre une concentration d'équilibre | 16 |
| 6.3.1 | Calcul du temps de réponse d'un lac | 16 |
| 6.3.2 | Erreur relative maximale sur les valeurs du temps de réponse | 19 |
| 6.4 | Valeurs des concentrations d'équilibres et du temps de réponse des lacs | 19 |
| 6.4.1 | Concentration d'équilibre calculée pour 26 des 40 lacs échantillonnés au cours de la période estivale de 1980 | 19 |
| 6.4.2 | Valeurs du temps de réponse des 26 lacs étudiés | 25 |
| | Conclusion | 29 |
| | Recommandations | 30 |
| | Bibliographie | 31 |

| | |
|----------------|----|
| Annexe 1 | 33 |
| Annexe 2 | 47 |
| Annexe 3 | 60 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|------------|--|----|
| Tableau 1 | - Localisation des lacs échantillonnés en 1980 | 34 |
| Tableau 2 | - Données physico-chimiques des lacs échantillonnés en 1980 en surface et au fond (valeurs en mg/l). | 36 |
| Tableau 3 | - Données physico-chimiques des lacs échantillonnée en 1980 en surface et au fond (valeurs en meq/l). | 40 |
| Tableau 4 | - Facteurs de conversion utilisés pour le calcul du bilan ionique et de la conductivité. | 6 |
| Tableau 5 | - Valeurs du déséquilibre ionique (DI) et de l'écart de conductivité (EC). | 44 |
| Tableau 6 | - Coefficient de corrélation de Pearson obtenus entre les différents paramètres étudiés et significatifs à $p \leq 0,01$ (concentration des ions exprimée en meq/l). | 50 |
| Tableau 7 | - Valeurs des rapports entre le sodium, le magnésium, le potassium et le calcium (valeurs des cations exprimées en mg/l) à la surface du lac. | 56 |
| Tableau 8 | - Quantité de sel épandue sur les routes situées aux abords des lacs et quantité de chlorures en provenance d'un autre lac. | 61 |
| Tableau 9 | - Données morphométriques nécessaires pour le calcul de la concentration d'équilibre et du temps de réponse. | 63 |
| Tableau 10 | - Concentration d'équilibre en chlorures des lacs lorsque 75% et 100% de la quantité de chlorures épandue sur la route parvient au lac (mg/l). | 20 |
| Tableau 11 | - Temps de réponse des 26 lacs étudiés. | 26 |
| Tableau 12 | - Concentration de chlorures observées au lac Orford depuis 1974. | 27 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 1 | - Débits spécifiques (m^3/sec par km^2) année hydrologique 1962-63 à 1975-76. | 12 |
| Figure 2 | - Comportement d'un lac pour atteindre différentes concentrations d'équilibres. | 18 |
| Figure 3 | - Histogramme de fréquence des différences en pourcentage entre les concentrations calculées et mesurées. | 24 |
| Figure 4 | - Graphique de la conductivité ($\mu s/cm$) en fonction de la concentration en sodium (meq/l). | 51 |
| Figure 5 | - Graphique de la conductivité ($\mu s/cm$) en fonction de la concentration en chlorures (meq/l). | 52 |
| Figure 6 | - Graphique de la conductivité ($\mu s/cm$) en fonction de la concentration en calcium (meq/l). | 53 |
| Figure 7 | - Graphique de la conductivité ($\mu s/cm$) en fonction de la concentration en magnésium (meq/l). | 54 |
| Figure 8 | - Graphique de la concentration en chlorures (meq/l) en fonction de la concentration en sodium (meq/l). | 55 |
| Figure 9 | - Graphique de la concentration en sodium (mg/l) en fonction du rapport sodium (mg/l)/calcium (mg/l). | 58 |
| Figure 10 | - Graphique de la concentration en chlorures (mg/l) en fonction du rapport sodium (mg/l)/calcium (mg/l). | 59 |

P R E F A C E

Rappelons brièvement que le service de l'Environnement du ministère des Transports du Québec a pris naissance sous diverses formes il y a de cela plus de 10 ans afin de répondre aux préoccupations de plus en plus marquées de notre société, face à la protection du milieu et à l'amélioration de la qualité de vie, impliquant une prise de conscience écologique de l'environnement par les citoyens, reflétée, bien entendu, au niveau de leur organisation gouvernementale.

Notre Service a cependant à faire face à des problèmes de nature très particulière, présentant des complexités d'interrelations redoutables et souvent difficiles à appréhender, tant au niveau analytique que systémique. En effet, nous touchons, par sa nature et sa fonction, à un système linéaire complexe intégré (réseau routier), «appliqué» nécessairement sur des écosystèmes extrêmement variés et de nature parfois opposée (milieu urbain, périurbain, rural, naturel). Les réponses (répercussions environnementales) par le milieu aux actions humaines (projets d'infrastructures) sont extrêmement variables, compte tenu de l'inter-relation des paramètres (facteurs du milieu), de la nature de l'intensité et de la durée de l'impact, mais aussi de son étendue en valeur relative comme absolue, et ce en prenant considération, en outre, de la sensibilité, vulnérabilité ou résistance du milieu.

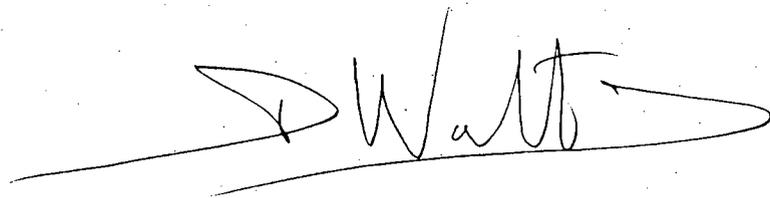
Or, un des impacts les plus fréquemment observés, lors de nos interventions, se situe au niveau des plans d'eau et, notamment, les risques de pollution par les «déglaçants» sont souvent avancés. Il était donc indispensable de se créer des outils suffisamment sûrs et assez élaborés pour répondre à de telles questions avec précision et sécurité afin de pouvoir en introduire les résultats dans nos études des répercussions environnementales intégrées.

C'est ce que vise l'objet de ce rapport et nous croyons que les auteurs ont fort bien répondu à notre attente, nous tenons à les féliciter pour leurs efforts de plus d'un an de travaux de recherche, d'échantillonnage, d'analyse et de traitement des données sur les contaminations des lacs par les sels de déglacage. On remarquera que le chargé de projet, monsieur Mozher Sorial, est ingénieur-chimiste et est titulaire d'une maîtrise en génie de l'environnement et qu'il est actuellement le chef de notre division du «Contrôle de la pollution et Recherches»; quant à monsieur Pierre Gamache il est biologiste et monsieur Yves Ste-Marie, physicien, tous deux possédant une maîtrise en sciences de l'environnement.

Les trois auteurs ont accumulé, en outre, une solide expérience en «Environnement-Transport» au sein du Service que j'ai la chance de diriger depuis sa mise en marche. Comme le font remarquer les auteurs, les travaux entrepris «nous ont permis d'arriver à plusieurs conclusions intéressantes dont, entre autres, que le modèle de concentration d'équilibre pouvait s'appliquer pour les lacs de la province.

Ce modèle qui n'est autre que la solution d'une équation différentielle du premier degré surprend par sa simplicité et sa fiabilité. Celui-ci permettra à notre Service de prédire la concentration maximale en chlorure que l'on est susceptible de retrouver dans un lac si l'on maintient ou varie le taux d'épandage des sels de déglacage sur une route. De même, il pourra servir de base comparative entre deux projets routiers susceptibles d'altérer la qualité physico-chimique de l'eau d'un lac. De plus, celui-ci nous permettra d'identifier les tronçons de route ou autoroutes sur lesquels l'on peut poursuivre les épandages de déglacants sans trop grand risque de contamination des eaux d'un lac, nous permettant ainsi de ne point compromettre indûment la sécurité d'une route par un arrêt injustifié des épandages de sels».

Nous croyons que ce travail pourrait être utile non seulement aux diverses unités de travail au sein de notre Ministère, mais aussi à d'autres spécialistes à l'extérieur du Ministère (Hydro-Québec, S.D.B.J., Universités, etc.). C'est pourquoi, en recommandons-nous une diffusion aussi ouverte que possible afin que notre Ministère fournisse cet élément supplémentaire de sa contribution à l'amélioration de la qualité de vie de nos citoyens.



Daniel Waltz
Chef du service de l'Environnement
Ministère des Transports

INTRODUCTION

Dans le but de rendre la chaussée praticable pour les automobilistes durant la période hivernale, des quantités importantes de déglaçants (NaCl) sont épandues sur les routes du Québec. Au printemps, l'eau provenant de la fonte de la neige située en bordure des routes contient une quantité appréciable de chlorures et peut parvenir aux lacs à proximité altérant alors la qualité physico-chimique de leurs eaux.

C'est suite à des problèmes reliés à la pollution de l'eau par les chlorures qui se sont présentés au lac à la Truite à Ste-Agathe Sud que le Service de l'Environnement du Ministère des Transports du Québec a mis de l'avant un projet d'étude sur l'accumulation des chlorures dans les lacs. En effet, le bassin hydrographique du lac à la Truite draine une section importante (3.1 km) de l'autoroute 15 à Ste-Agathe Sud et depuis la construction de celle-ci en 1972, une augmentation importante de la concentration en chlorures dans l'eau a été observée. Le lac constitue une source d'eau potable pour la municipalité de Ste-Agathe Sud et dès 1977, le Ministère des Transports du Québec recevait des plaintes au sujet de la qualité de leur eau potable. Pour remédier à ce problème, l'épandage de sel sur l'autoroute 15 fut réduit depuis 1978. Afin de maintenir la chaussée sécuritaire, l'Office des Autoroutes du Québec utilise une balayeuse mécanique du même type que celle utilisée dans les aéroports.

Pour développer un modèle permettant d'évaluer la concentration en chlorures des lacs situés en bordure des routes, nous avons poursuivi au cours de la période estivale de 1980 le programme d'échantillonnage des lacs entrepris en 1979.

Dans le présent rapport l'on présente les résultats de l'analyse physico-chimique des lacs échantillonnés en 1980 et l'on y décrit l'approche utilisée pour développer le modèle de calcul de la concentration en chlorures des lacs.

1. PROBLEMATIQUE

L'objectif premier de l'étude sur l'accumulation des chlorures dans les lacs s'oriente sur la mise au point d'un modèle qui nous permettra de prédire la concentration en chlorures des lacs, et ce en fonction de l'apport en chlorures, et le temps requis pour atteindre cette concentration. Ce modèle nous permettra d'évaluer la quantité de sel à épandre sur une route située en bordure d'un lac pour ne pas altérer la qualité physico-chimique de l'eau de façon significative. Il servira aussi dans le choix de tracé de moindre impact, dans les nouveaux projets de construction de routes, sur la qualité physico-chimique de l'eau.

Afin de prédire la concentration en chlorures d'un lac et le temps requis pour parvenir à cette concentration, il y a un certain nombre de paramètres à considérer. Ces paramètres sont la nature du sol, la distance entre la route et le lac, la quantité de sel épandue sur la route, le pourcentage de sel épandu sur la route qui parvient au lac, le volume du lac et le débit de l'émissaire du lac. A l'heure actuelle peu d'études ont porté sur l'utilisation de modèles servant à estimer la concentration en chlorures des lacs situés en bordure des routes. Aux Etats-Unis, le "Federal Highway administration" (1977) a développé un modèle de prédiction de la concentration en chlorures des lacs. Selon ce modèle il y aurait toujours une augmentation de la concentration en chlorures des lacs d'années en années sans qu'un maximum soit atteint. Pour notre part, nous croyons que la concentration en chlorures dans un lac croîtra jusqu'à ce que la quantité de sel entrant dans le lac soit égale à celle qui en sort; à ce moment une concentration d'équilibre est atteinte.

C'est à partir de ce principe que nous avons développé un modèle de prévision pour la concentration en chlorures des lacs. Afin de développer un tel modèle l'on doit connaître de façon la plus précise possible, les paramètres influençant l'accumulation des chlorures dans les lacs. Le paramètre le plus difficile à évaluer et qui joue le rôle le plus important sur la concentration en chlorures des lacs, est le pourcentage de chlorures épandus sur la route qui parvient au lac. Le "Federal Highway administration" (1977) mentionne que celui-ci est près de 75%. De leur part, le volume du lac, le débit de l'émissaire et la quantité de sel épandue sur la route peuvent être évalués avec un pourcentage d'erreur relativement faible.

2. PROGRAMME - ETE 1980

Afin de prédire la concentration d'équilibre en chlorures des lacs l'on doit connaître la quantité de sel épandue sur la route ainsi que les caractéristiques physico-chimiques et morphométriques des lacs étudiés.

Nous avons sélectionné quarante lacs en fonction de leur proximité des voies de circulation, de la disponibilité des données morphométriques et physico-chimiques les concernant et des résultats obtenus lors de l'échantillonnage de 1979. Parmi ces quarante lacs, nous avons choisi six lacs qui ne sont pas affectés par la proximité d'une route importante et qui serviront de lacs témoins dans l'étude physico-chimique des lacs (annexe 1).

Suite aux résultats obtenus lors de l'analyse des données recueillies en 1979, il a été établi que l'analyse physico-chimique des quarante lacs étudiés se ferait sur les paramètres suivants: la température, l'oxygène dissous, le pH, la conductivité, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, l'alcalinité, les sulfates, les chlorures, la turbidité et la transparence au disque de Secchi. L'étude des cations et anions majeurs permettra de voir si l'augmentation des chlorures et du sodium en provenance de la route entraîne une augmentation d'autres ions dans les lacs.

Le développement d'un modèle de calcul de la concentration d'équilibre nécessite que l'on connaisse plusieurs données morphométriques du lac soit: volume, superficie, module à l'exutoire, et temps de renouvellement. Les analyses chimiques nous permettront de voir si les lacs étudiés présentent une concentration d'équilibre ou si la concentration actuelle est inférieure à la concentration prédite à l'aide du modèle, ceci toujours en fonction de la quantité actuelle de sel répandue sur la route.

3. ECHANTILLONNAGE DES LACS

3.1 Période d'échantillonnage

L'échantillonnage des lacs a eu lieu durant la période du 9 juin au 10 septembre 1980.

3.2 Méthode d'échantillonnage

Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide d'un échantillonneur Kemmerer d'un litre. Pour chaque lac au point le plus profond, nous établissions la courbe de température afin de prélever des échantillons d'eau au niveau de l'épilimnion, du métalimnion et l'hypolimnion. La conductivité, l'oxygène dissous et le pH, furent mesurés aux profondeurs où l'eau était récoltée.

3.3 Stations d'échantillonnage

Pour chaque lac à l'étude, à l'exception des lacs témoins, nous avons aussi effectué l'échantillonnage dans les tributaires et l'émissaire et nous avons mesuré les vitesses d'écoulement de l'eau de ces cours d'eau, et ce, afin d'évaluer l'apport en chlorures provenant de sources autres que la route (lacs en amont et entrepôt de sel).

3.4 Méthodes d'analyse de l'eau

Les lectures de conductivité, de pH, d'oxygène dissous et de température ont été effectuées sur le terrain à l'aide d'un conductivimètre de marque YSI, d'un pH mètre de marque Digi sense, et d'un oxygène mètre de marque YSI. Les analyses des différents paramètres chimiques ont été réalisées par le laboratoire du Ministère de l'Environnement à Laval, selon les méthodes décrites dans Standard methods (AWWA, APHA, WPCF, 1971).

Les échantillons d'eau servant pour l'analyse des métaux étaient préservés en ajoutant 0,5 ml d'acide nitrique (HNO_3) 8N. Pour l'analyse des sulfates, des chlorures, de l'alcalinité et de la turbidité, aucun préservatif n'étaient requis.

Les résultats d'analyse d'eau des lacs échantillonnés en 1980 sont présentés à l'annexe 1 (tableaux 2 et 3).

4. VERIFICATION DES RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUES DES LACS

Avant de procéder au traitement statistique des données physico-chimiques obtenues lors de l'analyse des échantillons d'eau recueillis au cours de l'été 1980, nous avons procédé au calcul du bilan ionique et au calcul de la conductivité. Ces calculs permettent de mettre en évidence des erreurs d'échantillonnage ou d'analyse pour les sept ions majeurs et la conductivité.

4.1 Tests à l'aide du bilan ionique et de la conductivité

4.1.1 Test à l'aide du bilan ionique

Ce test a pour but de vérifier la validité des valeurs mesurées pour les principaux ions soit: pour les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) et pour les anions (HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- , CO_3^{--}). Il consiste à vérifier si la somme des anions correspond bien à la somme des cations lorsque leur concentration respective est exprimée en milliéquivalents.

Les données de HCO_3^- n'ayant pas été relevées, celles-ci ont été calculées à partir des mesures d'alcalinité totale. La concentration en HCO_3^- exprimée en mg/l, a été obtenue à l'aide de la relation suivante:

$$\text{HCO}_3^- = \frac{\text{alcalinité totale}}{1 + (2 \times 10^{(\text{pH} - 10.25)})}$$

Les valeurs de pH mesurées sur le terrain étant le plus souvent inférieures à 8,5 et qu'en présence de telles valeurs, la concentration de CO_3^{--} est négligeable, nous n'avons calculé que la concentration en HCO_3^- .

La vérification de la validité de la concentration des ions nécessite la transformation des données, exprimées en mg/l, en meq/l en multipliant les valeurs par certains facteurs de conversion (tableau 4).

Après avoir effectué cette transformation nous avons procédé au calcul du déséquilibre ionique à l'aide de la formule suivante (Bobee, 1977):

$$\text{DI} = \frac{(\sum \text{Ci} - \sum \text{Aj}) \times 100}{1/2 (\sum \text{Ci} + \sum \text{Aj})}$$

où Ci et Aj sont respectivement les concentrations du cation, i et de l'anion j exprimées en milliéquivalents.

Tableau 4 - FACTEURS DE CONVERSION UTILISES POUR LE CALCUL
DU BILAN IONIQUE ET DE LA CONDUCTIVITE

| Ions | Facteur de conversion | *Conductivité ionique équivalente à dilution infinie et à 25°C |
|-------------------------------|----------------------------|--|
| | Milliéquivalent/l par mg/l | μS/cm par mg/l |
| Ca ⁺⁺ | 0.04990 | 2.98 |
| Mg ⁺⁺ | 0.08226 | 4.35 |
| Na ⁺ | 0.04350 | 2.21 |
| K ⁺ | 0.02557 | 1.88 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.01639 | 0.73 |
| SO ₄ ⁻⁻ | - 0.02082 | 1.67 |
| Cl ⁻ | - 0.02821 | 2.15 |

* Tiré de Harned and Owen (1958)

4.1.2 Test à l'aide de la conductivité

Il s'agit de comparer la conductivité mesurée sur le terrain et celle calculée, à partir des anions et des cations considérés dans le test précédent.

La conductivité de l'eau peut être reconstituée en additionnant les conductivités propres à chacun des ions. Cependant, en raison des interactions, il faut faire intervenir certains facteurs de conversion propre à chacun des ions (tableau 4).

Ainsi, la conductivité peut être calculée par la relation suivante:

$$\sum X_i C_i + \sum X_j A_j$$

où,

C_i = Concentration du cation i (mg/l)

A_j = Concentration de l'anion j (mg/l)

X_i = Conductivité limite du cation i (μ S/cm/mg/l)

X_j = Conductivité limite de l'anion j (μ S/cm/mg/l)

On a aussi calculé, l'écart en pourcentage (EC) entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée à partir des concentrations des ions majeurs et des conductivités ioniques équivalentes:

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

4.2 Résultats des tests de bilan ionique et de conductivité

L'étude simultanée des résultats du test du bilan ionique et du test de conductivité permet de détecter et de corriger éventuellement certaines erreurs d'analyse. Lorsque le déséquilibre ionique et l'écart de conductivité étaient tous deux inférieurs à 25%, les résultats d'analyse étaient retenus pour le traitement des données (tableau 5, annexe 1). Suite à l'examen des valeurs de déséquilibre ionique et de l'écart de conductivité, aucune donnée d'analyse physico-chimique n'a été rejetée.

5. RESULTATS D'ANALYSE PHYSICO CHIMIQUE DE L'EAU

5.1 Traitement statistique des données

Le traitement statistique des données d'eau a été effectué à l'aide du logiciel SPSS (Statistical Package for the Social Science; Nie et al (1975)) sur l'ordinateur du Ministère des Transports du Québec.

5.2 Interprétation des résultats d'analyse d'eau

Afin d'examiner les relations existantes entre les divers paramètres, nous avons procédé au calcul des coefficients de corrélation de Pearson entre chacun d'eux et fait l'étude des rapports entre différents cations (tableau 6, annexe 2).

Les valeurs obtenues nous montrent que l'épandage de chlorure de sodium (NaCl) sur les routes situées en bordure des lacs ne semble pas entraîner d'augmentation de la concentration des cations et des anions autres que les chlorures et le sodium dans les lacs. C'est pour cette raison que nous sommes limités à développer un modèle d'accumulation des chlorures dans les lacs.

Une analyse plus détaillée des résultats d'analyse physico-chimique est fournie à l'annexe 2. Les résultats des analyses physico-chimique nous seront utiles dans la comparaison des concentrations de chlorures mesurées et des concentrations de chlorures calculées.

6. EVALUATION DE LA CONCENTRATION D'EQUILIBRE EN CHLORURE DES LACS

6.1 Concept de concentration d'équilibre

La concentration d'équilibre d'un lac pour différents éléments chimiques peut être définie comme étant la concentration maximale qu'un lac peut atteindre pour un apport annuel constant de ces éléments au lac.

Un lac présentera une concentration d'équilibre en chlorures au moment où la quantité de chlorures sortant du lac sera égale à la quantité parvenant au lac. En fonction du volume du lac, de l'apport en chlorures et du débit de l'émissaire, il résultera après un certain nombre d'années de salage de la route longeant un lac, une concentration d'équilibre que l'on pourra retrouver et qu'il est possible d'évaluer à l'aide d'un modèle mathématique.

Le calcul de la concentration d'équilibre se base sur les hypothèses suivantes:

- il n'y a pas de pertes de chlorures par sédimentation et par évaporation; ceux-ci demeurent en solution dans les lacs;
- il y a une répartition homogène verticale et horizontale des chlorures dans les lacs (phénomène nécessaire pour le calcul d'une concentration d'équilibre). Les résultats d'analyses physico-chimique des lacs, montrent que les chlorures sont répartis uniformément dans les lacs.

6.2 Développement d'un modèle de calcul pour évaluer la concentration d'équilibre en chlorures d'un lac.

6.2.1 Modèle de calcul de la concentration d'équilibre

Pour développer un modèle de calcul de la concentration d'équilibre en chlorures des lacs nous avons utilisé une formule développée par Metcalf et Eddy (1972) et qui s'écrit comme suit:

$$(1) \quad C = \frac{W}{BV} (1 - e^{-Bt}) + C_0 e^{-Bt}$$

où, C = Concentration au temps t (mg/l)

B = Fréquence de renouvellement du lac (année⁻¹).

W = Quantité de l'ion x parvenant au lac (mg).

V = Volume du lac (millions de m³)

C_0 = Concentration initiale de l'ion x dans le lac (mg/l)

t = Temps (année)

La concentration d'équilibre de l'ion x sera obtenue lorsque t tendra vers l'infini. A ce moment l'équation devient:

$$(2) \quad C = \frac{W}{BV}$$

car au temps infini:

$$(1 - C^{-Bt}) \text{ tend vers } 1$$

$$(C_0 e^{-Bt}) \text{ tend vers } 0$$

Considérant que:

$$B = 1/t_0 + K$$

$$t_0 = \frac{V}{Q}$$

où: t_0 = Temps de renouvellement de la masse d'eau (année).

Q = Débit de l'émissaire (m^3 /année).

V = Volume du lac ($10^6 m^3$)

K = Cte de sédimentation (Nulle pour les chlorures)

l'équation peut être simplifiée et s'écrire de la façon suivante:

$$C = \frac{W}{(1/t_0) V}$$

$$C = \frac{W}{(Q/V) V}$$

$$(3) \quad C = \frac{W}{Q}$$

Pour obtenir la concentration d'équilibre en mg/l, l'on transforme le débit de mètres cubes/année en litres/année.

Donc le calcul de la concentration d'équilibre en chlorures se base sur:

- le débit de l'émissaire (Q);
- la quantité de chlorures parvenant au lac (W).

6.2.2 Calcul du débit de l'émissaire et de la quantité de chlorures parvenant au lac.

6.2.2.1 Débit de l'émissaire

Lorsque le débit de l'émissaire n'était pas disponible au Ministère de l'Environnement du Québec, celui-ci a été calculé à l'aide d'une carte des débits spécifiques fournie par le service de la qualité des eaux du Ministère de l'Environnement du Québec (figure 1). Le débit de l'émissaire est évalué en multipliant la superficie du bassin hydrographique du lac (km^2) par le débit spécifique de ce bassin (m^3/sec par km^2). La superficie du bassin hydrographique lorsqu'elle n'était pas disponible au Ministère de l'Environnement du Québec, a été évaluée par planimétrie sur une carte topographique au 1: 20 000. Les débits ainsi calculés représentent une moyenne annuelle et l'erreur inhérente à la méthode est de $\pm 15\%$.

6.2.2.2 Quantité de chlorures parvenant au lac

La quantité de chlorures (mg) parvenant au lac a été évaluée de la façon suivante:

$$W = (Cl \cdot LRD \cdot P \cdot 10^9) + S$$

où Cl = Tonnes de chlorures épandus par kilomètre de route.

LRD = Longueur de route drainée dans le lac (km)

P = Pourcentage de chlorures épandus sur la route qui parvient au lac.

S = Quantité de chlorures en provenance d'un autre lac ou d'une autre source.

1.0 Tonnes de chlorures épandues par kilomètre de route

Les quantités de sel épandues sur les routes représentent un taux moyen d'épandage par kilomètre et ont été obtenues auprès des bureaux de district du Ministère des Transports du Québec situés dans les différentes régions du Québec.

Etant donné que l'on cherche à évaluer la concentration d'équilibre en chlorures, les quantités de sel (Na Cl) ont été transformées en tonnes de chlorures en multipliant celles-ci par un facteur (0,6034) qui représente le rapport moléculaire Cl^-/NaCl . (tableau 8, annexe 3).



FIGURE 1 - Débits spécifiques (m³/sec par km²)
Année hydrologique 1962-63 à 1975-76



Source: Service de l'Hydrométrie, M.R.N.

2.0 Longueur de route se drainant au lac

La longueur de route située dans le bassin de drainage du lac a été déterminée en premier lieu à l'aide d'un curvimètre sur une carte topographique au 1: 20 000 et vérifiée par la suite sur le terrain (tableau 8, annexe 3).

3.0 Pourcentage de chlorures épandus sur la route parvenant au lac

Le pourcentage de la quantité de sel épandue sur la route qui parvient au lac est l'un des paramètres le plus difficile à évaluer. Celui-ci peut varier pour le type de sol, la topographie, la proximité de la route et le drainage. Toutefois Kunkle (1971) mentionne qu'environ 75% de la quantité de sel épandue sur la route parvient au lac.

Dans nos calculs de la concentration d'équilibre, nous avons considéré que ce pourcentage varie entre 75% et 100%.

4.0 Quantité de chlorures en provenance d'un autre lac

Dans le cas de quelques lacs que nous avons échantillonnés, l'apport en chlorures peut provenir de la route et d'un ou plusieurs lacs situés en amont. Pour calculer la quantité de chlorures qui parvient d'autres lacs, nous avons considéré que les lacs en amont présentaient des conditions d'équilibre et avons calculé l'apport en chlorures en multipliant la concentration des chlorures (mg/l) par le débit de l'émissaire (l/année) (tableau 8, annexe 3).

6.2.3 Pourcentage d'erreur sur la concentration d'équilibre en chlorures

Lorsque l'apport en chlorures à un lac ne provient que de la route, le pourcentage d'erreur maximal sur la concentration d'équilibre a été évalué de la façon suivante:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \left(\frac{\Delta Cl}{Cl} + \frac{\Delta LRD}{LRD} + \frac{\Delta P}{P} \right) + \frac{\Delta Q}{Q}$$

Le taux d'épandage de sel représentant le taux moyen par kilomètre par année, l'erreur relative provient des variations annuelles du taux d'épandage. Puisque l'épandage de sel est constant d'un kilomètre à l'autre et que les épanduses fonctionnent à un rythme constant, l'erreur proviendra de la variation annuelle des quantités de sel épandues. Pour les différentes routes du Québec, on note une variation maximale de $\pm 8\%$ entre les hivers 1978-79 et 1979-80.

L'erreur relative sur la longueur de route drainée au lac provient de l'imprécision de la mesure sur les cartes topographiques et correspond à $\pm 7\%$. Comme nous l'avons mentionné antérieurement, l'erreur sur Q est de $\pm 15\%$. L'imprécision sur le pourcentage de sel épandu sur la route qui se rend au lac (P) est difficilement évaluable. Pour les besoins de calcul, nous considérons que P varie entre 75% et 100% et à la lumière des résultats obtenus nous pourrions préciser l'erreur relative maximale sur P.

L'erreur relative sur la concentration d'équilibre est donc:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta C1}{C1} + \frac{\Delta LRD}{LRD} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = 8\% + 7\% + 15\%$$

$$\frac{\Delta C}{C} = 30\%$$

Lorsque l'apport en chlorures à un lac (lacs: D'Argent, Ludger, Magog, Méduse) provient à la fois de la route et d'un autre lac, le pourcentage d'erreur a été évalué de la façon suivante:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$W = (C1 \cdot LRD \cdot P) + S$$

$$W = W^1 + S$$

$$\Delta W = \Delta W^1 + \Delta S$$

$$\frac{\Delta W^1}{W^1} = \left(\frac{\Delta C1}{C1} + \frac{\Delta LRD}{LRD} + \frac{\Delta P}{P} \right)$$

$$\Delta W^1 = W^1 \left(\frac{\Delta C1}{C1} + \frac{\Delta LRD}{LRD} + \frac{\Delta P}{P} \right)$$

$$\Delta W = \frac{W^1 (\Delta C1/C1 + \Delta LRD/LRD + \Delta P/P) + S}{(C1 \times LRD \times P) + S}$$

$$\frac{\Delta Ce}{Ce} = \frac{W^1 (\Delta C1/C1 + \Delta LRD/LRD + \Delta P/P) + \Delta S + \Delta Q}{(C1 \times LRD \times P) + S + Q}$$

ΔP étant négligeable et P se rapprochant de 100%

$$\frac{\Delta Ce}{Ce} = \frac{W^1 (\Delta C/C1 + \Delta LRD/LRD + \Delta S) + \Delta Q}{(C1 \times LRD) + S + Q}$$

$$\frac{\Delta Ce}{Ce} = \frac{W^1 (.15) + \Delta S}{(C1 \times LRD) + S} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\frac{\Delta Ce}{Ce} = \frac{W^1 (.15) + \Delta S}{(C1 \times LRD) + S} \times 100 + 15\%$$

$$\frac{\Delta Ce}{Ce} = \frac{W^1 (.15) + \Delta S}{(W^1) + S} \times 100 + 15\%$$

Où Ce est la concentration d'équilibre

6.3 Temps requis pour atteindre une concentration d'équilibre

Puisque la concentration d'équilibre est atteinte à un temps t infini, il peut s'avérer très utile d'évaluer le nombre d'années requis, après le début de salage d'une route, pour qu'un lac atteigne une concentration en chlorures équivalente à 99% de sa concentration d'équilibre. De même, lorsqu'un lac est fortement contaminé par les chlorures, il peut s'avérer important d'évaluer le temps requis pour que la concentration initiale diminue de 99%, ou que la concentration soit égale à 1,01 fois la concentration d'équilibre, à partir du moment où l'épandage de sel est interrompu ou diminué (Dillon et Rigler, 1975).

6.3.1 Calcul du temps de réponse d'un lac

Le temps de réponse des lacs peut être évalué en utilisant l'équation 1:

$$C = \frac{W}{BV} (1 - e^{-Bt}) + C_0 e^{-Bt}$$

lorsque $t \rightarrow t$ infini

$$W/BV = CE$$

en substituant CE à W/BV l'on obtient:

$$C = CE (1 - e^{-Bt}) + C_0 e^{-Bt}$$

Etant donné que l'on cherche à évaluer le temps requis pour atteindre soit 0,99 fois la concentration d'équilibre ou 1,01 fois la concentration d'équilibre l'on peut remplacer C par $CE + \frac{C_0 - CE}{100}$ et l'on obtient:

$$CE + \frac{C_0 - CE}{100} = CE (1 - e^{-Bt}) + C_0 e^{-Bt}$$

$$CE + \frac{C_0 - CE}{100} \approx CE - CE e^{-Bt} + C_0 e^{-Bt}$$

$$\frac{C_0 - CE}{100} = -CE e^{-Bt} + C_0 e^{-Bt}$$

$$\frac{C_0 - CE}{100} = e^{-Bt} (C_0 - CE)$$

$$\frac{(C_0 - CE)}{100} \times \frac{1}{(C_0 - CE)} = e^{-Bt}$$

$$\frac{1}{100} = e^{-Bt}$$

$$\ln 0,01 = -Bt$$

$$-4,60 = -Bt$$

$$\frac{-4,60}{-B} = t$$

$$\frac{4,60}{(1/t_0)} = t$$

$$tr = 4,60 \times t_0$$

où t_0 = temps de renouvellement CE = Concentration d'équilibre

tr = temps de réponse
(temps pour atteindre CE) C_0 = Concentration initiale

Le temps de réponse d'un lac est fonction seulement du temps de renouvellement du lac peu importe la concentration initiale et la concentration d'équilibre en chlorures.

La figure 2 montre qu'indépendamment de la concentration initiale en chlorures (C_0) et de la concentration d'équilibre en chlorures (CE), le temps requis pour atteindre CE est le même dans tous les cas. Cependant, le taux d'augmentation ou de diminution de la concentration en chlorures diffère pour chaque concentration d'équilibre.

Le temps de renouvellement de la masse d'eau t_0 peut être évalué en divisant le volume du lac (m^3) par le débit de l'émissaire (m^3 /jour).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le débit de l'émissaire peut être évalué à l'aide de la superficie du bassin hydrographique du lac et du débit spécifique. Pour évaluer le volume des lacs, lorsque la bathymétrie était disponible auprès du ministère de l'environnement, celui-ci a été déterminé par planimétrie. Lorsque celle-ci n'était pas disponible, nous avons utilisé un modèle de calcul de la profondeur moyenne mis au point par l'INRS - EAU (Villeneuve et al. 1978). La profondeur moyenne étant le rapport volume/superficie; nous pouvons donc facilement obtenir le volume lorsque les deux autres paramètres sont connus.

Malgré le pourcentage d'erreur (35%) élevée mentionné par Villeneuve et al. (1978) dans l'évaluation de la profondeur moyenne, cette méthode est jusqu'à présent la seule méthode en plus de la bathymétrie qui permet d'évaluer le volume d'un lac.

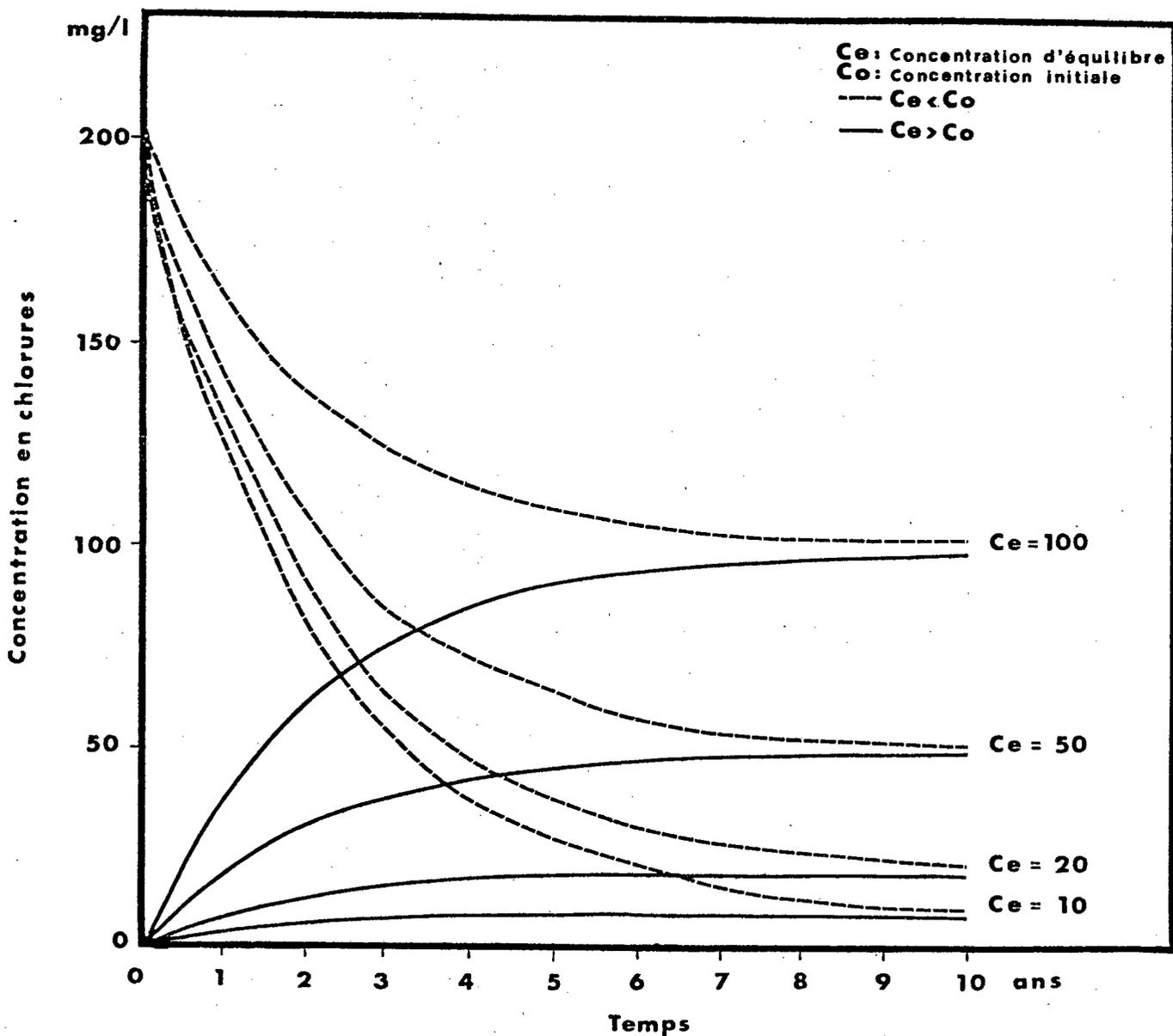


Figure 2: Comportement d'un lac pour atteindre différentes concentrations d'équilibres.

6.3.2 Erreur relative maximale sur les valeurs du temps de réponse

Considérant que le temps de réponse équivaut à 4,60 fois le temps de renouvellement du lac, l'erreur relative sur le temps de réponse provient de l'erreur relative sur le temps de renouvellement. On a donc:

$$\frac{\Delta tr}{tr} = \frac{\Delta to}{to}$$

$$\frac{\Delta tr}{tr} = \frac{\Delta to}{to} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

Lorsque le volume a été évalué par planimétrie l'erreur relative maximale sur le temps de réponse correspond à:

$$\frac{\Delta tr}{tr} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\frac{\Delta tr}{tr} = 5\% + 15\%$$

$$\frac{\Delta tr}{tr} = 20\%$$

Par contre lorsque le volume fut évalué à l'aide du modèle de l'INRS - EAU l'erreur relative maximale correspond à:

$$\frac{\Delta tr}{tr} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\frac{\Delta tr}{tr} = 35\% + 15\%$$

$$\frac{\Delta tr}{tr} = 50\%$$

6.4 Valeurs des concentrations d'équilibres et du temps de réponse des lacs

Pour 26 des 40 lacs étudiés nous avons procédé au calcul de la concentration d'équilibre en chlorures et du temps de réponse à l'aide des paramètres du tableau 9 (annexe 3).

6.4.1 Concentration d'équilibre calculée pour 26 des 40 lacs échantillonnés au cours de la période estivale de 1980.

Les concentrations d'équilibre calculées à l'aide du modèle décrit à la section 6.2.1, sont présentées au tableau 10. Les calculs ont été effectués pour deux valeurs du pourcentage de sel épandu sur la route qui se rend du lac, soit 75 et 100%.

Tableau 10 - Concentration d'équilibre en chlorures des lacs lorsque 75% et 100% de la quantité de chlorures épanchée sur la route parvient au lac (mg/l).

| Lac | Concentration d'équilibre | | Concentration mesurée en surface en 1980 |
|-----------------------------------|---------------------------|--------|--|
| | p=75% | p=100% | |
| André | 12 | 17 | 27 |
| D'Argent | 7 | 9 | 9 |
| Aux Barges | 7 | 9 | 6 |
| Beaulac | 7 | 9 | 13 |
| Brochet | 16 | 21 | 20 |
| Brome | 8 | 11 | 17 |
| Désert | 13 | 17 | 20 |
| 2e Lac du Chaufaud aux Basques | 17 | 22 | 7 |
| Dufour | 26 | 35 | 32 |
| Dufresnes | 9 | 12 | 15 |
| Duhamel | 11 | 15 | 44 |
| Ennis | 11 | 15 | 14 |
| Ludger | 5 | 6 | 7 |
| Magog | 7 | 10 | 10 |
| Méduse | 98 | 130 | 100 (1) |
| Millette | 36 | 48 | 67 |
| Orford | 31 | 41 | 44 |
| Pauzé | 15 | 20 | 31 |
| A Pitre | 25 | 33 | 38 |
| Du Portage | 23 | 31 | 34 |
| Robert | 13 | 11 | 19 |
| Roxton Pond | 4 | 6 | 5 |

Tableau 10 - (Suite)

| Lac | Concentration d'équilibre | | Concentration mesurée en surface en 1980 |
|-------------|------------------------------|--------|---|
| | p=75% | p=100% | |
| St-Denis | 4 | 5 | 26 |
| St-Louis | 5 | 7 | 14 |
| Ste-Marie | 25 | 33 | 30 |
| A la Truite | 157 | 201 | 113 (2) |

(1) Concentration observée en 1979

(2) Concentration observée en 1978

* L'erreur relative sur les valeurs des concentrations d'équilibre est de $\pm 30\%$.

L'examen des valeurs présentées dans ce tableau, nous indique que les concentrations d'équilibre calculées se rapprochent des concentrations mesurées dans les lacs durant la période estivale de 1980.

Dans le cas du lac à la Truite et du lac Méduse dans lequel le premier se déverse, dû à l'interruption de l'épandage de sel sur l'autoroute 15, il est impossible de vérifier si les concentrations d'équilibre calculées sont celles que les lacs auraient atteints. Mentionnons ici que le lac Méduse aurait atteint sa concentration d'équilibre quelques années après le lac à la Truite. L'on remarque toutefois que même si les concentrations mesurées dans ces deux lacs, diffèrent des concentrations d'équilibre calculées, elles sont du même ordre de grandeur.

Dans le cas des lacs André, 2ième lac du Chafaud aux Basques, Duhamel, Millette, Pauzé, St-Denis et St-Louis, l'on constate que les concentrations d'équilibre calculées, diffèrent des concentrations mesurées. Ces différences peuvent être dues à plusieurs facteurs

Dans le cas du lac Millette en plus de la route 117 et de l'autoroute 15, une chambre à sel du Ministère des Transports du Québec située non loin du lac constitue une source additionnelle de chlorures. Une quantité appréciable de sel peut parvenir au lac par l'eau provenant de la fonte de la neige apportée à l'intérieur de la chambre à sel par les camions. De plus les pertes de sel des camions aux environs de la chambre à sel contribuent à augmenter l'apport en chlorures au lac. Toutefois, il s'avère difficile de quantifier cet apport additionnel en sel, mais cela pourrait expliquer la différence entre la concentration d'équilibre calculée et la concentration mesurée.

Pour le lac St-Denis, l'apport en chlorures en provenance de la route 329 n'explique pas la concentration en chlorures mesurée dans le lac. A proximité du lac, se situe une base militaire des forces armées canadiennes où l'on y répand au moins 50 tonnes par année de sel sur les routes. Les informations recueillies sur les quantités de sel épandues à l'intérieur de la base ne permettent pas d'évaluer avec précision l'apport additionnel en chlorures au lac. Toutefois, cet apport constituerait la seule source de chlorures autre que la route.

En ce qui a trait aux lacs St-Louis, Pauzé, Duhamel et 2ième lac du Chafaud aux Basques, la grande différence entre les concentrations mesurées et les concentrations calculées peut provenir d'une mauvaise évaluation de la quantité de sel se rendant au lac ou d'une mauvaise évaluation du débit de l'émissaire.

Une étude plus approfondie devrait vraisemblablement nous permettre de cerner avec précision la ou les sources de ces divergences.

Considérant l'erreur relative sur les concentrations d'équilibre calculées, l'on constate que lorsque les calculs sont effectués avec un pourcentage de sel se rendant au lac équivalent à 100%, les concentrations mesurées se situent à l'intérieur de la plage de variation des concentrations calculées. De plus, l'on remarque que dans la majorité des cas la différence entre les concentrations calculées et mesurées est inférieure à 30%, valeur qui correspond à l'erreur relative maximale sur les valeurs calculées. Lorsque l'on considère que 75% du sel épandu sur la route parvient au lac, les concentrations calculées sont inférieures aux concentrations mesurées.

Afin de vérifier si les concentrations calculées pour 75% et 100% de la quantité de sel épandue qui se rend au lac diffèrent significativement nous avons calculé l'intervalle de confiance de la moyenne des différences (en pourcentage) entre les concentrations calculées et mesurées.

$$\frac{(\text{valeurs calculées} - \text{valeurs mesurées})}{\text{valeurs calculées}} \times 100$$

Dans le calcul nous avons exclus les lacs: Duhamel, Millette, Méduse, St-Denis, à la Truite et 2ième lac du Chafaud aux Basques en raison des explications fournies antérieurement.

En utilisant 95% comme intervalle de confiance de la moyenne, la différence moyenne est de $-55,9\% \pm 20,4\%$ dans l'hypothèse où 75% du sel épandu sur la route parvient au lac et $-16,9\% \pm 15,3\%$ pour 100%. L'on remarque que les intervalles de confiance ne se recoupent pas, indiquant ainsi que les concentrations calculées pour 75% et 100% diffèrent significativement. La figure 3, où sont illustrées les différences entre les concentrations mesurées et calculées montre que les concentrations d'équilibre sont nettement sous estimées lorsque l'on utilise 75% du sel épandu sur la route qui se rend au lac. Par contre, en utilisant 100% dans le calcul de la concentration d'équilibre, l'on sous estime de façon systématique, la concentration d'équilibre de 16,9 contre 55,9% pour 75%.

De tous ces résultats on peut conclure:

$$C = 1,169 \text{ W/Q} \pm 13,1\% \text{ W/Q}$$

pour un intervalle de confiance de 95% (t - Student)

$$C = \text{Concentration en mg/l}$$

$$\text{W/Q} = \text{Concentration d'équilibre en mg/l}$$

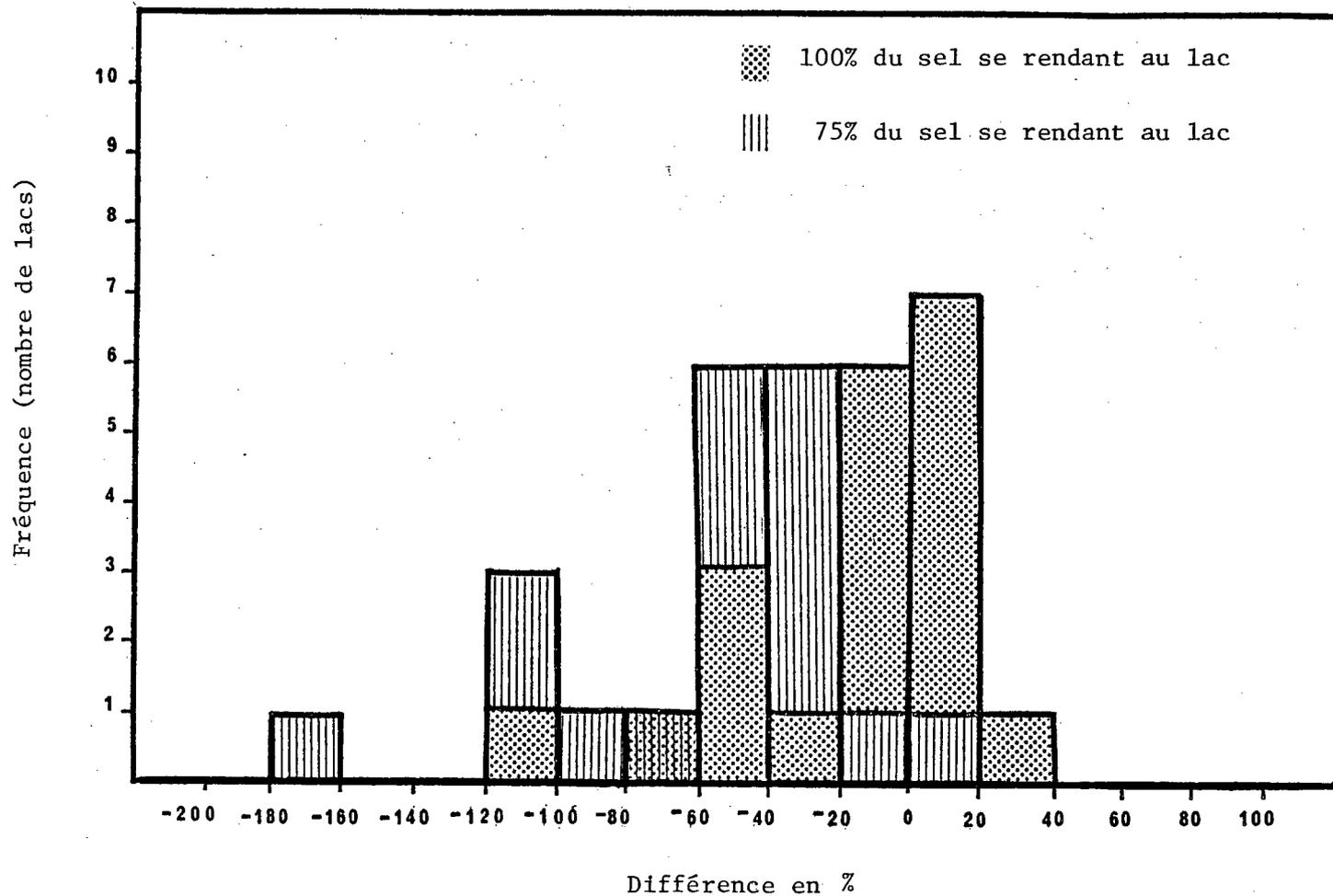


Figure 3: Histogramme de fréquence des différences en pourcentage entre les concentrations calculées et mesurées.

W = Apport en chlorures (mg/année)

Q = Débit à l'émissaire (l/année)

L'erreur relative du modèle de prévision est de 13,1% pour un intervalle de confiance de 95%. Ces résultats démontrent que le modèle est plus précis que nous l'espérions au départ étant donné l'imprécision des facteurs pour le calcul de la concentration d'équilibre (voir section 6.2.3). Le coefficient de corrélation de Pearson obtenu entre les concentrations calculées et les concentrations mesurées est de 0,93 pour $p \leq 0,01$.

6.4.2 Valeurs du temps de réponse des 26 lacs étudiés

Les temps de réponse obtenus pour les 26 lacs à l'étude (tableau 11) nous montrent qu'il y a une variation importante entre les différents lacs. Considérant que les lacs ont des caractéristiques physiques différentes (volume, superficie du bassin hydrographique, fréquence de renouvellement, débit de l'émissaire) les temps de réponse obtenus reflètent bien ces différences.

Pour les lacs où le temps de réponse est faible, l'on peut considérer qu'un apport important en chlorures occasionnera une augmentation subite de la concentration de chlorures dans le lac. Cette augmentation subite de la concentration pourrait avoir un impact majeur sur la faune et la flore aquatique.

Considérant que pour la majorité des lacs étudiés, les temps de réponse varient de 0,30 ans à 12,00 ans et que l'on répand du chlorure de sodium sur les routes en bordure de ces lacs depuis au moins 10 à 15 ans, les temps de réponse nous indiquent que les lacs étudiés devraient être à l'équilibre.

En examinant le temps de réponse obtenu pour le lac Orford (3920 jours \pm 20% ou 10,74 années) et considérant que l'autoroute 10 est en service depuis 1965, le lac Orford devrait actuellement présenter une concentration d'équilibre en chlorures. Le tableau 12 montre les concentrations en chlorures observées au lac Orford depuis 1974.

Les valeurs des concentrations de chlorures observées au lac Orford depuis 1974, nous indiquent qu'il y a qu'une faible variation entre les années 1976 et 1980. En regard du temps de réponse du lac ainsi que le nombre d'années de salage l'on remarque que le lac Orford a atteint une concentrations d'équilibre environ 11 ans après le début du salage de l'autoroute 10. Ceci nous démontre que le temps de réponse calculé pour ce lac correspond assez bien avec le nombre d'années requises pour atteindre une concentration d'équilibre ceci bien entendu, en supposant que le lac est actuellement en équilibre.

Tableau 11 - Temps de réponse des 26 lacs étudiés.

| Lac | Temps de renouvellement (année) | Temps de réponse (année) |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| André | 0,03 | 0,11 · |
| D'Argent | 0,05 | 0,28 * |
| Aux Barges | 0,96 | 4,45 · |
| Beaulac | 1,38 | 6,38 * |
| Brochet | 1,91 | 8,63 * |
| Brome | 0,70 | 3,26 * |
| Désert | 0,03 | 0,21 · |
| -2e Lac du Chafaud aux Basques | 11,33 | 26,92 · |
| Dufour | 0,49 | 2,27 · |
| Dufresnes | 2,58 | 12,00 * |
| Duhamel | 2,87 | 15,34 * |
| Ennis | 0,13 | 0,60 · |
| Ludger | 0,35 | 1,62 * |
| Magog | 0,06 | 0,30 * |
| Méduse | 0,06 | 0,27 · |
| Millette | 1,46 | 6,77 · |
| Orford | 2,29 | 10,74 * |
| Pauzé | 0,27 | 1,25 * |
| A Pitre | 0,73 | 3,35 · |
| Du Portage | 0,17 | 0,77 · |
| Robert | 0,10 | 0,44 · |
| Roxton Pond | 0,55 | 2,57 * |
| St-Denis | 1,00 | 4,63 * |
| St-Louis | 0,44 | 2,03 * |
| Ste-Marie | 1,23 | 5,69 · |
| A la Truite | 2,06 | 9,81 * |

· Erreur relative sur t_0 et t de \pm 50%

* Erreur relative sur t_0 et t de \pm 20%

- Valeur rejetée car elle a été sur-estimée

Tableau 12 - Concentrations de chlorures observées au lac Orford depuis 1974.

| Date | Concentration de chlorures (mg/l) | |
|----------|-----------------------------------|------|
| | Surface | Fond |
| 74-05-07 | 40 | 39 |
| 74-08-21 | 48 | 36 |
| 74-11-05 | 44 | 44 |
| 75-05-13 | 38 | 38 |
| 75-08-18 | 58 | 58 |
| 75-11-04 | 46 | 48 |
| 76-04-28 | 56 | 52 |
| 76-08-10 | 48 | 48 |
| 79-08-09 | 44 | 44 |
| 80-08-12 | 46 | 46 |

Le temps de réponse des lacs étudiés étant inférieur au nombre d'années écoulées entre le début de salage des routes et l'échantillonnage des lacs ainsi que la faible différence entre les concentrations calculées et les concentrations mesurées en chlorures, nous permettent de croire que les lacs étudiés sont à l'équilibre.

CONCLUSION

A la lumière des résultats obtenus l'on peut conclure:

- qu'il n'y a pas d'augmentation des cations et des ions majeurs autres que les chlorures et le sodium dans les lacs situés en bordure des routes sur lesquelles l'on répand des sels de déglacage;
 - que dans les lacs échantillonnés en 1980, aucun ne présente une stratification des chlorures;
 - que la faible différence observée entre les concentrations en chlorures calculées et mesurées ainsi que les valeurs du temps de réponse des lacs, permettent de croire que les lacs étudiés sont à l'équilibre;
 - que le modèle de calcul de la concentration d'équilibre permet de prédire la concentration maximale en chlorures qu'un lac atteindra pour une quantité annuelle donnée de sel épandue sur la route;
 - que les résultats du calcul de la concentration d'équilibre montrent que le pourcentage de sel épandu sur la route qui parvient au lac, se rapproche de 100%;
 - que lorsque le temps de réponse d'un lac est inférieur ou égal aux années de salage de la route s'y drainant, l'on peut s'attendre à ce que le lac présente une concentration d'équilibre en chlorures.
-

RECOMMANDATIONS

L'on recommande:

- que le modèle de calcul de la concentration d'équilibre soit utilisé dans toutes les études d'impacts de nouveaux projets routiers afin de choisir le tracé de moindre impact sur la qualité de l'eau des lacs;
 - d'utiliser le modèle pour fin d'investigation en cas de plaintes issues de diverses municipalités concernant la qualité de l'eau des lacs servant à l'approvisionnement en eau potable;
 - d'appliquer le modèle à tous les lacs situés en bordure des routes, de manière à identifier les lacs dont leurs eaux pourraient être altérées de façon significative.
-

BIBLIOGRAPHIE

- A.P.H.A., A.W.W.A. & W.P.C.F., 1971. Standard methods for the examination of water and wastewater, 13th edition. American Public Health Association, Washington, D.C. 874 p.
- Bobée, B., D. Cluis, M. Goulet, M. Lachance, L. Potvin et A. Tessier, 1977. Evaluation du réseau de qualité des eaux (M.R.N.). Analyse et interprétation des données de la période 1967-75. Tome III. Une étude réalisée pour le compte du Ministère des Richesses naturelles du Québec. INRS-EAU, UQAM. Polycopié. 208 p.
- Dillon P.J. et F.H. Rigler, 1975. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status, J. Fish, Res. Board Can. 32: 1519-1531
- Federal Highway Administration, 1977. Economic impact of highway snow and ice control. Final report, Washington, D.C., 118 p.
- Kunkle, S.H., 1971. Effects of road salts on a Vermont stream, State University College of Forestry at Syracuse University, Syracuse. N.Y.
- Legendre P., A. Chodorowski, W. Chodorowska, P. Pichet et P. Potvin, 1980. Qualité des eaux. Interprétation des données lacustres (1971-1977). Ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, 409 p.
- Metcalf et Eddy, 1972. Wastewater Engineering: Collection, Treatment, Disposal. Series in Water Resources and Environmental Engineering. Mc Graw-Hill, New-York, U.S.A., 782 p.
- Nie, N.H., C. Hadlay Hull, J.G. Jenkins, K. Steinbrenner, D.H. Bent, 1975. Statistical Package for the Social Sciences (SPSS). Second edition. Mc Graw-Hill, New-York. 675 p.
- Villeneuve J.P., F. Guimont et D. Leblanc, 1978. Modèle mathématique pour le calcul de la profondeur moyenne des lacs. INRS-EAU, rapport interne no 63, 28 p.
-

Tableau 1 - Localisation des lacs échantillonnés en 1980

| Nom | Région | Route | Latitude | Longitude |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------|----------|-----------|
| Lac André | St-Zénon | 131 | 46°31' | 73°45' |
| Lac Antoine | St-Aimé des Lacs | Secondaire à la 138 | 47°41' | 70°20' |
| Lac D'argent | Eastman | 112 | 45°19' | 72°19' |
| Lac Baie des Rochers* | Baie des Rochers | 138 | 47°56' | 69°53' |
| Lac aux Barges | Mont-Laurier | 117 | 46°33' | 75°24' |
| Lac Beaulac | Chertsey | 335 | 46°02' | 73°53' |
| Lac Beauport | Beauport | | 46°57' | 71°17' |
| Lac Brochet | Mont-Laurier | 117 | 46°33' | 75°35' |
| Lac Brome | Knowlton | 216 - 243 | 45°15' | 72°30' |
| Lac Clément | Notre-Dame-des-Laurentides | | 46°57' | 71°21' |
| Lac Clouthier* | Lantier | 329 | 46°11' | 74°14' |
| Lac Désert | St-Charles-de-Montcalm | 125 | 46°06' | 73°55' |
| 2ième Lac au Chafaud aux Basques | Baie des Rochers | 138 | 47°59' | 69°49' |
| Lac des deux Truites* | Stoneham | | 46°58' | 71°21' |
| Lac Dufour | Port aux Quilles | 138 | 47°54' | 69°51' |
| Lac Dufresnes | Lantier | 329 | 46°12' | 74°14' |
| Lac Duhamel | St-Jovite | 117 | 46°08' | 74°38' |
| Lac Ennis | Port aux Quilles | 138 | 47°55' | 69°52' |
| Lac Jolicoeur | St-Jovite | 117 | 46°07' | 74°32' |
| Lac Lovering* | Magog | 141 | 45°10' | 72°09' |
| Lac Ludger | Lantier | 329 | 46°08' | 74°15' |
| Lac Magog | Magog | 112-108-216-A-55 | 45°18' | 72°02' |
| Lac Méduse | Ste-Agathe | A-15 | 46°01' | 74°14' |
| Lac Millette | Ste-Adèle | 117 | 45°58' | 74°11' |
| Lac Orford | Magog | A-10-112 | 45°18' | 72°16' |
| Lac Paquin | Ste-Agathe | A-15 | 46°00' | 74°14' |
| Lac Parker* | Eastman | | 45°20' | 82°19' |
| Lac Pauzé | Chertsey | 125 | 46°08' | 73°59' |
| Lac à Pitre | Port aux Quilles | 138 | 47°57' | 69°52' |
| Lac du Portage | Baie des Rochers | 138 | 47°59' | 69°50' |
| Lac Robert | St-Zénon | 131 | 46°31' | 73°45' |
| Lac Roxton Pond | Granby | 139 | 45°28' | 72°40' |
| Lac Saguy | Nominingue | 117 | 46°30' | 75°08' |

Tableau 1 - (Suite)

| Nom | Région | Route | Latitude | Longitude |
|-----------------------|---------------------|-------|----------|-----------|
| Lac St-Augustin | St-Augustin | A-40 | 46° 41' | 71° 23' |
| Lac St-Denis | St-Adolphe d'Howard | 329 | 45° 56' | 74° 19' |
| Lac St-Louis | St-Zénon | 131 | 46° 33' | 73° 48' |
| Lac Ste-Marie | St-Aimé-des-Lacs | 138 | 47° 41' | 70° 17' |
| Lac à la Truite | Ste-Agathe | A-15 | 46° 02' | 74° 15' |
| Lac Vézina | St-Jean-de-Matha | 131 | 46° 15' | 73° 32' |
| Du milieu des Brûlés* | St-Aimé-des-Lacs | | 47° 43' | 70° 22' |

* Lacs Témoins

Tableau 2 - Données physico-chimiques des lacs échantillonnés en 1980 en surface et au fond (valeurs en mg/l).

| Lac | Date d'échantillonnage | Profondeur (m) | T ^o (°C) | pH | Cond. (μ S/cm) | Ca ⁺⁺ (mg/l) | Mg ⁺⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | SO ₄ ⁻⁻ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | Alca (mg/l Ca CO ₃) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|-----|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|---|---------------------------|------------------------------------|---|
| André | 80-07-23 | S | 20,0 | 6,5 | 115 | 5,0 | 1,3 | 0,60 | 13,0 | 6,0 | 27,0 | 7,0 | 7,0 |
| | | 4,0 | 12,0 | 6,0 | 115 | 5,3 | 1,2 | 0,7 | 13,0 | 5,0 | 26,0 | 8,0 | 8,0 |
| Antoine | 80-08-26 | S | 25,0 | 4,0 | 215 | 11,5 | 1,2 | 0,7 | 25,0 | 1,0 | 56,0 | 1,0 | 1,0 |
| D'argent | 80-08-11 | S | 20,0 | 7,2 | 100 | 8,2 | 2,9 | 0,3 | 5,1 | 5,0 | 9,0 | 24,0 | 23,9 |
| | | 15,0 | 9,0 | 6,5 | 105 | 7,5 | 2,8 | 0,4 | 5,5 | 5,0 | 9,0 | 27,0 | 26,6 |
| Aux Barges | 80-07-08 | S | 19,5 | 7,4 | 80 | 9,5 | 1,1 | 0,8 | 3,5 | 4,0 | 6,0 | 17,0 | 16,9 |
| | | 5,0 | 16,0 | 6,8 | 85 | 9,5 | 1,1 | 0,8 | 3,5 | 4,0 | 7,0 | 17,0 | 16,9 |
| Beaulac | 80-07-15 | S | 21,5 | 7,5 | 105 | 9,5 | 1,5 | 0,5 | 6,4 | 3,0 | 13,0 | 20,0 | 19,9 |
| | | 8,0 | 15,0 | 7,1 | 105 | 10,0 | 1,7 | 0,5 | 6,4 | 3,0 | 14,0 | 23,0 | 22,9 |
| Beauport | 80-07-30 | S | 21,5 | 7,2 | 190 | 9,0 | 1,6 | 0,7 | 23,0 | 6,0 | 46,0 | 12,0 | 11,9 |
| | | 13,0 | 13,0 | 6,8 | 200 | 9,6 | 1,6 | 0,7 | 23,0 | 5,0 | 46,0 | 15,0 | 14,9 |
| Brochet | 80-07-07 | S | 21,0 | 7,7 | 135 | 10,5 | 2,4 | 1,7 | 10,0 | 7,0 | 20,0 | 23,0 | 22,8 |
| | | 14,0 | 4,5 | 7,5 | 135 | 10,0 | 2,3 | 1,7 | 9,7 | 7,0 | 20,0 | 23,0 | 22,9 |
| Brome | 80-08-04 | S | 25,5 | 9,0 | 120 | 11,0 | 1,9 | 1,1 | 8,1 | 7,0 | 17,0 | 25,0 | 22,4 |
| | | 11,0 | 18,0 | 6,8 | 120 | 12,0 | 2,0 | 0,8 | 8,3 | 5,0 | 17,0 | 27,0 | 26,9 |
| Clément | 80-07-29 | S | 21,0 | 7,5 | 435 | 21,0 | 2,6 | 1,3 | 56,0 | 7,0 | 100,0 | 38,0 | 37,8 |
| | | 4,0 | 18,0 | 7,0 | 480 | 24,0 | 3,0 | 1,4 | 64,0 | 7,0 | 114,0 | 41,0 | 40,9 |
| Clouthier | 80-06-18 | 1,0 | 15,5 | 5,5 | 160 | 1,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 2,0 | 1,0 | 0,0 | 0,0 |
| Désert | 80-07-16 | S | 22,0 | 6,0 | 115 | 6,0 | 1,0 | 0,4 | 12,0 | 4,0 | 28,0 | 7,0 | 7,0 |
| | | 2,0 | 19,0 | 5,4 | 90 | 5,6 | 0,9 | 0,4 | 9,5 | 2,0 | 20,0 | 7,0 | 7,0 |
| 2ième Lac du Chauffaud aux Basques | 80-09-09 | S | 11,5 | 6,9 | 62 | 4,2 | 0,6 | 0,5 | 5,5 | 1,0 | 7,0 | 10,0 | 9,9 |
| | | 15,0 | 5,0 | 6,7 | 64 | 4,0 | 0,6 | 0,4 | 5,5 | 2,0 | 8,0 | 10,0 | 9,9 |

Tableau 2 - (Suite)

| Lac | Date d'échantillonnage | Profondeur (m) | T° (°C) | pH | Cond. (μ S/cm) | Ca ⁺⁺ (mg/l) | Mg ⁺⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | SO ₄ ⁻⁻ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | Alca (mg/l Ca CO ₃) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) |
|----------------------|---------------------------|-------------------|------------|-----|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|---|---------------------------|------------------------------------|---|
| Des deux Truites | 80-07-29 | S | 21,0 | 7,2 | 38 | 4,5 | 1,0 | 0,4 | 1,1 | 3,0 | 1,0 | 12,0 | 11,9 |
| | | 2,0 | 21,0 | 7,1 | 38 | 4,5 | 1,0 | 0,3 | 1,1 | 3,0 | 1,0 | 12,0 | 11,9 |
| Du milieu des Brûlés | 80-08-26 | S | 24,0 | 6,7 | 36 | 4,2 | 0,8 | 0,1 | 1,2 | 2,0 | 2,0 | 8,0 | 8,0 |
| | | 1,0 | 23,0 | 6,7 | 36 | 4,2 | 0,8 | 0,1 | 1,1 | 3,0 | 1,0 | 8,0 | 8,0 |
| Dufour | 80-09-03 | S | 19,0 | 6,9 | 139 | 7,3 | 0,9 | 0,4 | 15,0 | 2,0 | 32,0 | 14,0 | 13,9 |
| | | 11,0 | 4,5 | 6,5 | 159 | 8,7 | 1,0 | 0,4 | 17,5 | 1,0 | 40,0 | 14,0 | 14,0 |
| Dufresnes | 80-06-16 | S | 15,0 | 8,4 | 67 | 3,2 | 0,6 | 0,3 | 7,2 | 5,0 | 15,0 | 3,0 | 2,9 |
| | | 11,0 | 6,3 | 6,8 | 67 | 3,3 | 0,7 | 0,3 | 7,5 | 5,0 | 15,0 | 3,0 | 3,0 |
| Duhamel | 80-07-01 | S | 20,0 | 7,8 | 220 | 14,0 | 1,5 | 0,8 | 24,0 | 9,0 | 44,0 | 25,0 | 24,3 |
| | | 28,0 | 4,0 | 6,9 | 235 | 14,5 | 1,6 | 1,0 | 28,0 | 8,0 | 48,0 | 26,0 | 25,9 |
| Ennis | 80-09-03 | S | 19,0 | 6,6 | 86 | 6,7 | 0,7 | 0,4 | 7,6 | 1,0 | 14,0 | 16,0 | 15,9 |
| | | 10,0 | 6,0 | 6,4 | 82 | 6,5 | 0,7 | 0,4 | 7,2 | 1,0 | 14,0 | 14,0 | 14,0 |
| Jolicoeur | 80-07-01 | S | 23,0 | 9,4 | 140 | 15,5 | 1,2 | 0,6 | 7,6 | 5,0 | 18,0 | 34,0 | 26,5 |
| | | 1,0 | 22,0 | 9,4 | 140 | 16,0 | 1,2 | 0,6 | 7,6 | 4,0 | 18,0 | 33,0 | 25,7 |
| Lovering | 80-08-18 | S | 21,0 | 7,0 | 62 | 4,6 | 3,6 | 0,7 | 1,4 | 8,0 | 2,0 | 20,0 | 19,9 |
| | | 21,0 | 9,5 | 6,6 | 62 | 4,6 | 3,6 | 0,6 | 1,3 | 5,0 | 2,0 | 22,0 | 21,9 |
| Ludger | 80-06-18 | S | 16,5 | 6,8 | 52 | 3,6 | 0,9 | 0,3 | 4,0 | 5,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 |
| | | 13,0 | 7,0 | 6,1 | 57 | 4,0 | 0,9 | 0,3 | 4,6 | 5,0 | 9,0 | 7,0 | 7,0 |
| Magog | 80-08-10 | S | 22,0 | 8,6 | 144 | 15,5 | 3,2 | 1,3 | 9,0 | 9,0 | 10,0 | 50,0 | 47,8 |
| | | 14,0 | 13,0 | 7,3 | 144 | 16,5 | 3,2 | 1,3 | 7,8 | 6,0 | 9,0 | 50,0 | 49,8 |
| Méduse | 80-06-11 | 1,0 | 12,0 | 8,2 | 365 | 18,0 | 3,8 | 0,7 | 39,0 | 8,0 | 92,0 | 18,0 | 17,6 |
| Millette | 80-07-02 | S | - | 7,8 | 290 | 12,5 | 2,6 | 0,8 | 37,0 | 9,0 | 67,0 | 18,0 | 17,8 |
| | | 4,0 | - | 7,7 | 290 | 12,5 | 2,6 | 0,8 | 37,0 | 9,0 | 70,0 | 18,0 | 17,9 |

Tableau 2 - (Suite)

| Lac | Date d'échantillonnage | Profondeur (m) | T ^o (°C) | pH | Cond. (μ S/cm) | Ca ⁺⁺ (mg/l) | Mg ⁺⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | SO ₄ ⁻⁻ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | Alca (mg/l Ca CO ₃) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) |
|-------------|---------------------------|-------------------|------------------------|-----|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|---|---------------------------|------------------------------------|---|
| Orford | 80-08-11 | S | 20,5 | 8,1 | 235 | 8,1 | 4,9 | 0,4 | 25,0 | 8,0 | 46,0 | 27,0 | 26,6 |
| | | 30,0 | 4,0 | 7,3 | 230 | 8,0 | 4,9 | 0,3 | 25,0 | 8,0 | 46,0 | 25,0 | 24,9 |
| Paquin | 80-06-12 | S | 13,5 | 7,2 | 140 | 6,2 | 1,1 | 0,4 | 17,0 | 5,0 | 28,0 | 7,0 | 6,9 |
| | | 19,0 | 4,0 | 7,5 | 185 | 8,2 | 1,4 | 0,4 | 23,0 | 5,0 | 42,0 | 6,0 | 5,9 |
| Parker | 80-08-04 | S | 23,0 | 6,5 | 60 | 8,5 | 2,1 | 0,3 | 0,8 | 5,0 | 2,0 | 18,0 | 17,9 |
| | | 8,0 | 9,0 | 6,5 | 70 | 8,5 | 2,1 | 0,5 | 0,8 | 3,0 | 2,0 | 27,0 | 26,9 |
| Pauzé | 80-07-14 | S | 22,0 | 7,2 | 150 | 8,0 | 1,6 | 0,4 | 14,0 | 7,0 | 31,0 | 13,0 | 12,9 |
| | | 15,0 | 4,0 | 6,6 | 215 | 11,5 | 2,6 | 0,5 | 22,0 | 5,0 | 47,0 | 21,0 | 20,9 |
| A Pitre | 80-09-10 | S | 15,5 | 7,6 | 194 | 9,7 | 1,2 | 0,6 | 26,0 | 1,0 | 38,0 | 24,0 | 23,8 |
| | | 5,0 | 14,5 | 7,3 | 205 | 10,0 | 1,2 | 0,6 | 26,0 | 1,0 | 40,0 | 24,0 | 23,9 |
| Du Portage | 80-09-29 | S | 17,0 | 7,2 | 146 | 6,0 | 1,0 | 0,6 | 18,0 | 2,0 | 34,0 | 12,0 | 11,9 |
| | | 6,0 | 13,5 | 7,1 | 148 | 6,0 | 1,0 | 0,6 | 18,0 | 2,0 | 34,0 | 12,0 | 11,9 |
| Robert | 80-07-23 | S | 20,0 | 6,7 | 130 | 5,1 | 1,3 | 0,7 | 15,5 | 4,0 | 30,0 | 7,0 | 7,0 |
| | | 2,0 | 17,5 | 6,2 | 130 | 5,2 | 1,3 | 0,7 | 15,0 | 1,0 | 30,0 | 7,0 | 7,0 |
| Roxton Pond | 80-08-06 | S | 22,5 | 7,6 | 90 | 11,5 | 1,9 | 1,2 | 3,2 | 7,0 | 5,0 | 25,0 | 24,9 |
| | | 5,0 | 21,5 | 7,2 | 90 | 11,0 | 1,9 | 1,3 | 3,2 | 7,0 | 5,0 | 26,0 | 25,9 |
| Saguay | 80-07-08 | S | 18,0 | 7,0 | 65 | 5,0 | 0,7 | 0,6 | 5,0 | 3,0 | 10,0 | 6,0 | 5,9 |
| | | 10,0 | 6,5 | 6,6 | 65 | 5,0 | 0,7 | 0,6 | 4,6 | 3,0 | 8,0 | 6,0 | 6,0 |
| St-Augustin | 80-07-28 | S | 22,0 | 8,6 | 430 | 35,0 | 6,5 | 2,8 | 41,0 | 36,0 | 56,0 | 92,0 | 88,0 |
| | | 5,0 | 19,5 | 7,7 | 430 | 34,0 | 6,4 | 2,5 | 40,0 | 35,0 | 56,0 | 93,0 | 92,4 |
| St-Denis | 80-07-02 | S | 19,0 | 7,4 | 120 | 6,0 | 0,8 | 0,4 | 15,0 | 6,0 | 26,0 | 8,0 | 7,9 |
| | | 15,0 | 4,0 | 7,1 | 130 | 6,0 | 0,9 | 0,4 | 16,5 | 7,0 | 28,0 | 8,0 | 7,9 |
| St-Louis | 80-07-22 | S | 21,0 | 6,7 | 85 | 5,3 | 1,0 | 0,5 | 8,1 | 6,0 | 16,0 | 7,0 | 7,0 |
| | | 13,0 | 11,0 | 6,3 | 90 | 5,5 | 1,0 | 0,5 | 7,4 | 6,0 | 14,0 | 8,0 | 8,0 |

Tableau 2 - (Suite)

| Lac | Date d'échantillonnage | Profondeur (m) | T ^o (°C) | pH | Cond. (µS/cm) | Ca ⁺⁺ (mg/l) | Mg ⁺⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | SO ₄ ⁻⁻ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | Alca (mg/l Ca CO ₃) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) |
|------------------|------------------------|----------------|---------------------|-----|---------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Ste-Marie | 80-08-27 | S | 22,0 | 8,1 | 200 | 19,0 | 1,8 | 0,7 | 16,0 | 4,0 | 30,0 | 42,0 | 41,4 |
| | | 2,0 | 22,0 | 8,1 | 200 | 19,0 | 1,8 | 0,7 | 16,0 | 4,0 | 30,0 | 41,0 | 40,4 |
| A la Truite | 80-06-09 | S | 13,0 | 7,3 | 385 | 20,0 | 4,2 | 0,7 | 41,0 | 8,0 | 100,0 | 18,0 | 17,9 |
| | | 19,0 | 4,5 | 6,9 | 385 | 20,0 | 4,2 | 0,8 | 42,0 | 8,0 | 100,0 | 18,0 | 17,9 |
| Vézina | 80-07-23 | S | 22,0 | 6,6 | 45 | 3,6 | 0,6 | 0,9 | 2,6 | 2,0 | 5,0 | 7,0 | 7,0 |
| | | 14,0 | 4,5 | 6,1 | 45 | 3,7 | 0,6 | 0,8 | 2,6 | 2,0 | 5,0 | 7,0 | 7,0 |
| Baie des Rochers | 80-09-04 | S | 18,5 | 7,3 | 42 | 5,9 | 0,5 | 0,3 | 0,9 | 2,0 | 1,0 | 14,0 | 13,9 |
| | | 21,0 | 6,5 | 6,7 | 42 | 5,9 | 0,5 | 0,3 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 14,0 | 13,9 |

Tableau 3 - Données physico-chimiques des lacs échantillonnés en 1980 en surface et au fond (valeurs en meq/l)

| Lac | Profondeur (m) | Ca ⁺⁺ (meq/l) | Mg ⁺⁺ (meq/l) | K ⁺ (meq/l) | Na ⁺ (meq/l) | SO ₄ ⁻⁻ (meq/l) | Cl ⁻ (meq/l) | HCO ₃ ⁻ (meq/l) | cations (meq/l) | anions (meq/l) | Cond. calc. (μ S/cm) |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|--------------------|-------------------|------------------------------|
| André | S | 0,24 | 0,10 | 0,01 | 0,56 | 0,12 | 0,76 | 0,71 | 0,93 | 1,00 | 303,96 |
| | 4,0 | 0,26 | 0,09 | 0,01 | 0,56 | 0,10 | 0,73 | 0,13 | 0,94 | 0,96 | 310,43 |
| Antoine | S | 0,57 | 0,09 | 0,01 | 1,08 | 0,02 | 1,57 | 0,01 | 1,77 | 1,61 | 218,86 |
| D'argent | S | 0,40 | 0,23 | 0,01 | 0,22 | 0,10 | 0,25 | 0,35 | 0,87 | 0,71 | 92,62 |
| | 15,0 | 0,37 | 0,23 | 0,01 | 0,23 | 0,10 | 0,25 | 0,39 | 0,85 | 0,75 | 92,65 |
| Aux Barges | S | 0,47 | 0,09 | 0,02 | 0,15 | 0,08 | 0,16 | 0,27 | 0,73 | 0,53 | 74,29 |
| | 5,0 | 0,47 | 0,09 | 0,02 | 0,15 | 0,08 | 0,19 | 0,27 | 0,73 | 0,55 | 76,47 |
| Beaulac | S | 0,47 | 0,12 | 0,01 | 0,27 | 0,06 | 0,36 | 0,32 | 0,88 | 0,75 | 97,43 |
| | 8,0 | 0,49 | 0,13 | 0,01 | 0,27 | 0,06 | 0,39 | 0,37 | 0,93 | 0,83 | 104,16 |
| Beauport | S | 0,44 | 0,13 | 0,01 | 1,00 | 0,12 | 1,29 | 0,19 | 1,59 | 1,61 | 203,59 |
| | 13,0 | 0,47 | 0,13 | 0,01 | 1,00 | 0,10 | 1,29 | 0,24 | 1,62 | 1,64 | 205,91 |
| Brochet | S | 0,52 | 0,19 | 0,04 | 0,43 | 0,14 | 0,56 | 0,37 | 1,19 | 1,08 | 138,41 |
| | 14,0 | 0,49 | 0,18 | 0,04 | 0,42 | 0,14 | 0,56 | 0,37 | 1,15 | 1,08 | 135,86 |
| Brome | S | 0,54 | 0,15 | 0,02 | 0,35 | 0,14 | 0,47 | 0,36 | 1,08 | 0,99 | 125,66 |
| | 11,0 | 0,59 | 0,16 | 0,02 | 0,36 | 0,14 | 0,47 | 0,44 | 1,14 | 1,02 | 128,90 |
| Clément | S | 1,04 | 0,21 | 0,03 | 2,43 | 0,14 | 2,82 | 0,62 | 3,73 | 3,58 | 454,43 |
| | 4,0 | 1,19 | 0,24 | 0,03 | 2,78 | 0,14 | 3,21 | 0,67 | 4,26 | 4,03 | 515,33 |
| Clouthier | 1,0 | 0,05 | 0,02 | 0,005 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | - | 0,10 | 0,06 | 11,41 |
| Désert | S | 0,29 | 0,08 | 0,01 | 0,52 | 0,08 | 0,78 | 0,11 | 0,91 | 0,98 | 121,49 |
| | 2,0 | 0,27 | 0,07 | 0,01 | 0,41 | 0,04 | 0,56 | 0,11 | 0,77 | 0,72 | 93,80 |
| 2ième Lac du Chaufaud aux Basques | S | 0,20 | 0,04 | 0,01 | 0,23 | 0,02 | 0,19 | 0,16 | 0,51 | 0,38 | 52,23 |
| | 15,0 | 0,19 | 0,04 | 0,01 | 0,23 | 0,04 | 0,22 | 0,16 | 0,49 | 0,43 | 55,27 |

Tableau 3 - (Suite)

| Lac | Profondeur (m) | Ca ⁺⁺ (meq/l) | Mg ⁺⁺ (meq/l) | K ⁺ (meq/l) | Na ⁺ (meq/l) | SO ₄ ⁻⁻ (meq/l) | Cl ⁻ (meq/l) | HCO ₃ ⁻ (meq/l) | cations (meq/l) | anions (meq/l) | Cond. calc. (MS/cm) |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|--------------------|-------------------|------------------------|
| Des deux Truites | S | 0,22 | 0,08 | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | 0,19 | 0,36 | 0,28 | 36,85 |
| | 2,0 | 0,22 | 0,08 | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | 0,19 | 0,36 | 0,28 | 36,66 |
| Du milieu des Brûlés | S | 0,20 | 0,06 | 0,002 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,13 | 0,33 | 0,22 | 32,31 |
| | 1,0 | 0,20 | 0,06 | 0,002 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,13 | 0,33 | 0,22 | 32,31 |
| Dufour | S | 0,36 | 0,07 | 0,01 | 0,65 | 0,04 | 0,90 | 0,22 | 1,10 | 1,17 | 141,92 |
| | 11,0 | 0,43 | 0,08 | 0,01 | 0,76 | 0,02 | 1,12 | 0,22 | 1,28 | 1,37 | 167,59 |
| Dufresnes | S | 0,15 | 0,04 | 0,01 | 0,31 | 0,10 | 0,42 | 0,11 | 0,52 | 0,57 | 71,35 |
| | 11,0 | 0,16 | 0,05 | 0,01 | 0,32 | 0,10 | 0,42 | 0,11 | 0,-5 | 0,57 | 72,81 |
| Duhamel | S | 0,69 | 0,12 | 0,02 | 1,04 | 0,18 | 1,24 | 0,40 | 1,88 | 1,83 | 230,54 |
| | 28,0 | 0,72 | 0,13 | 0,02 | 1,13 | 0,16 | 1,35 | 0,42 | 2,01 | 1,94 | 245,03 |
| Ennis | S | 0,33 | 0,05 | 0,01 | 0,33 | 0,02 | 0,39 | 0,26 | 0,73 | 0,67 | 84,00 |
| | 10,0 | 0,32 | 0,05 | 0,01 | 0,31 | 0,02 | 0,39 | 0,22 | 0,70 | 0,64 | 81,07 |
| Jolicoeur | S | 0,77 | 0,09 | 0,01 | 0,33 | 0,10 | 0,50 | 0,43 | 1,21 | 1,04 | 135,74 |
| | 1,0 | 0,79 | 0,09 | 0,01 | 0,33 | 0,08 | 0,50 | 0,37 | 1,24 | 1,01 | 134,99 |
| Lovering | S | 0,22 | 0,29 | 0,01 | 0,06 | 0,16 | 0,05 | 0,32 | 0,60 | 0,55 | 66,02 |
| | 21,0 | 0,22 | 0,29 | 0,01 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,36 | 0,59 | 0,52 | 62,07 |
| Ludger | S | 0,17 | 0,07 | 0,01 | 0,17 | 0,10 | 0,19 | 0,11 | 0,43 | 0,41 | 52,55 |
| | 13,0 | 0,19 | 0,07 | 0,01 | 0,20 | 0,10 | 0,25 | 0,11 | 0,48 | 0,47 | 59,37 |
| Magog | S | 0,77 | 0,26 | 0,03 | 0,29 | 0,18 | 0,28 | 0,78 | 1,46 | 1,25 | 153,91 |
| | 14,0 | 0,82 | 0,26 | 0,03 | 0,33 | 0,12 | 0,25 | 0,81 | 1,45 | 1,19 | 148,56 |
| Méduse | 1,0 | 0,89 | 0,31 | 0,01 | 1,69 | 0,16 | 2,59 | 0,28 | 2,92 | 3,05 | 381,75 |
| Millette | S | 0,62 | 0,21 | 0,02 | 1,60 | 0,18 | 1,89 | 0,29 | 2,46 | 2,37 | 303,96 |
| | 4,0 | 0,62 | 0,21 | 0,02 | 1,60 | 0,18 | 1,97 | 0,29 | 2,46 | 2,45 | 310,43 |

Tableau 3 - (Suite)

| Lac | Profondeur (m) | Ca ⁺⁺ (meq/l) | Mg ⁺⁺ (meq/l) | K ⁺ (meq/l) | Na ⁺ (meq/l) | SO ₄ ⁻⁻ (meq/l) | Cl ⁻ (meq/l) | HCO ₃ ⁻ (meq/l) | cations (meq/l) | anions (meq/l) | Cond. calc. (MS/cm) |
|-------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|--------------------|-------------------|------------------------|
| Orford | S | 0,40 | 0,40 | 0,01 | 1,08 | 0,16 | 1,29 | 0,43 | 1,90 | 1,90 | 233,15 |
| | 30,0 | 0,39 | 0,40 | 0,01 | 1,08 | 0,16 | 1,29 | 0,40 | 1,89 | 1,87 | 231,44 |
| Paquin | S | 0,30 | 0,09 | 0,01 | 0,73 | 0,10 | 0,78 | 0,11 | 1,14 | 1,00 | 135,23 |
| | 19,0 | 0,40 | 0,11 | 0,01 | 1,00 | 0,10 | 1,18 | 0,09 | 1,53 | 1,38 | 185,12 |
| Parker | S | 0,42 | 0,17 | 0,01 | 0,03 | 0,10 | 0,05 | 0,29 | 0,63 | 0,45 | 62,58 |
| | 8,0 | 0,42 | 0,17 | 0,01 | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 0,44 | 0,64 | 0,56 | 66,19 |
| Pauzé | S | 0,39 | 0,13 | 0,01 | 0,60 | 0,14 | 0,87 | 0,21 | 1,15 | 1,23 | 150,31 |
| | 15,0 | 0,57 | 0,21 | 0,01 | 0,95 | 0,10 | 1,32 | 0,34 | 1,75 | 1,77 | 219,86 |
| A Pitre | S | 0,48 | 0,09 | 0,01 | 1,13 | 0,02 | 1,07 | 0,39 | 1,72 | 1,48 | 193,58 |
| | 15,0 | 0,49 | 0,09 | 0,01 | 1,13 | 0,02 | 1,12 | 0,39 | 1,74 | 1,54 | 198,76 |
| Du Portage | S | 0,29 | 0,08 | 0,01 | 0,78 | 0,04 | 0,95 | 0,19 | 1,18 | 1,19 | 148,32 |
| | 6,0 | 0,29 | 0,08 | 0,01 | 0,78 | 0,04 | 0,95 | 0,19 | 1,18 | 1,19 | 148,33 |
| Robert | S | 0,25 | 0,10 | 0,01 | 0,67 | 0,08 | 0,84 | 0,11 | 1,05 | 1,04 | 132,71 |
| | 2,0 | 0,25 | 0,10 | 0,01 | 0,65 | 0,02 | 0,84 | 0,11 | 1,03 | 0,98 | 126,90 |
| Roxton Pond | S | 0,57 | 0,15 | 0,03 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,40 | 0,90 | 0,69 | 92,47 |
| | 5,0 | 0,54 | 0,15 | 0,03 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,42 | 0,87 | 0,71 | 91,95 |
| Saguay | S | 0,24 | 0,05 | 0,01 | 0,21 | 0,06 | 0,28 | 0,09 | 0,53 | 0,44 | 61,01 |
| | 10,0 | 0,24 | 0,05 | 0,01 | 0,20 | 0,06 | 0,22 | 0,09 | 0,52 | 0,38 | 55,83 |
| St-Augustin | S | 1,74 | 0,53 | 0,07 | 1,78 | 0,74 | 1,57 | 1,44 | 4,13 | 3,77 | 473,25 |
| | 5,0 | 1,69 | 0,52 | 0,06 | 1,74 | 0,72 | 1,57 | 1,51 | 4,02 | 3,82 | 468,62 |
| St-Denis | S | 0,29 | 0,06 | 0,01 | 0,65 | 0,12 | 0,73 | 0,13 | 1,10 | 1,06 | 127,01 |
| | 15,0 | 0,29 | 0,07 | 0,01 | 0,71 | 0,14 | 0,78 | 0,13 | 1,02 | 0,98 | 136,73 |

Tableau 3 - (Suite)

| Lac | Profondeur (m) | Ca ⁺⁺ (meq/l) | Mg ⁺⁺ (meq/l) | K ⁺ (meq/l) | Na ⁺ (meq/l) | SO ₄ ⁻⁻ (meq/l) | Cl ⁻ (meq/l) | HCO ₃ ⁻ (meq/l) | cations (meq/l) | anions (meq/l) | Cond. calc. (μ S/cm) |
|------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|--------------------|-------------------|------------------------------|
| St-Louis | S | 0,26 | 0,08 | 0,01 | 0,35 | 0,12 | 0,45 | 0,11 | 0,71 | 0,69 | 88,51 |
| | 13,0 | 0,27 | 0,08 | 0,01 | 0,32 | 0,12 | 0,39 | 0,13 | 0,69 | 0,65 | 83,99 |
| Ste-Marie | S | 0,94 | 0,14 | 0,01 | 0,69 | 0,08 | 0,84 | 0,67 | 1,81 | 1,60 | 202,54 |
| | 2,0 | 0,94 | 0,14 | 0,01 | 0,69 | 0,08 | 0,84 | 1,66 | 1,81 | 1,59 | 201,82 |
| A la Truite | S | 0,99 | 0,34 | 0,01 | 1,78 | 0,16 | 2,82 | 0,29 | 3,14 | 3,28 | 411,27 |
| | 19,0 | 0,99 | 0,34 | 0,02 | 1,82 | 0,16 | 2,82 | 0,29 | 3,19 | 3,28 | 413,68 |
| Vézina | S | 0,17 | 0,04 | 0,02 | 0,11 | 0,04 | 0,14 | 0,11 | 0,36 | 0,29 | 39,97 |
| | 14,0 | 0,18 | 0,04 | 0,02 | 0,11 | 0,04 | 0,14 | 0,11 | 0,36 | 0,29 | 40,09 |
| Baie des Rochers | S | 0,29 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,22 | 0,38 | 0,29 | 38,00 |
| | 21,0 | 0,29 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,22 | 0,38 | 0,27 | 36,34 |

Tableau 5 - Valeurs du déséquilibre ionique (DI) et de l'écart de conductivité (EC)

| Lac | Profondeur (m) | DI (%) | EC (%) |
|-------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|
| André | S | 4,0 | 7,47 |
| | 4,0 | 2,0 | 5,35 |
| Antoine | S | 6,0 | 1,8 |
| D'argent | S | 14,0 | 7,3 |
| | 15,0 | 9,0 | 11,7 |
| Aux Barges | S | 23,0 | 7,1 |
| | 5,0 | 19,0 | 10,0 |
| Beaulac | S | 11,0 | 7,2 |
| | 8,0 | 7,0 | 0,8 |
| Beauport | S | 1,0 | 7,15 |
| | 13,0 | 1,0 | 2,95 |
| Brochet | S | 7,0 | 2,53 |
| | 1,0 | 4,0 | 0,64 |
| Brome | S | 6,0 | 4,72 |
| | 11,0 | 7,0 | 7,42 |
| Clément | S | 3,0 | 4,47 |
| | 4,0 | 4,0 | 7,36 |
| Désert | S | 5,0 | 5,64 |
| | 2,0 | 5,0 | 4,22 |
| 2e Lac du Chafaud aux Basques | S | 20,0 | 15,75 |
| | 15,0 | 10,0 | 13,64 |
| Des deux truites | S | 17,0 | 3,03 |
| | 2,0 | 16,0 | 3,52 |
| Du milieu des Brûlés | S | 26,0 | 10,24 |
| | 1,0 | 27,0 | 10,24 |
| Dufour | S | 4,0 | 2,10 |
| | 11,0 | 4,0 | 5,40 |
| Dufresne | S | 5,0 | 6,50 |
| | 11,0 | 2,0 | 8,67 |

Tableau 5 - (Suite)

| Lac | Profondeur (m) | DI (%) | EC (%) |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|
| Duhamel | S | 2,0 | 4,79 |
| | 28,0 | 2,0 | 4,27 |
| Ennis | S | 5,0 | 2,32 |
| | 10,0 | 6,0 | 1,14 |
| Jolicoeur | S | 10,0 | 3,05 |
| | 1,0 | 14,0 | 3,58 |
| Lovering | S | 6,0 | 6,49 |
| | 21,0 | 9,0 | 0,12 |
| Ludger | S | 3,0 | 1,06 |
| | 13,0 | 1,0 | 4,17 |
| Magog | S | 10,0 | 6,88 |
| | 14,0 | 14,0 | 3,17 |
| Méduse | 1,0 | 3,0 | 4,59 |
| Millette | S | 3,0 | 4,81 |
| | 4,0 | 0,0 | 7,04 |
| Orford | S | 0,0 | 0,63 |
| | 30,0 | 1,0 | 0,79 |
| Paquin | S | 9,0 | 3,40 |
| | 19,0 | 7,0 | 0,07 |
| Parker | S | 24,0 | 4,30 |
| | 8,0 | 9,0 | 5,45 |
| Pauzé | S | 5,0 | 0,20 |
| | 15,0 | 1,0 | 2,26 |
| A Pitre | S | 10,0 | 0,24 |
| | 5,0 | 8,0 | 3,04 |
| Du Portage | S | 1,0 | 1,59 |
| | 6,0 | 1,0 | 0,22 |
| Robert | S | 1,0 | 2,09 |
| | 2,0 | 4,0 | 2,39 |
| Roxton Pond | S | 18,0 | 2,75 |
| | 5,0 | 14,0 | 2,16 |

Tableau 5 - (Suite)

| Lac | Profondeur (m) | DI (%) | EC (%) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------|
| Saguay | S | 14,0 | 6,14 |
| | 10,0 | 21,0 | 14,11 |
| St-Augustin | S | 6,0 | 10,06 |
| | 5,0 | 3,0 | 8,98 |
| St-Denis | S | 3,0 | 5,84 |
| | 15,0 | 2,0 | 5,18 |
| St-Louis | S | 2,0 | 4,13 |
| | 13,0 | 4,0 | 6,67 |
| Ste-Marie | S | 8,0 | 1,27 |
| | 2,0 | 9,0 | 0,91 |
| A la Truite | S | 3,0 | 6,82 |
| | 19,0 | 2,0 | 7,45 |
| Vézina | S | 14,0 | 11,17 |
| | 14,0 | 15,0 | 10,92 |
| Baie des Rochers | S | 17,0 | 9,53 |
| | 21,0 | 22,0 | 13,47 |

INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSE D'EAU

L'examen des données brutes (valeurs en mg/l) montre qu'il n'y a pas d'augmentation significative de la concentration en calcium (Ca^{++}), magnésium (Mg^{++}), potassium (K^+), sodium (Na^+) et chlorures (Cl^-) avec une augmentation de la profondeur pour l'ensemble des lacs étudiés. On remarque aussi une augmentation de la conductivité correspondant à une augmentation de la concentration en chlorures et en sodium.

Les coefficients de corrélation de Pearson obtenus (tableau 6) entre le calcium, le sodium, le magnésium, le potassium, les chlorures et la conductivité montrent que l'augmentation de la teneur en chlorures et en sodium influence le plus l'augmentation de la conductivité. En effet, des coefficients de 0,93 et 0,96 pour les chlorures et le sodium nous montrent qu'il existe une relation presque linéaire entre la conductivité et ces deux paramètres. On remarque aussi que le calcium influence de façon significative la conductivité ($r = 0,84$). L'examen des figures 4 à 7 illustrent bien ce phénomène. En effectuant une régression multiple, nous avons évalué que 99% de la variabilité de la conductivité est expliquée par le sodium et le calcium, le sodium expliquant à lui seul 93%.

Les coefficients de corrélation de Pearson obtenus entre les chlorures et les autres ions (Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} , K^+ , SO_4^{--} , HCO_3^-) montrent que le sodium est l'ion qui est le plus relié au chlorures ($r = 0,97$), les autres ions ayant une relation faible (r variant de 0,33 à 0,63). L'examen du graphique de la concentration de chlorures en fonction de la concentration de sodium (figure 8) permet de mettre en évidence l'augmentation presque linéaire des chlorures et du sodium. La droite d'estimation obtenue montre que les chlorures et le sodium ont une abondance presque identique dans l'eau, la pente de la droite étant de 1,21. C'est donc dire, que les chlorures et le sodium en provenance de la route, parviennent au lac en quantité presque équivalente.

En l'absence d'infiltration de chlorures de sodium, les rapports moyens entre les concentrations (mg/l) de sodium et calcium, de magnésium et calcium, de potassium et calcium sont les suivants:

$$\text{Na}^+/\text{Ca}^{++} = 0,20$$

$$\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++} = 0,20$$

$$\text{K}^+/\text{Ca}^{++} = 0,13$$

Dans une étude sur la qualité de l'eau de 251 lacs du Québec, Legendre et al (1979) ont remarqué qu'il y avait une augmentation du rapport $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$ lorsqu'il y a infiltration de chlorures de sodium.

Ils ont remarqué que, lorsque le rapport $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$ était supérieur à 0,55, il y avait une concentration importante en chlorures dans les lacs.

Dans notre cas, l'on remarque que pour 31 des 40 lacs étudiés où il y a une concentration élevée en chlorures, le rapport varie de 0,62 à 3,04. Pour les 6 lacs témoins étudiés, le rapport varie de 0,09 à 0,30. (tableau 7). On constate que 3 lacs seulement, où il y a une infiltration des chlorures, présentent un rapport inférieur à 0,55.

En ce qui concerne les rapports Mg^{++}/Ca^{++} et K^+/Ca^{++} , nous n'observons pas d'augmentation ou de diminution significative (tableau 7) pour les lacs où il y a une concentration élevée en chlorures.

L'examen des coefficients de corrélation obtenus entre les chlorures et le rapport Na^+/Ca^{++} ($r = 0,66$) et entre le sodium et le rapport Na^+/Ca^{++} ($r = 0,67$) montre qu'il n'y a pas de relation linéaire des chlorures et du sodium avec ce rapport. Les figures 9 et 10 nous permettent de constater que les lacs dont le rapport est plus grand que 0,55 ont une concentration en chlorures dans la majorité des cas, supérieure à 10 mg/l. L'absence d'une relation linéaire de l'augmentation de la concentration en chlorures et en sodium avec l'augmentation du rapport Na^+/Ca^{++} peut s'expliquer par la variation de la concentration naturelle en calcium des lacs.

Les valeurs des coefficients de corrélation de Pearson obtenus entre les différents ions ainsi que les valeurs des rapports Na^+/Ca^{++} , Mg^{++}/Ca^{++} , K^+/Ca^{++} , démontrent que l'épandage de chlorures de sodium ($NaCl$) sur les routes situées en bordure des lacs ne semble pas entraîner d'augmentation de la concentration des cations et des anions autres que les chlorures et le sodium dans les lacs.

Tableau 6 - Coefficients de corrélation de Pearson obtenus entre les différents paramètres étudiés et significatifs à $p \leq 0,01$ (Concentration des ions exprimée en meq/l)

| | Co | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ⁻⁻ | Cl ⁻ | Al |
|-------------------------------|------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------|
| Ca ⁺⁺ | 0,84 | | | | | | | |
| Mg ⁺⁺ | 0,69 | 0,71 | | | | | | |
| K ⁺ | 0,56 | 0,75 | 0,60 | | | | | |
| Na ⁺ | 0,96 | 0,69 | 0,55 | 0,44 | | | | |
| SO ₄ ⁻⁻ | 0,59 | 0,73 | 0,76 | 0,76 | 0,45 | | | |
| Cl ⁻ | 0,93 | 0,63 | 0,50 | 0,33 | 0,97 | 0,34 | | |
| AL | 0,58 | 0,87 | 0,73 | 0,78 | 0,40 | N.S. | N.S. | |
| pH | 0,30 | 0,47 | 0,34 | N.S. | N.S. | 0,36 | N.S. | 0,52 |

N.S. Non significatif

Co Conductivité

AL Alcalinité

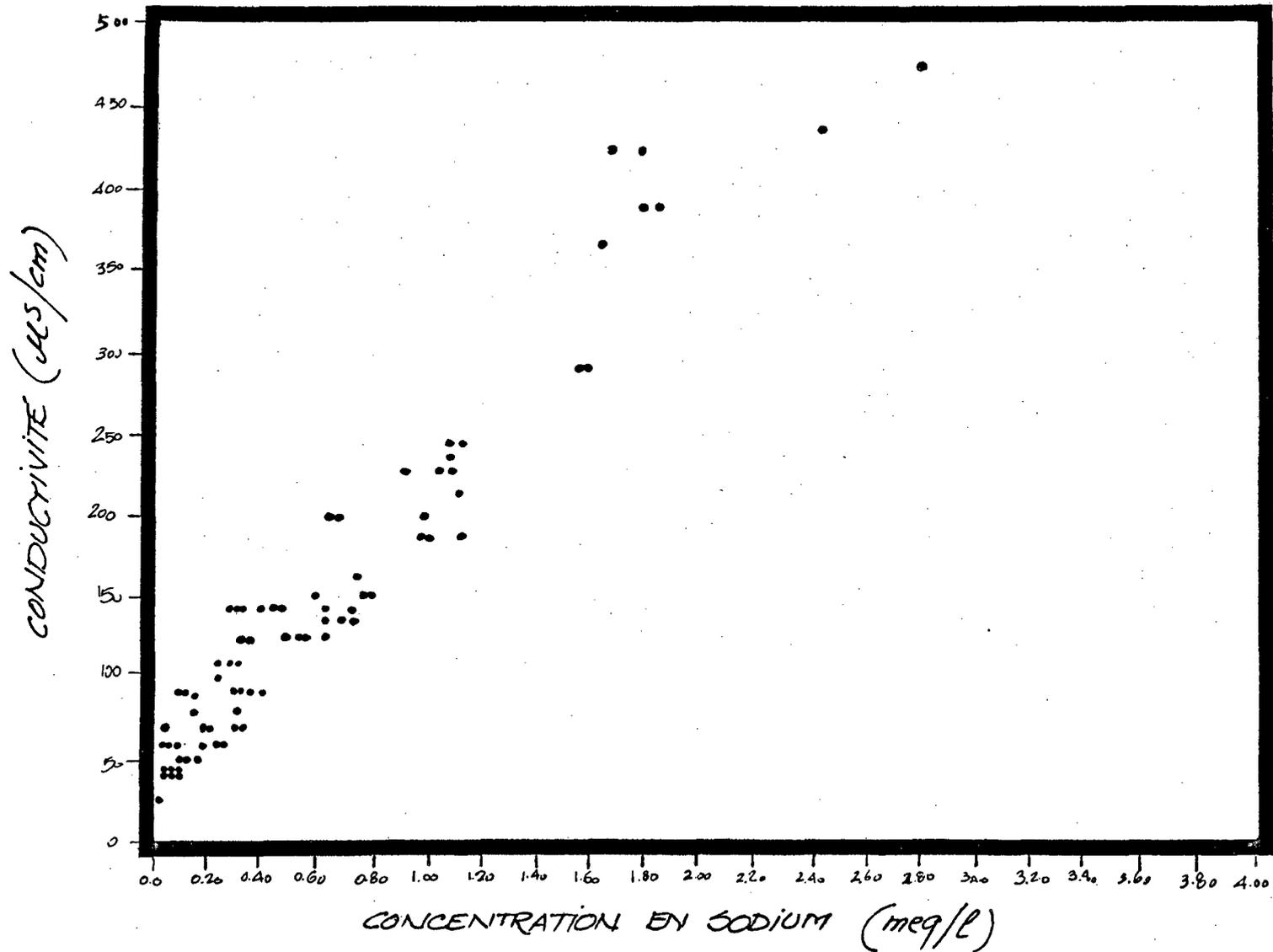


Figure 4: Graphique de la conductivité (µs/cm) en fonction de la concentration en sodium (meq/l).

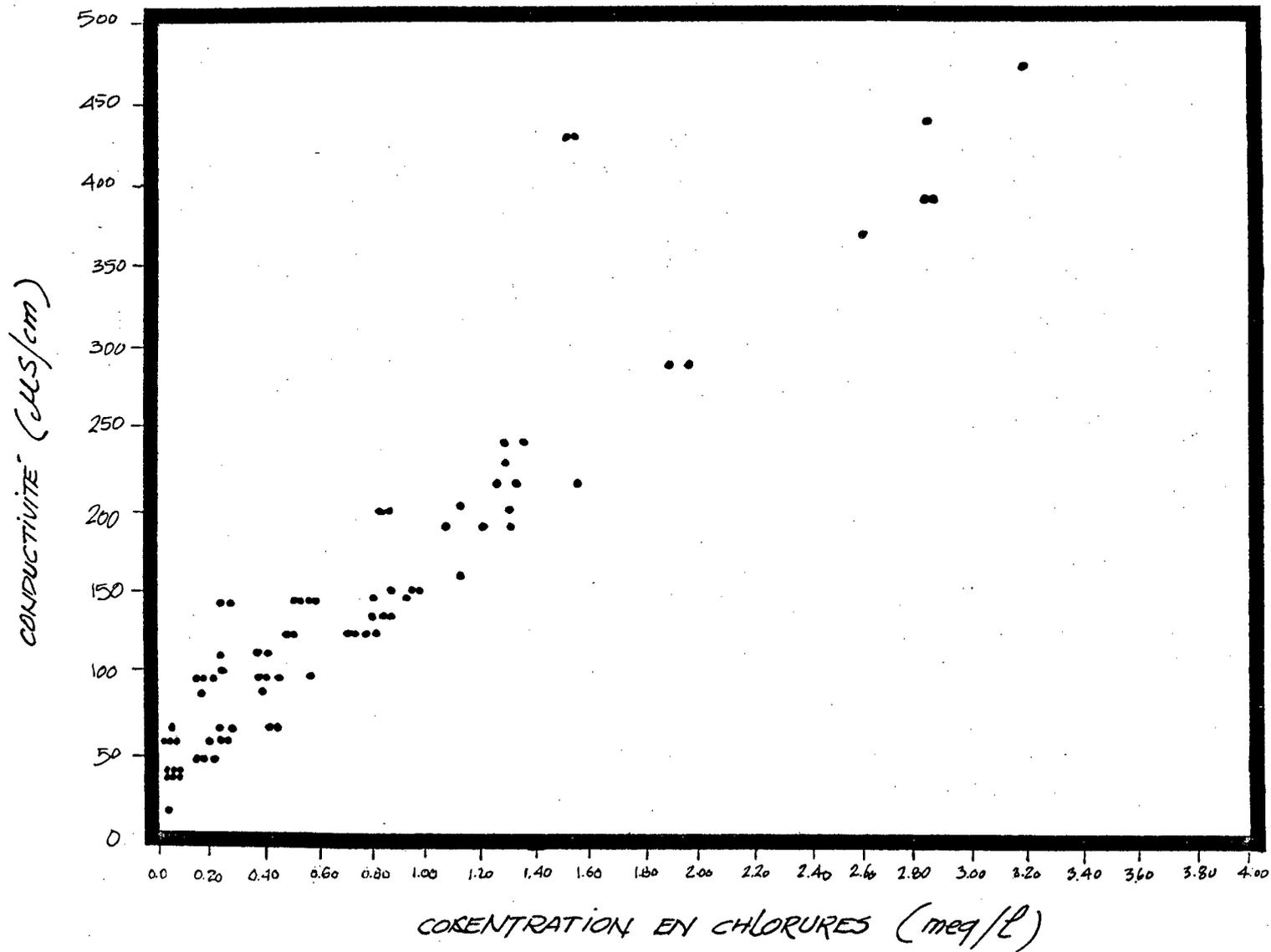


Figure 5: Graphique de la conductivité ($\mu\text{s/cm}$) en fonction de la concentration en chlorures (meq/l).

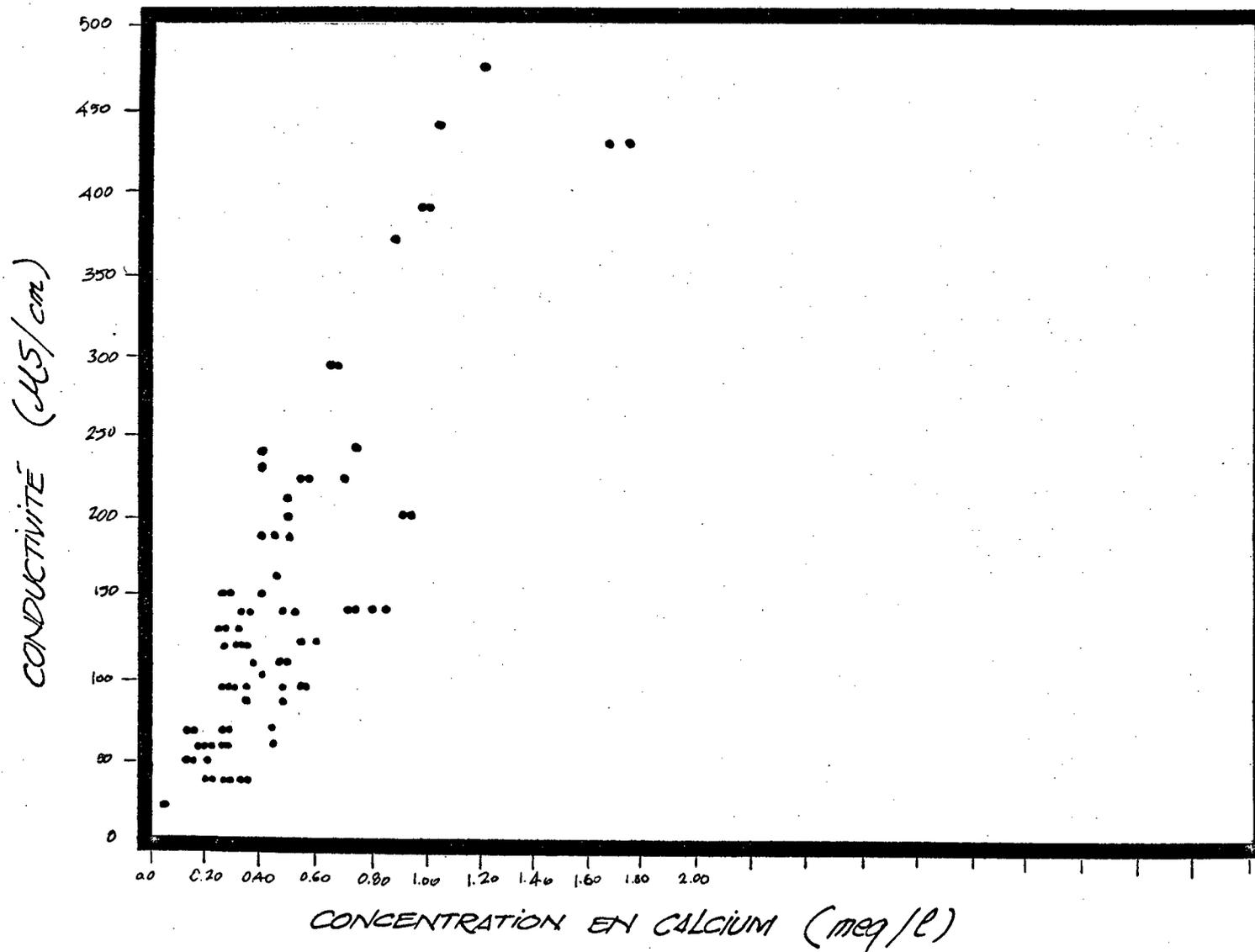


Figure 6: Graphique de la conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$) en fonction de la concentration en calcium (meq/l).

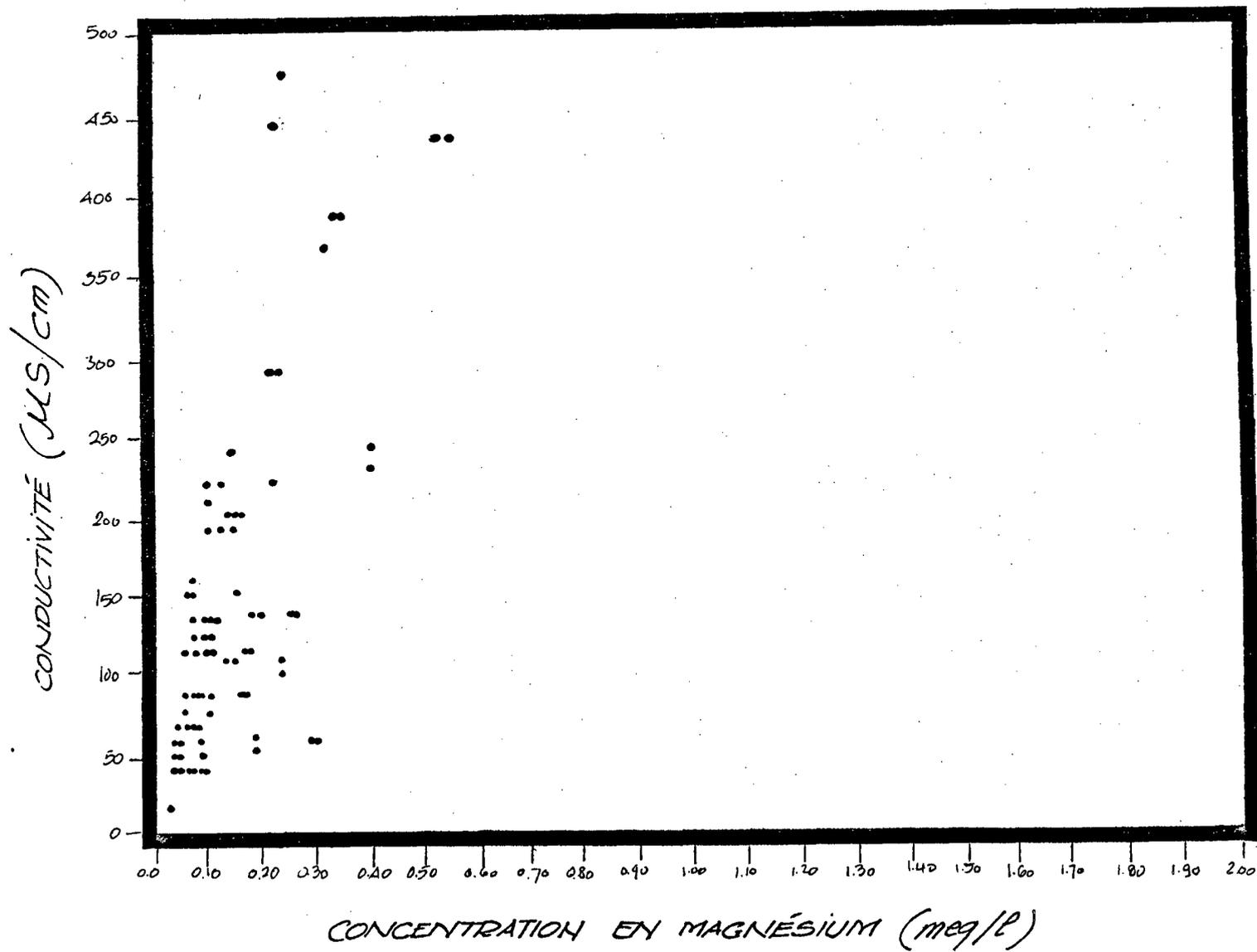


Figure 7: Graphique de la conductivité (µs/cm) en fonction de la concentration en magnésium (meq/l).

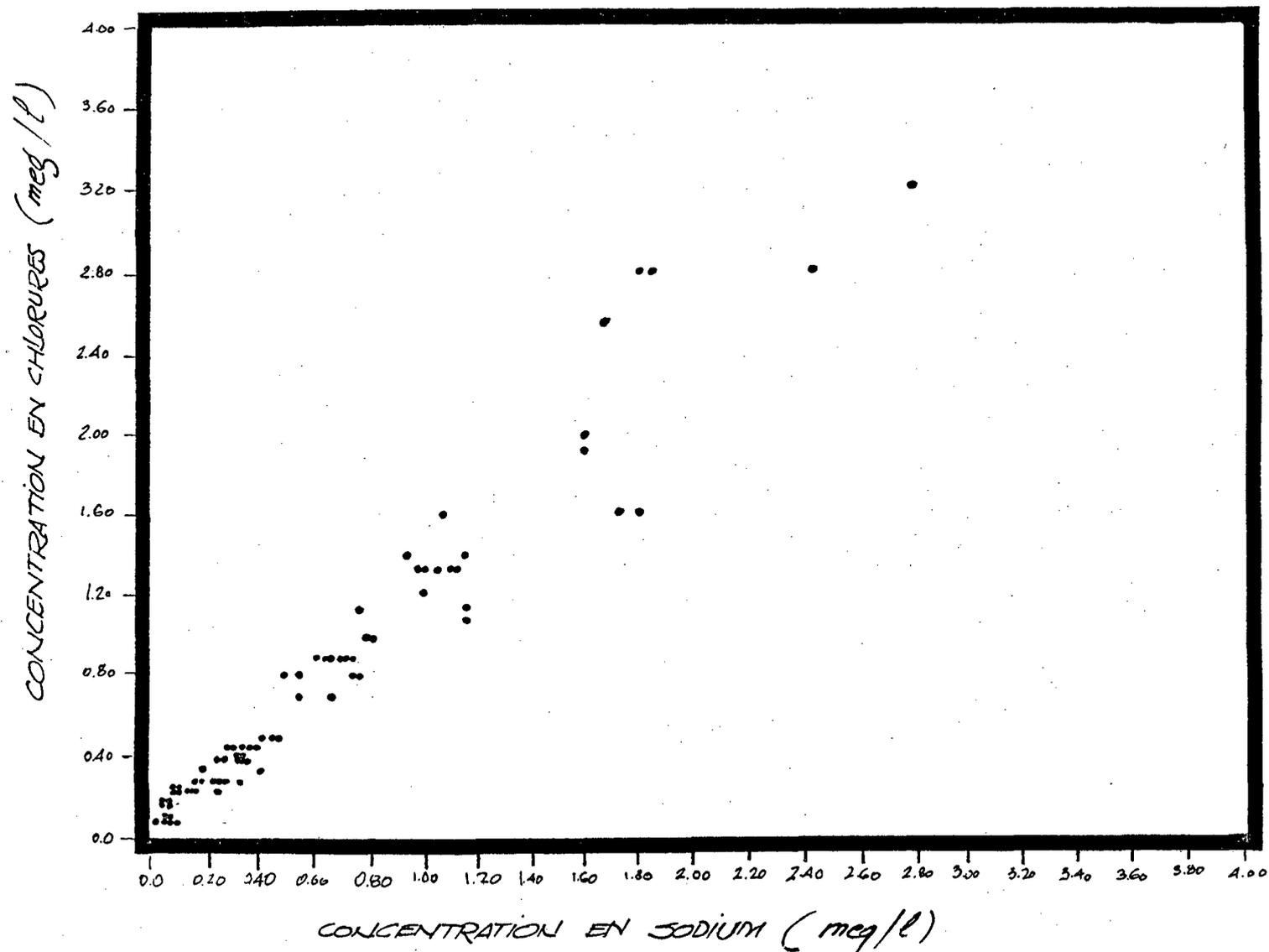


Figure 8: Graphique de la concentration en chlorures (meq/l) en fonction de la concentration en sodium (meq/l).

Tableau 7 - Valeurs des rapports entre le sodium, le magnésium, le potassium et le calcium (valeurs des cations exprimées en mg/l) à la surface du lac.

| Lac | Na ⁺ /Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ /Ca ⁺⁺ | K ⁺ /Ca ⁺⁺ |
|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| André | 2,60 | 0,26 | 0,12 |
| Antoine | 2,17 | 0,10 | 0,06 |
| D'argent | 0,62 | 0,35 | 0,04 |
| Aux Barges | 0,37 | 0,12 | 0,08 |
| Beaulac | 0,67 | 0,16 | 0,05 |
| Beauport | 2,56 | 0,18 | 0,08 |
| Brochet | 0,95 | 0,23 | 0,16 |
| Brome | 0,74 | 0,17 | 0,10 |
| Clément | 2,67 | 0,12 | 0,06 |
| Clouthier | 0,25 | 0,25 | 0,17 |
| Désert | 2,00 | 0,17 | 0,07 |
| 2ième Lac du Chauffaud aux Basques | 1,31 | 0,14 | 0,12 |
| Des deux Truites | 0,24 | 0,22 | 0,09 |
| Dufour | 2,05 | 0,12 | 0,05 |
| Dufresnes | 2,25 | 0,19 | 0,09 |
| Duhamel | 1,71 | 0,11 | 0,06 |
| Ennis | 1,13 | 0,10 | 0,06 |
| Jolicoeur | 0,49 | 0,08 | 0,04 |
| Lovering | 0,30 | 0,78 | 0,15 |
| Ludger | 1,11 | 0,25 | 0,08 |
| Magog | 0,58 | 0,21 | 0,08 |
| Méduse | 2,17 | 0,21 | 0,04 |
| Millette | 2,96 | 0,21 | 0,06 |
| Orford | 3,09 | 0,60 | 0,05 |
| Paquin | 2,74 | 0,18 | 0,06 |
| Parker | 0,09 | 0,25 | 0,04 |
| Pauzé | 1,91 | 0,23 | 0,04 |
| A Pitre | 2,68 | 0,12 | 0,06 |
| Du Portage | 3,00 | 0,17 | 0,10 |

Tableau 7 - (Suite)

| Lac | $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$ | $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$ | $\text{K}^+/\text{Ca}^{++}$ |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Robert | 3,04 | 0,25 | 0,14 |
| Roxton Pond | 0,28 | 0,17 | 0,10 |
| Saguay | 1,00 | 0,14 | 0,12 |
| St-Augustin | 1,17 | 0,19 | 0,08 |
| St-Denis | 2,50 | 0,13 | 0,07 |
| St-Louis | 1,53 | 0,19 | 0,09 |
| Ste-Marie | 0,84 | 0,09 | 0,04 |
| A la Truite | 2,05 | 0,21 | 0,03 |
| Vézina | 0,72 | 0,17 | 0,25 |
| Du Milieu des Brûlés | 0,29 | 0,19 | 0,02 |
| Baie des Rochers | 0,15 | 0,08 | 0,05 |

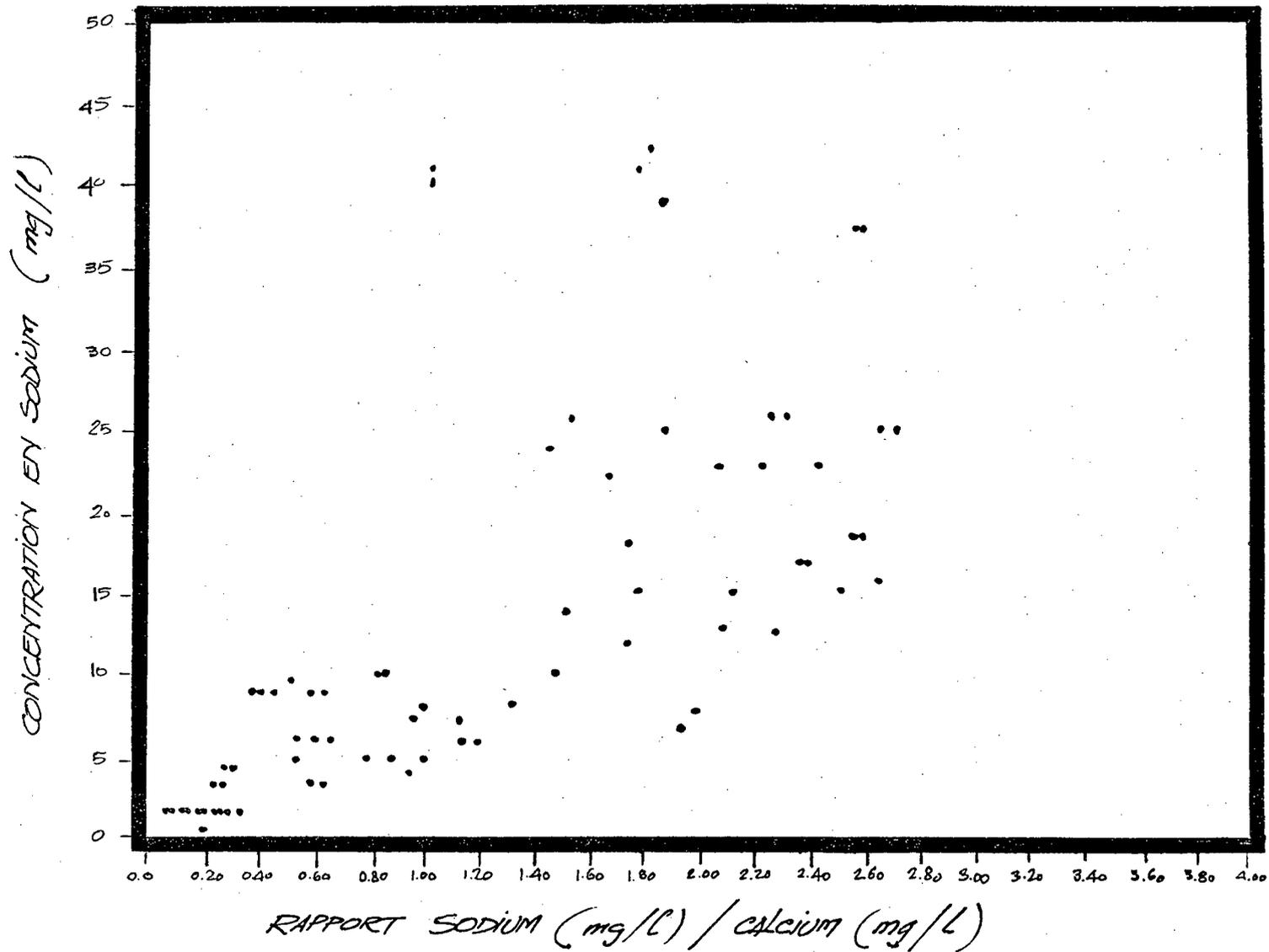


Figure 9: Graphique de la concentration en sodium (mg/l) en fonction du rapport sodium (mg/l)/calcium (mg/l).

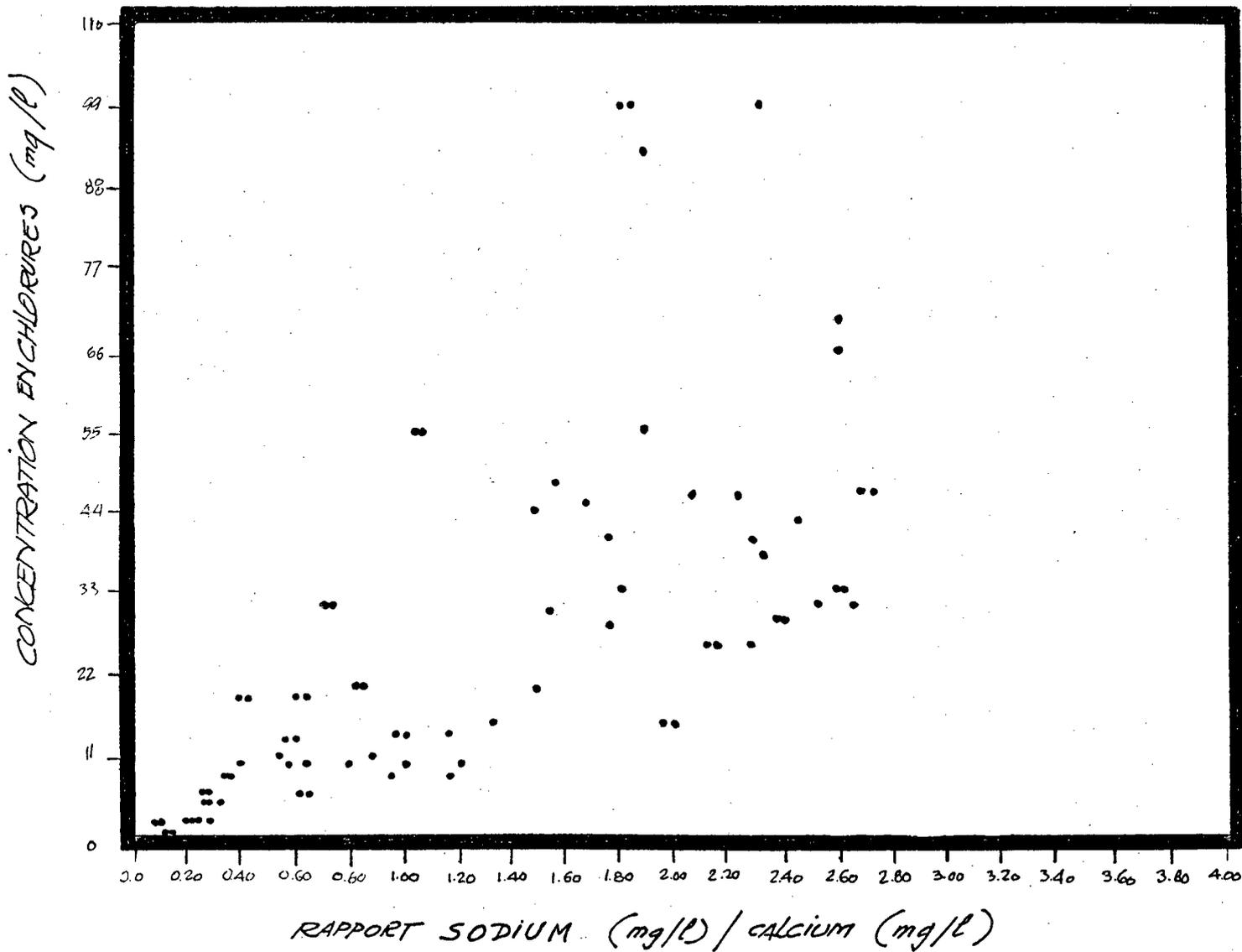


Figure 10: Graphique de la concentration en chlorures (mg/l) en fonction du rapport sodium (mg/l)/calcium (mg/l).

Tableau 8 - Quantité de sel épandu sur les routes situées aux abords des lacs et quantité de chlorures en provenance d'un autre lac.

| Lac | Route # | Sel (NaCl)* (t/km/ans) | Chlorures (Cl ⁻) (t/km/ans) | Longueur de route drainée (km) | Apport en chlorures par un autre lac (t/ans) |
|----------------------------------|---------|---------------------------|--|--------------------------------|--|
| André | 131 | 23 | 13,66 | 1,0 | |
| D'Argent | 112 | 18 | 10,75 | 0,8 | 510,0 |
| | A-10 | 127 | 78,00 | 2,3 | |
| Aux Barges | 117 | 37 | 22,32 | 2,0 | |
| Beaulac | 335 | 14 | 8,38 | 3,5 | |
| Brochet | 117 | 37 | 22,32 | 1,2 | |
| Brome | 215 | 15 | 9,05 | 6,0 | |
| | 243 | 15 | 9,05 | 14,5 | |
| | 243 | 24 | 14,48 | 12,0 | |
| | 245 | 24 | 14,48 | 7,0 | |
| | 112 | 18 | 10,75 | 7,0 | |
| | A-10 | 129 | 78,00 | 10,0 | |
| Désert | 125 | 25 | 15,30 | 3,0 | |
| 2e Lac du Chafaud aux Basques | 138 | 45 | 27,08 | 1,4 | |
| Dufour | 138 | 45 | 27,08 | 0,8 | |
| Dufresne | 329 | 17 | 10,02 | 3,0 | |
| Duhamel | 117 | 20 | 12,00 | 2,6 | |
| Ennis | 138 | 45 | 27,08 | 1,8 | |
| Ludger | 329 | 17 | 10,54 | 2,5 | 111,2 |

Tableau 8 - (Suite)

| Lac | Route # | Sel (NaCl)* (t/km/ans) | Chlorures (Cl ⁻) (t/km/ans) | Longueur de route drainée (km) | Apport en chlorures par un autre lac (t/ans) |
|-------------|-------------|---------------------------|--|--------------------------------|--|
| Magog | 112 | 32 | 19,61 | 5,1 | 16 400,0 |
| | 216 | 2,6 | 1,58 | 5,4 | |
| | - | 2,6 | 1,58 | 5,8 | |
| | 108 | 2,2 | 1,34 | 2,8 | |
| Méduse | | | | | 489,8 |
| Millette | 117 | 18 | 11,12 | 2,4 | |
| | A-15 | 262 | 158,00 | 0,8 | |
| Orford | 112 | 26 | 15,46 | 2,4 | |
| | A-10 | 129 | 78,00 | 4,5 | |
| Pauzé | 125 | 28 | 16,96 | 2,6 | |
| | boul. Pauzé | 14 | 8,47 | 2,8 | |
| A Pitre | 138 | 45 | 27,08 | 1,5 | |
| Du Portage | 138 | 45 | 27,08 | 1,0 | |
| Robert | 131 | 23 | 13,66 | 1,6 | |
| Roxton Pond | 139 | 16 | 9,73 | 6,0 | |
| St-Denis | 329 | 34 | 21,00 | 1,1 | |
| St-Louis | 131 | 23 | 13,66 | 5,0 | |
| Ste-Marie | 138 | 52 | 31,37 | 5,6 | |
| A la Truite | A-15 | 262 | 158,00 | 3,1 | |

* NaCl épandu sur la route et NaCl présent dans le sable épandu sur la route (5%).

Tableau 9 - Données morphométriques nécessaires pour le calcul de la concentration d'équilibre et du temps de réponse.

| Lac | V ($\times 10^6 \text{m}^3$) | S (km^2) | L (km) | L.M. (km) | T (%) | Z (m) | S.B. (km^2) | D.S. (m^3/sec par km^2) | M.E. (m^3/sec) | To (jours) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|--------------|----------|----------|---------------------------|---|-------------------------------------|---------------|
| André | 0,038 | 0,030 | 0,180 | 0,106 | 3,95 | 1,29 | 3,00 | 0,017 | 0,026 | 9 |
| D'Argent | 4,510 | 0,980 | - | - | - | 4,60 | 66,73 | - | 2,380 | 18 |
| Aux Basques | 2,568 | 0,769 | 1,360 | 0,593 | 7,40 | 6,05 | 9,11 | 0,017 | 0,154 | 350 |
| Beaulac | 4,440 | 0,863 | - | - | - | 5,14 | 6,00 | 0,017 | 0,102 | 504 |
| Brochet | 2,350 | 0,306 | 1,100 | 0,266 | 3,10 | 7,67 | 2,30 | 0,017 | 0,040 | 695 |
| Brome | 8,420 | 14,200 | - | - | - | 5,92 | 200,12 | - | 3,760 | 255 |
| Désert | 0,125 | 0,113 | 0,620 | 0,213 | 2,70 | 1,11 | 6,40 | 0,018 | 0,115 | 12 |
| 2e Lac du Chaufaud aux Basques | 3,570 | 0,328 | 1,200 | 0,273 | 24,30 | 24,63 | 2,00 | 0,022 | 0,044 | - |
| Dufour | 0,309 | 0,098 | 0,500 | 0,193 | 6,14 | 3,16 | 0,90 | 0,022 | 0,020 | 179 |
| Dufresnes | 6,720 | 1,590 | - | - | - | 4,22 | 4,35 | 0,019 | 0,082 | 941 |
| Duhamel | 6,040 | 0,519 | - | - | - | 11,63 | 3,70 | 0,018 | 0,066 | 1047 |
| Ennis | 0,420 | 0,119 | 0,800 | 0,180 | 6,21 | 3,53 | 4,70 | 0,022 | 0,103 | 47 |
| Ludger | 7,820 | 1,550 | - | - | - | 5,04 | 39,10 | 0,018 | 0,703 | 128 |
| Magog | 105,300 | 10,800 | - | - | - | 9,75 | 174,32 | - | 52,080 | 22 |
| Méduse | 0,221 | 0,053 | 0,360 | 0,180 | 8,30 | 4,21 | 6,68 | 0,018 | 0,120 | 21 |
| Millette | 4,700 | 0,177 | 0,720 | 0,370 | 4,80 | 2,66 | 5,69 | 0,018 | 0,102 | 534 |
| Orford | 21,870 | 1,250 | - | - | - | 17,92 | 8,44 | - | 0,300 | 836 |

Tableau 9 - (Suite)

| Lac | V ($\times 10^6 \text{m}^3$) | S (km^2) | L (km) | L.M. (km) | T (%) | Z (m) | S.B. (km^2) | D.S. (m^3/sec par km^2) | M.E. (m^3/sec) | To (jours) |
|-------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|--------------|----------|----------|---------------------------|---|-------------------------------------|---------------|
| Pauzé | 0,930 | 0,223 | - | - | - | 4,66 | 6,10 | 0,018 | 0,109 | 99 |
| A Pitre | 0,892 | 0,060 | 0,660 | 0,110 | 20,50 | 14,88 | 1,80 | 0,022 | 0,039 | 267 |
| Du Portage | 0,147 | 0,011 | 0,600 | 0,180 | 20,90 | 13,37 | 1,30 | 0,022 | 0,028 | 61 |
| Robert | 0,190 | 0,042 | 0,500 | 0,086 | 8,80 | 4,54 | 3,80 | 0,017 | 0,040 | 35 |
| Roxton Pond | 5,600 | 1,79 | - | - | - | 3,13 | 17,40 | - | 0,320 | 201 |
| St-Denis | 4,070 | 0,512 | - | - | - | 7,95 | 7,60 | 0,017 | 0,129 | 364 |
| St-Louis | 3,970 | 0,665 | - | - | - | 5,96 | 16,90 | 0,017 | 0,287 | 160 |
| Ste-Marie | 6,580 | 0,514 | 1,280 | 0,387 | 13,92 | 7,07 | 7,76 | 0,022 | 0,170 | 448 |
| A la Truite | 4,930 | 0,551 | - | - | - | 8,94 | 4,20 | 0,018 | 0,075 | 752 |

V = Volume du lac

S = Superficie du lac

L = Longueur maximale du lac

L.M. = Largeur moyenne du lac

T = Pente moyenne sur le pourtour du lac

Z = Profondeur moyenne du lac

S.B. = Superficie du bassin hydrographique du lac

D.S. = Débit spécifique

M.E. = Débit de l'émissaire du lac

To = Temps de renouvellement

