

2M11.2967.6

Université de Montréal

Sources d'hétérogénéité de la chimie des eaux sur le Bouclier canadien

par

Nicolas Rondeau

Département des Sciences Biologiques

Faculté des Sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M.Sc.)

Août, 2001

© Nicolas Rondeau, 2001



QH
302
U54
2002
V.009

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :
Sources d'hétérogénéité de la chimie des eaux sur le Bouclier canadien

présenté par :
Nicolas Rondeau

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Présidente du jury : Bernadette Pinel-Alloul

Membre du jury : Richard Carignan

Membre du jury : Jacques Dupont

Mémoire accepté le : 17 avril 2002

1 SOMMAIRE

Les eaux de surface qui drainent le Bouclier canadien se caractérisent par de faibles concentrations ioniques et un faible pouvoir tampon. Ces caractéristiques ont conduit au classement de la très grande majorité des lacs de la province du Québec (le Bouclier canadien couvre 90% du territoire du Québec), comme étant très sensibles aux précipitations acides. Nous avons toutefois observé, parmi ces eaux de surface, des différences significatives dans les concentrations en ions majeurs, ainsi que dans les valeurs d'alcalinité mesurées. Nous avons d'autre part pris les précautions nécessaires, pour nous assurer que les différences observées n'étaient pas dues à une variabilité d'origine géographique. Dans cette étude, nous avons utilisé des bases de données existantes (Ministère de l'Environnement du Québec) contenant des informations physico-chimiques sur 2173 lacs situés sur le Bouclier canadien. Les méthodes SIG (Système d'information géographique) ont été une pièce angulaire de notre approche et nous ont permis de minimiser les incertitudes dues; à l'épanchement des dépôts de surface, au climat et à l'acidification d'origine anthropique. Une étude à échelle plus réduite (53 lacs) a également été réalisée, visant une comparaison plus précise de la composition chimique des eaux de lacs situés sur deux géologies caractéristiques. Nos résultats indiquent que l'altitude, le ruissellement, les sulfates ainsi que la géologie ont des impacts non négligeables sur la chimie des eaux des lacs du Bouclier canadien. Parmi les géologies étudiées, ce sont les granitoïdes, l'anorthosite, deux groupes de migmatites à trame de gneiss et paragneiss ainsi qu'un complexe gneissique qui ressortent comme étant les géologies participant le plus à la minéralisation des eaux. À l'extrême opposé, nos résultats ont désigné la mangérite, les migmatites et les gneiss charnockitiques comme étant les géologies les plus résistantes à l'altération. À la vue des résultats présentés, nous suggérons de ne pas considérer le Bouclier canadien comme une zone uniforme et peu altérable, mais plutôt de considérer la géologie comme une source d'hétérogénéité à part entière. Au travers des systèmes d'information géographique, nous proposons un outil permettant la prise en considération de ces faits par d'autres auteurs.

2 TABLE DES MATIÈRES

1	Sommaire	iii
2	Table des matières	iv
3	Liste des figures	vi
4	Liste des tableaux	viii
5	Introduction	1
5.1	Chimie des eaux, acidification et processus écologiques	1
5.2	Altération des roches et chimie des eaux de surface	2
5.3	Le Bouclier canadien et l'épanchement des dépôts de surface	3
5.4	Revue de littérature	7
5.5	Objectifs de l'étude	9
5.6	Les systèmes d'information géographique	10
6	Matériel et méthodes	13
6.1	Territoire étudié	13
6.2	Les bases de données utilisées	13
6.2.1	La base de données RESSALQ	14
6.2.2	La base de données BQMA	16
6.3	L'étude de terrain	18
6.3.1	Objectifs de l'étude de terrain	18
6.3.2	Sélection des lacs	19
6.3.3	Description de l'échantillonnage et des mesures	21
6.4	Les facteurs de variation régionaux et locaux	21
6.4.1	Les facteurs régionaux	22
6.4.1.1	Les dépôts acides	22
6.4.1.2	Le ruissellement	22
6.4.2	Le facteur local : l'altitude	23
6.5	Vérification et préparation des données	24
6.5.1	Les bases de données	24
6.5.2	Bilans ioniques	24
6.5.3	Détection et élimination des valeurs aberrantes	26
6.6	Les méthodes statistiques employées	26
6.6.1	L'analyse de variance à plusieurs critères de classification	26
6.6.2	La régression multiple	27
6.6.3	L'analyse canonique de redondance	28
6.7	Base de données et distance de sélection des lacs	29
6.8	Les données de terrain	36

7	<i>Résultats</i>	38
7.1	Variabilité de la minéralisation des lacs	38
7.2	Concentrations des cations majeurs et géologies	39
7.3	Ratios de cations	48
7.4	Impact des variables explicatives sur chacune des concentrations	49
7.5	Modèle global de la chimie des eaux à partir des facteurs abiotiques considérés	54
7.6	Comparaison de deux géologies	58
7.7	Impact des divers facteurs de variation	63
7.8	Analyse canonique de redondance terrain	66
8	<i>Discussion</i>	68
9	<i>Bibliographie</i>	73
10	<i>Annexes</i>	77
10.1	Annexe 1 : Carte géologique du Québec à l'échelle 1 :250000e	78
10.2	Annexe 2 : Brève présentation des géologies	79
11	<i>Remerciements</i>	81

3 LISTE DES FIGURES

<i>Figure 5-1 : Séquence d'altérabilité des principaux minéraux silicatés de Goldich (Langmuir 1997).</i>	2
<i>Figure 5-2 : Étendue du Bouclier canadien au Canada.</i>	4
<i>Figure 5-3 : Le Bouclier canadien dans la province du Québec.</i>	5
<i>Figure 5-4 : Formation et mouvement des glaciers au Québec lors de la glaciation wisconsinienne (tiré de Hocq et al. 1994).</i>	6
<i>Figure 5-5 : Effet produit par le phénomène d'épanchement des dépôts de surface.</i>	7
<i>Figure 5-6 : Comparaison de la précision de la carte obtenue par numérisation (a) à celle des cartes géologique existant auparavant (b).</i>	12
<i>Figure 6-1 : Répartition des lacs de la base RESSALQ sur le territoire d'étude.</i>	15
<i>Figure 6-2 : Répartition des lacs de la base de données BQMA sur le territoire d'étude.</i>	17
<i>Figure 6-3 : Territoire couvert par l'étude de terrain menée dans la région des Laurentides (53 lacs échantillonnés).</i>	20
<i>Figure 6-4 : Carte interpolée à partir des données d'isolignes de ruissellement pour la province du Québec.</i>	23
<i>Figure 6-5 : Comparaison des déséquilibres anions-cations des lacs pour les bilans ioniques non corrigés et ceux corrigés par les différentes méthodes considérées par Wilkinson & al. (Wilkinson, Jones, and Campbell 1992).</i>	25
<i>Figure 6-6 : Explication de la sélection réalisée parmi les lacs des bases RESSALQ et BQMA.</i>	29
<i>Figure 6-7 : Comment lire un diagramme ternaire.</i>	31
<i>Figure 6-8 : Composition chimique des eaux des lacs en cations majeurs, selon la distance de sélection appliquée pour la base de données BQMA à 0 et 10 Km.</i>	32
<i>Figure 6-9 : Composition chimique des eaux des lacs en cations majeurs, selon la distance de sélection appliquée pour la base de données BQMA à 20 et 30 Km.</i>	33
<i>Figure 7-1 : Variabilité des cinq variables dépendantes considérées sur le Bouclier canadien (base de données BQMA).</i>	38
<i>Figure 7-2 : Variation des valeurs d'ions calcium(a), magnésium(b), sodium(c), potassium(d) et de l'alcalinité(e) mesurées dans l'eau des lacs selon la nature géologique de la roche en place.</i>	42
<i>Figure 7-3 : Groupes de géologies définis par l'analyse de variance et le test de Hochberg selon les concentrations en alcalinité (a), ions Ca^{2+} (b), Mg^{2+} (c), Na^+ (d), et K^+ (e) mesurées dans les eaux des lacs.</i>	47

<i>Figure 7-4 : Variation des ratios de cations majeurs, Ca^{2+}/Na^+ (a) et Mg^{2+}/K^+ (b) mesurés dans l'eau des lacs selon la nature géologique du sol qui leur est sous-jacent.</i>	48
<i>Figure 7-5 : Ordination des lacs obtenue au moyen de l'analyse canonique de redondance.</i>	55
<i>Figure 7-6 : Importance et influence des variables explicatives par rapport aux variables dépendantes.</i>	57
<i>Figure 7-7 : Valeurs moyennes des variables de minéralisation de qualité des eaux des lacs selon la nature géologique de leur sous-sol.</i>	62
<i>Figure 7-8 : Valeurs moyennes des variables de minéralisation de qualité des eaux des lacs selon la nature géologique de leur sous-sol.</i>	63
<i>Figure 7-9 : Interactions globales des facteurs de variation et des variables de minéralisation et de qualité des eaux des lacs étudiés.</i>	66

4 LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I: Répartition des effectifs de lacs par géologie.</i>	20
<i>Tableau II : Codage de la variable qualitative multiclassés géologie en variables binaires.</i>	28
<i>Tableau III : Comptage du nombre de différences significatives (au seuil de 0,05, par une analyse de variance) entre deux des géologies considérées pour chacune des variables de minéralisation mesurées dans l'eau des lacs et chacune des distances de sélection.</i>	34
<i>Tableau IV : Comparaison des distances de sélection des lacs pour la campagne de terrain (seuil de signification de l'analyse de variance réalisée).</i>	36
<i>Tableau V : Données présentant pour chacune des variables de minéralisation considérée et chacune des géologies, la valeur moyenne (moy.), minimale (min.), maximale (max.) ainsi que la variance (var.).</i>	40
<i>Tableau VI : Géologies significativement différentes (X) pour chacune des variables de minéralisation.</i>	44
<i>Tableau VII : R² associés à chacune des régressions multiples réalisées sur les variables dépendantes.</i>	50
<i>Tableau VIII : Contributions relatives des variables explicatives aux modèles des régressions multiples.</i>	52
<i>Tableau IX: Données physiques sur l'identification la localisation et la nature géologique de la roche mère sous-jacente aux trente huit lacs échantillonnés.</i>	59
<i>Tableau X: Variables chimiques mesurées dans l'eau des lacs et exploitée dans le cadre de la présente étude</i>	60
<i>Tableau XI: Variables chimiques mesurées dans les lacs échantillonnés et non directement exploitées dans le présent document..</i>	61
<i>Tableau XII : Caractéristiques générales des six modèles obtenus par régression multiple.</i>	64
<i>Tableau XIII : Effets individuels des variables explicatives sur les variables dépendantes.</i>	65

“La volonté trouve, la liberté choisit. Trouver et choisir, c'est penser” (Victor Hugo)

Témoignage de gratitude à tous ceux qui m'ont
tendu la main sur le chemin de cet apprentissage.

5 INTRODUCTION

5.1 Chimie des eaux, acidification et processus écologiques

La chimie des eaux des lacs est influencée par une grande variété de facteurs. Ceux-ci, qu'ils soient de nature biotique ou abiotique, agissent non seulement directement sur la qualité des eaux de surface, mais également de façon indirecte sur les organismes vivants qui s'y développent.

Il est à l'heure actuelle admis que les écosystèmes lacustres situés sur une partie du territoire nord-américain sont exposés à d'importants dépôts de polluants acidifiants ayant une origine anthropique. À la suite de la prise de conscience de l'impact de ces dépôts, d'importants efforts ont été entrepris, visant une meilleure connaissance du problème et devant mener à la mise en place de stratégies de gestion pertinentes. Bien que le chemin parcouru soit à ce jour très important, il subsiste toutefois des zones d'ombre qui complexifient la gestion des milieux affectés.

Au Canada, dans la province du Québec, les lacs situés sur le Bouclier canadien ont fait l'objet d'études visant à mesurer l'importance du phénomène d'acidification. Certains des facteurs mesurés au cours de celles-ci furent les concentrations ioniques majeures. La variété des caractéristiques des eaux influencées par ces facteurs leur accorde un intérêt très spécial. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, l'impact de certaines concentrations ioniques sur l'acidité de l'eau, sa richesse en nutriments ou son pouvoir tampon.

L'altération des sols par contact avec l'eau est généralement reconnue comme étant une source importante d'apport d'espèces ioniques. Sur le Bouclier canadien dans la province du Québec (territoire sur lequel se centrera cette étude), l'importance de cette source est plus incertaine, dû au caractère peu altérable des roches présentes sur ce territoire (roches silicatées).

5.2 Altération des roches et chimie des eaux de surface

La réaction des eaux avec les matériaux solides détermine en partie les caractéristiques chimiques de celles-ci (Stumm *et Wollast* 1990). L'altération des roches peut se différencier selon qu'elle soit le résultat d'un processus physique (érosion) ou bien chimique (altération chimique). Dans les climats humides, l'altération chimique des minéraux composant les roches résulte de deux causes. La sous saturation en ions des eaux de surface en contact avec les sols, ainsi que le déséquilibre thermodynamique existant pour bon nombre de minéraux se trouvant à la surface (Langmuir 1997).

Certains facteurs influençant l'altération chimique des minéraux sont : la nature de la roche mère, le climat, la température, le drainage et l'activité biologique (Langmuir 1997). L'altérabilité de la roche mère peut être évaluée à l'aide de la séquence de Goldich (figure 5-1). Celle-ci donne les vitesses d'altérabilité relative des principaux minéraux.

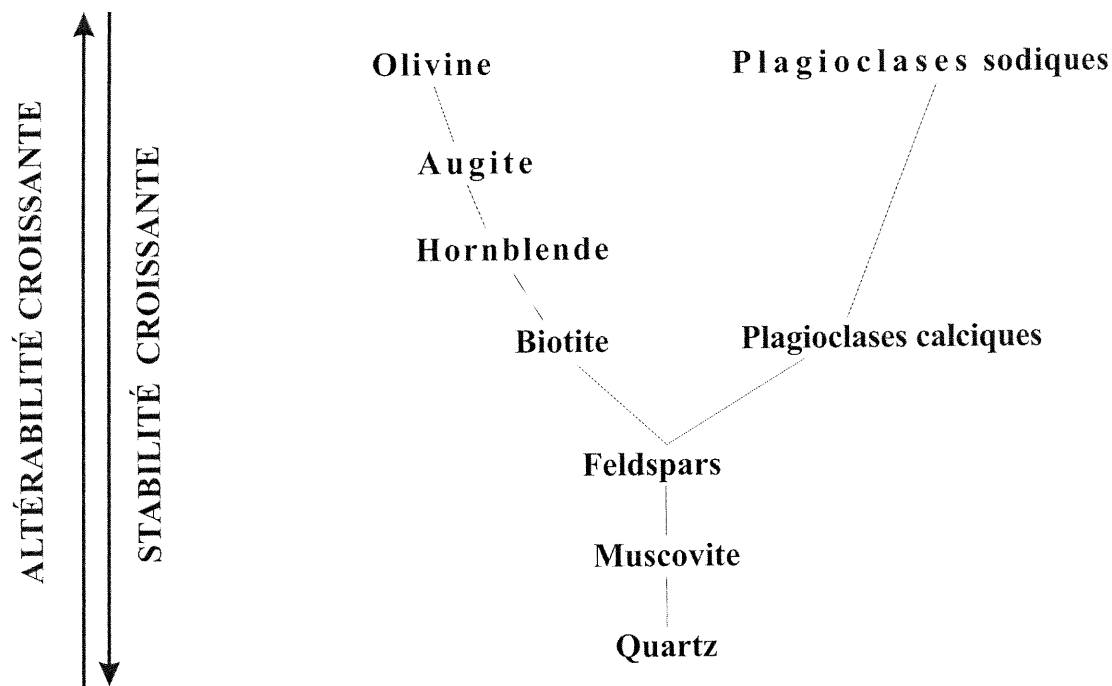


Figure 5-1 : Séquence d'altérabilité des principaux minéraux silicatés de Goldich (Langmuir 1997).

On admet en géochimie que la composition des substrats avec lesquels une eau rentre en contact influe sur sa composition minéralogique (Stumm et Wollast 1990). Les caractéristiques de ce contact, en particulier sa durée, feront varier l'impact des sols sur la chimie des eaux.

Selon la composition en minéraux des géologies, tant la nature que la vitesse de libération des différentes espèces ioniques, varieront. De façon schématique, sur la base de ces informations, il est possible d'établir plusieurs grands groupes de géologies, en fonction de la minéralisation qu'elles induiront au niveau des eaux de surface. Concrètement, ceci veut dire que l'on retrouverait, à l'extrême du gradient caractérisé par la plus faible et la plus lente altérabilité, les roches silicatées telles que les granites. À l'extrême opposé de ce gradient, caractérisées par une plus forte et plus rapide altérabilité, se trouvent les roches carbonatées telles que les carbonates. Entre ces deux extrêmes existent bon nombre de géologies. Leur positionnement sur cette échelle linéaire peut être déterminé en fonction de leur abondance en silice ainsi que des autres composés qui leur sont propres.

5.3 Le Bouclier canadien et l'épanchement des dépôts de surface

Le Bouclier canadien est une formation rocheuse d'origine précambrienne dont la mise en place a commencée il y a quelques 3 milliards d'années. Son étendue est d'environ 4,6 millions de km² au Canada, ce qui représente environ la moitié de la superficie de ce pays. On le retrouve dans six des provinces canadiennes (Terre-Neuve, Québec, Ontario, Manitoba, Saskatchewan et Alberta) ainsi que dans deux territoires (Territoires du Nord-Ouest et Nunavut). Cette formation rocheuse s'étend également au nord des États-Unis, dans les états du Minnesota, Wisconsin, Michigan et New York, pour constituer le plus grand affleurement terrestre de roche Précambrienne. Le Bouclier canadien est, à ce titre, au Canada, la plus importante région physiographique.

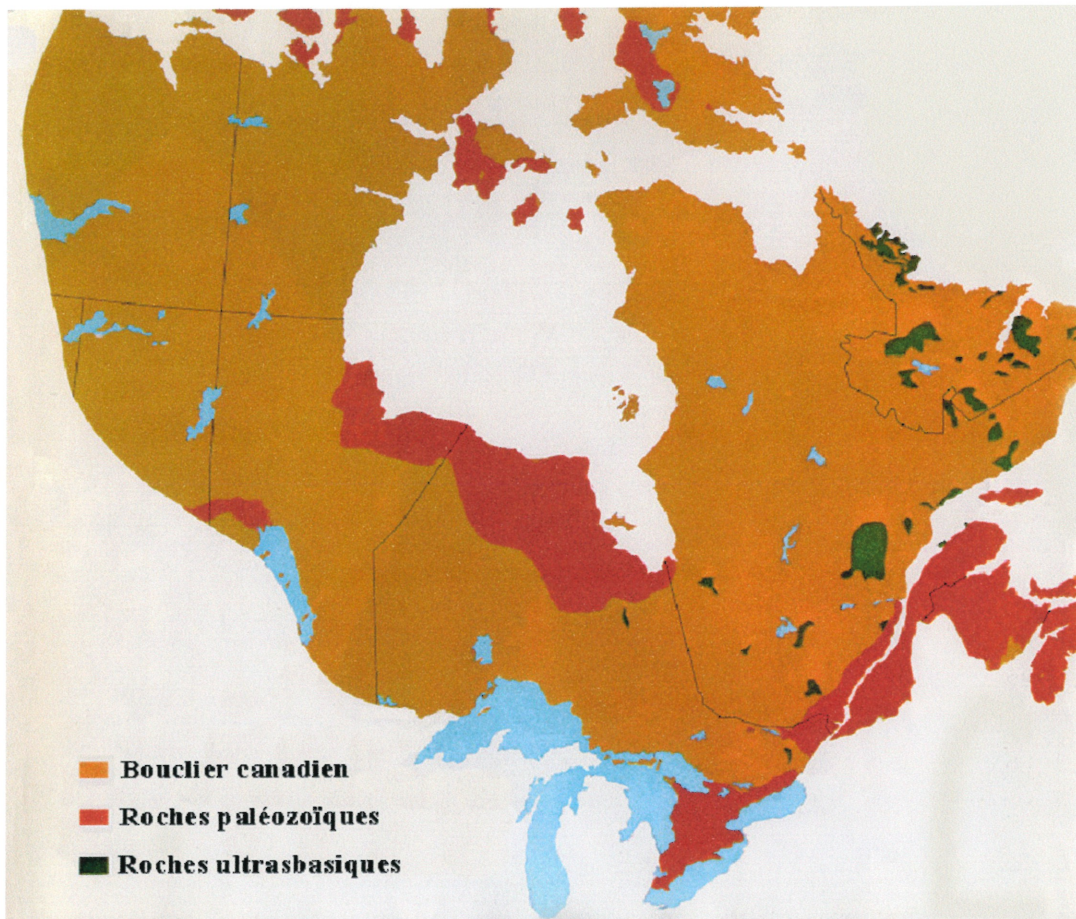


Figure 5-2 : Étendue du Bouclier canadien au Canada.

Dans la province du Québec, le Bouclier canadien constitue 90% du territoire. Il s'étend en demi-cercle à partir de la baie d'Hudson jusqu'au nord du fleuve Saint-Laurent. Deux grandes provinces constituent la plus grande partie du Bouclier canadien ; il s'agit de la province de Grenville et de celle du Supérieur (figure 5-3).

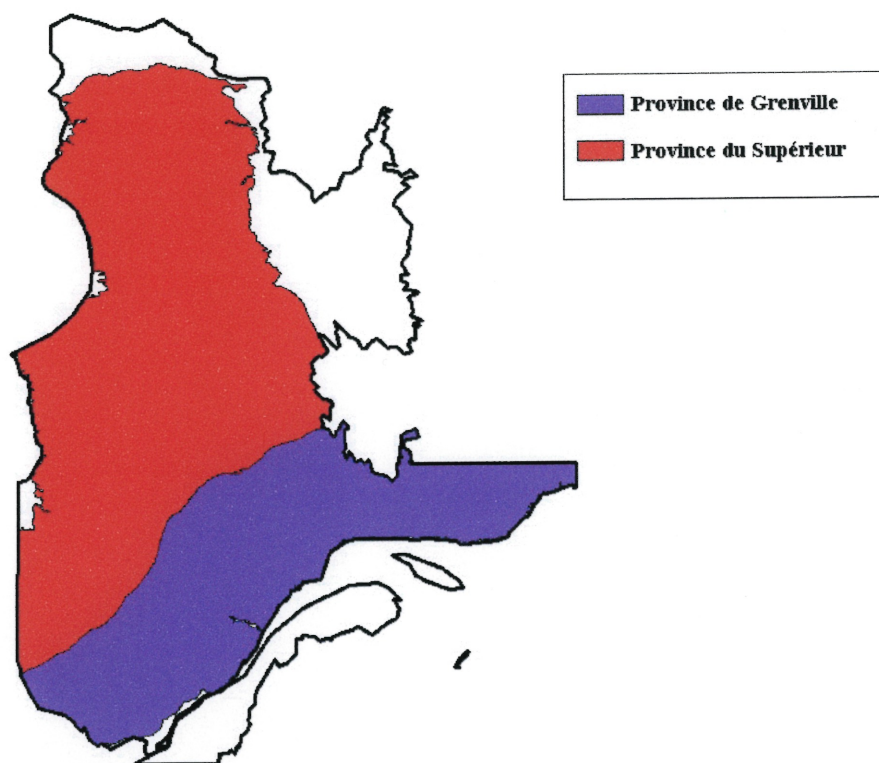


Figure 5-3 : Le Bouclier canadien dans la province du Québec.

D'un point de vue géologique, le socle Précambrien qui constitue le Bouclier canadien est composé de roches riches en silice. Les quelques 3 milliards d'années qui se sont écoulées depuis sa mise en place, l'ont profondément transformé. Ce socle rocheux a connu, en particulier, plusieurs orogènes et glaciations qui ont l'un après l'autre façonné son aspect, pour aboutir au relief que nous connaissons de nos jours. De toute l'histoire du Bouclier canadien, la dernière glaciation qu'il a connue (glaciation wisconsinienne), il y a quelques 7500 ans, a dans le cadre de cette étude une importance particulière. Au cours de ce dernier âge glaciaire, le Québec fut recouvert (figure 5-4) par les glaciers nés au Nouveau-Québec et dans les hautes-terres des Appalaches (Landry et Mercier 1992).

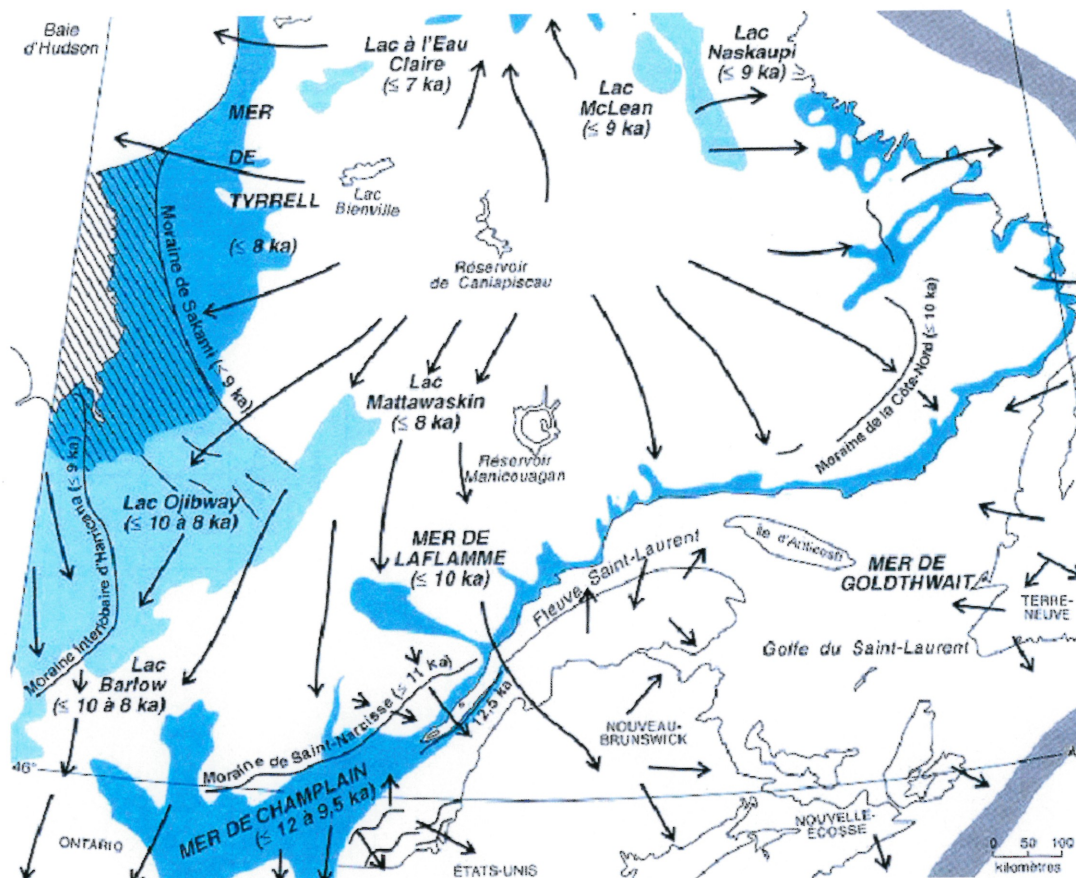


Figure 5-4 : Formation et mouvement des glaciers au Québec lors de la glaciation wisconsinienne (tiré de Hocq *et al.* 1994).

Au cours de cette glaciation, l'avancée et le recul des masses glaciaires a entraîné l'érosion des matériaux se trouvant en surface, tels que les roches meubles, les dépôts organiques ou les paléosols mis en place au cours de l'âge tertiaire (Hocq *et al.* 1994). Les mouvements des glaciers ont, par la suite, entraîné le recouvrement de la géologie en place, par ces dépôts d'origine glaciaire. La nature et l'épaisseur de ces dépôts meubles varient de place en place, faisant de l'estimation de leur importance en un point donné du territoire, une tâche ardue.

L'épanchement des dépôts de surface a donné naissance à des discordances entre la nature géologique des dépôts de surface et celle de la roche en place. Tel que montré par la figure 5-5, chaque zone d'épanchement des dépôts de surface d'une géologie correspond à une zone de discordance.

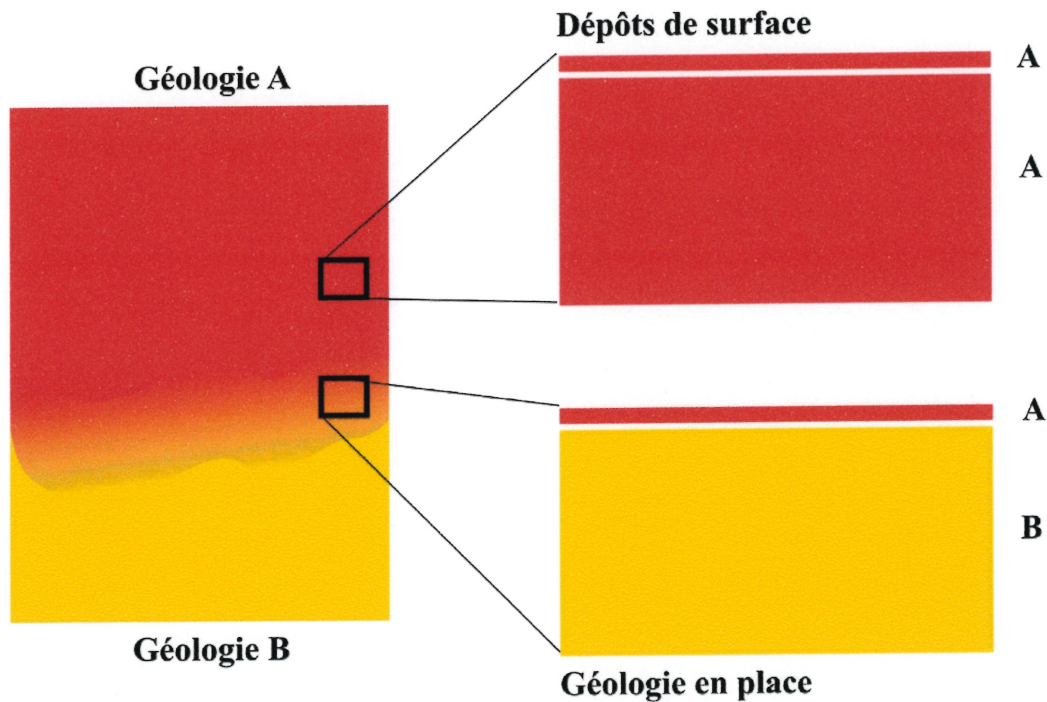


Figure 5-5 : Effet produit par le phénomène d'épanchement des dépôts de surface.

5.4 Revue de littérature

Les interactions existantes entre l'eau et les minéraux avec lesquels elle est en contact sont relativement bien connues et traitées dans de nombreux ouvrages de géochimie. La particularité existant sur le Bouclier canadien, ne réside donc pas à ce niveau là, mais plutôt au niveau de l'organisation des couches constituant la surface des sols, soit les dépôts de surface. La première étude à avoir mis en lumière le problème posé par l'épanchement des dépôts quaternaires sur le Bouclier canadien et son impact sur la chimie des eaux de surface fut réalisée par Shilts et ses collaborateurs (Shilts *et al.* 1981). Au cours de cette étude, menée par la commission géologique du Canada, les auteurs réalisèrent une cartographie de la sensibilité de la roche en place aux pluies acides. De plus, ils mirent en évidence l'existence par endroits de discordances, entre la géologie de la roche en place et la géologie des dépôts de surface. Cette étude aboutit à la création

d'une carte de sensibilité de la roche en place couvrant l'ensemble du territoire canadien et basée sur les informations géologiques existant sur les dépôts de quaternaires.

Une étude menée par le Ministère de l'Environnement du Québec entre les années 1986 et 1990 sur le territoire du Bouclier canadien (cette étude donna lieu à la création de la base de données RESSALQ) mit en évidence l'existence d'une importante variabilité de la minéralisation de l'eau. L'auteur rapporta l'existence de zones non vulnérables, entre autre, au Lac-Saint-Jean, Baie de James, Maniwaki-Hull et celle de zones très vulnérables, dans les régions de la Côte-Nord, des Laurentides et de l'ouest du Québec (Dupont 1992a). À la lumière des résultats de l'étude menée par la Commission géologique du Canada (Shilts *et al.* 1981), les sources d'hétérogénéité avancées furent les suivantes :

- Apports atmosphériques de matériaux acidifiants (particulièrement des sulfates).
- Variation de la nature géologique des dépôts quaternaires d'origine glaciaire.
- L'altitude et la taille des lacs furent mentionnées comme caractéristiques physiques ayant un impact sur les caractéristiques chimiques des eaux des lacs.

La diminution de la minéralisation avec l'altitude fut attribuée par les auteurs à une diminution du temps de contact entre l'eau et les dépôts meubles. La diminution de l'épaisseur des dépôts de surface avec l'altitude, ainsi que celle du ratio de l'aire du bassin versant sur l'aire du lac furent citées pour expliquer la réduction du temps de contact (Dupont 1992a). Bien que considérée par l'auteur, l'impact de la géologie des sols sur la composition chimique des eaux ne fit pas l'objet d'analyses plus précises, probablement suite à la faible résolution des informations disponibles sur la géologie des sols.

Une étude de géostatistique menée par Bellehumeur et collaborateurs (Bellehumeur *et al.* 1999a) utilisant les données du Ministère de l'Environnement du Québec et employant une approche statistique différente, a mené ces auteurs à une mise en relief de sources locales d'hétérogénéité. Aucune information ne fut toutefois avancée par ces auteurs quand à leur nature. Bien que ne portant que sur les valeurs de pH, cette étude a permis d'aboutir à une meilleure estimation de cette variable par la prise en considération des

petits bassins versant dans le traitement statistique (Bellehumeur *et al.* 1999a). Il ressort de cette étude que l'application d'une méthode statistique donnant plus d'importance aux petits bassins versants est susceptible de permettre une meilleure prévision des valeurs de pH mesurées.

5.5 Objectifs de l'étude

Cette étude a été entreprise pour tenter de mieux cerner l'impact de certains facteurs abiotiques sur la composition chimique des eaux des lacs sur le Bouclier canadien. Nous nous intéresserons plus spécialement à l'influence possible de la géologie du Bouclier canadien sur la minéralisation des eaux. Cette formation rocheuse est généralement considérée comme relativement homogène et peu altérable (nous excluons de cette étude toutes les géologies carbonatées). La première des variables explicatives de retenues dans cette étude est par conséquent la nature géologique de la roche en place. Nous vérifierons ses effets, ainsi que ceux de quatre autres facteurs de variation (à savoir, les concentrations en sulfate et en nitrate ainsi que l'altitude et le ruissellement) sur la chimie des eaux. Nous avons retenu les concentrations en sulfate et en nitrate mesurées dans l'eau des lacs comme variables explicatives étant donné leur étroite relation avec les processus d'acidification des milieux lacustres. L'altitude est, quand à elle, une variable que nous pensons susceptible de jouer un rôle important en favorisant une diminution du temps de séjour de l'eau dans les sols par la modification des caractéristiques topologiques des bassins versants (effets de la pente des bassins versants, ainsi que de l'augmentation du ratio, aire du lac sur aire du bassin versant). Finalement, le ruissellement constitue une variable qui nous permet de considérer des variations dans les précipitations ainsi que dans l'évapotranspiration.

Nous pensons que l'analyse de ces cinq variables et leur comparaison postérieure, peut nous permettre de mieux comprendre les mécanismes ayant un impact sur la minéralisation de l'eau des lacs situés sur le Bouclier canadien. Cette compréhension

pourra permettre, lors d'études postérieures, de réaliser l'échantillonnage des lacs et l'analyse des résultats en tenant en compte des facteurs mis en lumière dans notre étude.

5.6 Les systèmes d'information géographique

Les questions auxquelles cette étude tentera de répondre comportent toutes une importante composante spatiale. Pour gérer au mieux cet aspect de la question et tenter d'avoir une vue globale des interactions des variables mesurées et de leur impact sur la chimie des eaux, nous avons eu recours aux systèmes d'information géographique (S.I.G.). Il s'agit de techniques de cartographie assistées par ordinateur permettant, entre autre, la création de cartes couplées à des bases de données. Une très grande diversité de transformations et manipulations peuvent être effectuées sur de telles cartes.

Ces méthodes de travail ont constitué la pierre angulaire de notre approche. La géologie constitue un des piliers de l'étude. Pour faciliter son association aux autres données en notre possession, nous avons choisi d'assembler une carte géologique couvrant le territoire étudié. Cette carte a été obtenue par numérisation de 36 cartes géologiques sur papier à l'échelle 1 : 250000 (cartes de la compilation de Avramtchev (Avramtchev et Lebel-Drolet 1979; Avramtchev et Piché 1981; Avramtchev 1982; 1983a; 1983b)). Ces cartes ont été numérisées à l'aide d'une table de numérisation et jointes pour obtenir une carte couvrant le tiers méridional de la province de Québec, situé sur le Bouclier canadien. Le territoire cartographié se situe dans sa totalité sur le Bouclier canadien. Bien que cette approche ait engendré un important travail, nous l'avons retenue car nous pensons que la précision qu'elle nous a permis d'atteindre (voir la comparaison des précisions à la figure 5-6) est indispensable à la mise en lumière des relations étudiées dans la suite de cette recherche.

Une fois la carte de géologique construite, nous avons pu y superposer¹, à l'aide des S.I.G., d'autres données spatiales telles que, la localisation des lacs échantillonnés ou les valeurs du ruissellement. L'association des lacs et de la géologie nous a permis de mettre en relation la géologie sous-jacente aux lacs avec l'ensemble des variables consignées dans les bases de données employées (se référer aux points 6.2.1 et 6.2.2). Parmi ces variables, outre les concentrations en cations majeurs et l'alcalinité, nous retrouvons les concentrations en sulfate et en nitrate (dépôts acides d'origine anthropique), ainsi que l'altitude. Ainsi, nous avons pu prendre en considération ces facteurs de variation dont l'action cumulée à celle de la géologie, est susceptible de nous aider à mieux comprendre les mécanismes déterminant la composition chimique de l'eau des lacs.

¹ Pour la carte géologique numérisée ainsi que pour la carte donnant l'emplacement des lacs, le système de projection utilisé a été le suivant : NAD 27 (pour le Canada) en zone 18.

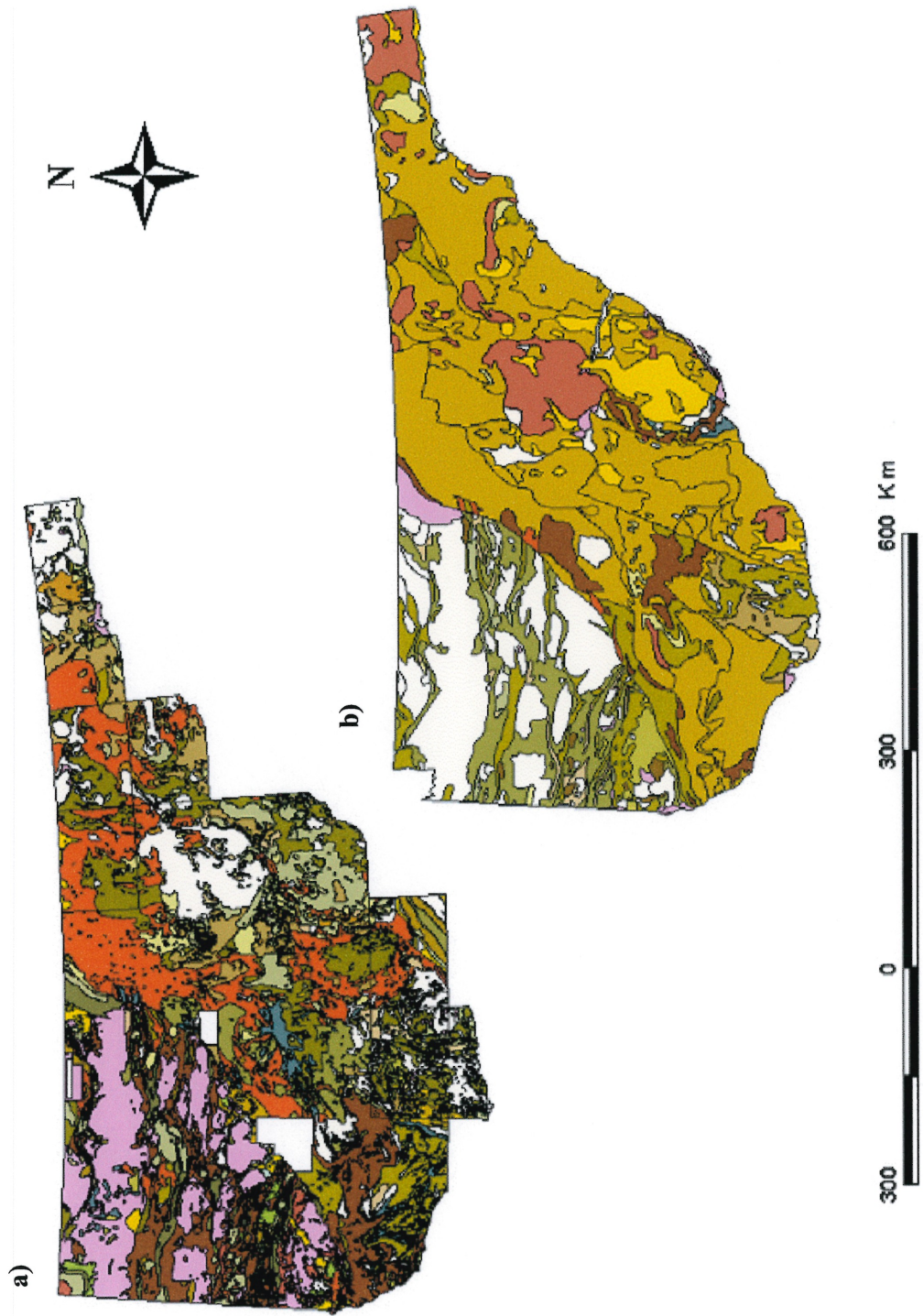


Figure 5-6 : Comparaison de la précision de la carte obtenue par numérisation (a) à celle des cartes géologique existant auparavant (b).

6 Matériel et méthodes

6.1 Territoire étudié

La totalité du territoire étudié se trouve située sur la portion québécoise du Bouclier canadien, majoritairement composé de roches ignées et métamorphiques dont la minéralogie est dominée par les silicates (Hocq *et al.* 1994).

Carte Gis Géologie adjointe en annexe 1

L'altération des roches par l'eau est susceptible d'entraîner l'enrichissement de cette dernière, entre autre, en cations (Ca, Mg, Na, K) et anions (CO_3^{2-})². Contrairement aux minéraux carbonatés, un grand nombre de minéraux silicatés possèdent une vitesse de dissolution très lente. Leur influence sur la composition de l'eau est dès lors moins perceptible (Appelo et Postma. 1996). Néanmoins, ceci ne signifie pas que la dissolution des minéraux silicatés soit sans effet sur les eaux de surface.

6.2 Les bases de données utilisées

Le but premier de cette étude étant la comparaison des signatures géochimiques données par les géologies du Bouclier canadien aux eaux de surface, il nous est apparu comme une condition *sine qua non*, de pouvoir compter sur un grand nombre de lacs. Celui-ci devrait nous permettre de comparer les signatures géochimiques propres à une bonne partie des géologies silicatées présentes sur le Bouclier canadien. D'autre part, le nombre de lacs présents sur chacune de ces géologies, devait être suffisant pour nous permettre de conserver un effectif suffisant pour l'analyse statistique de l'influence des facteurs susceptible d'exercer un effet significatif sur la composition des eaux. Ces derniers facteurs sont, à l'échelle régionale : les dépôts de sulfate, la température et le

² D'autres éléments tels que de la silice des ions aluminium ainsi que d'autres métaux peuvent également être libérés au cours de cette altération.

ruissellement. À l'échelle locale, l'altitude engendre également une variation devant être prise en considération.

Pour ces raisons, lors de la conception de cette étude, nous nous sommes tournés vers deux bases de données mises sur pied par le Ministère de l'Environnement du Québec. La première est la base RESSALQ (Réseau Spatial de Surveillance de l'acidité des lacs du Québec). Elle contient des informations sur la physico-chimie de 1239 lacs situés dans la province du Québec au sud du 51° parallèle (conférer la figure 6-1). La deuxième base de données, la base BQMA (Base Québécoise du Milieu Aquatique), englobe, quand à elle, les informations de la base RESSALQ, plus celles de 934 lacs supplémentaires, pour atteindre un total de 2173 lacs. Il est toutefois à noter qu'alors que la base RESSALQ a servi de support à bon nombre de publications, la base BQMA n'a, à notre connaissance, jamais été utilisée dans son ensemble³. Des précautions supplémentaires seront donc prises afin d'éliminer les valeurs aberrantes contenues dans cette base de données.

6.2.1 La base de données RESSALQ

Elle est le résultat du programme de surveillance de l'acidité de l'eau des lacs au Québec, initié par la Direction de la qualité du milieu aquatique du Ministère de l'Environnement du Québec en mars 1986 (Dupont 1988). Lors de ce programme, qui fût étalé sur cinq années consécutives, un échantillon de lacs statistiquement représentatif de la population totale des lacs fut sélectionné dans les cinq régions hydrographiques du sud du Bouclier canadien au Québec. Ainsi, la région de l'Outaouais fut échantillonnée en 1986, la région de la Mauricie en 1987, la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean en 1988, la région de la Côte-Nord en 1989 et la région de l'Abitibi en 1990.

³ Les lacs qui la composent ont par contre été traités par groupes correspondant aux études dans le cadre desquelles ils ont été échantillonnés, dans les rapports PA du MENV entre 1981 et 2001.

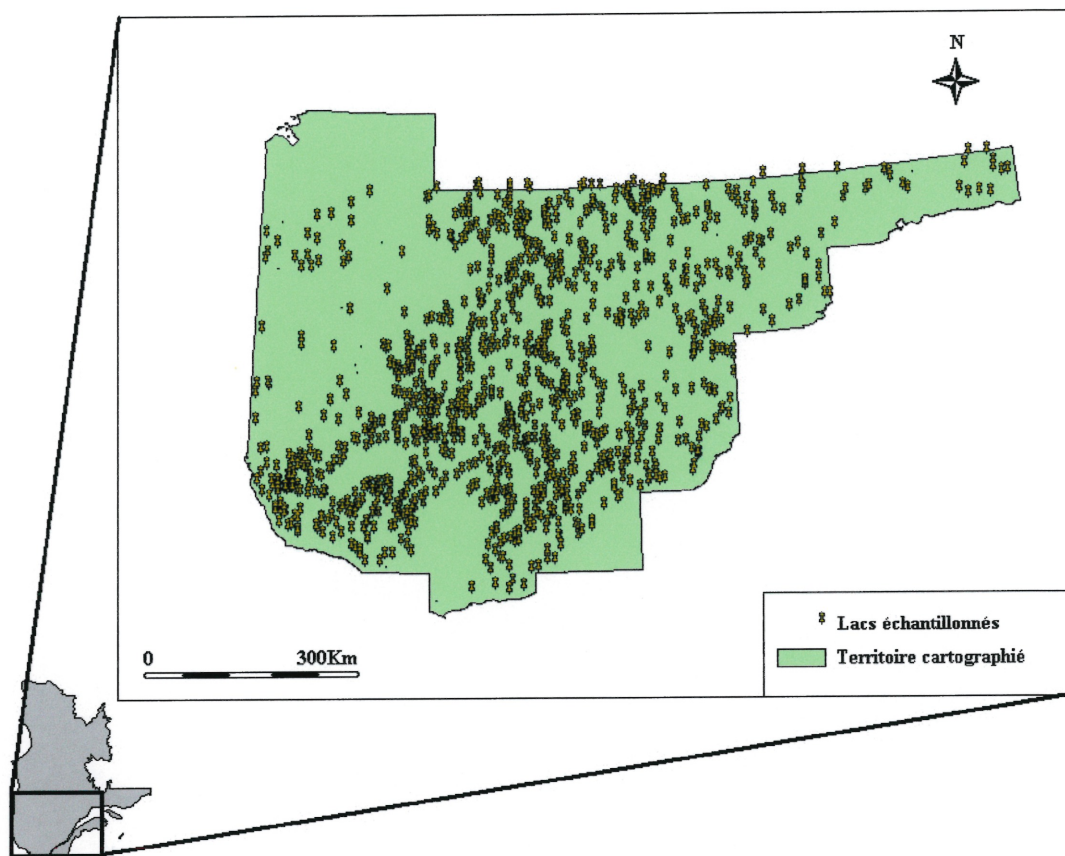


Figure 6-1 : Répartition des lacs de la base RESSALQ sur le territoire d'étude.

Les informations ainsi recueillies furent par la suite triées, vérifiées et exploitées par les personnes en charge de ce programme, donnant lieu à la publication d'un rapport pour chacune des cinq provinces hydrographiques échantillonnées (Dupont 1988), (Dupont 1989), (Dupont 1990), (Dupont 1991) et (Dupont 1993a). De plus amples renseignements sur le Réseau Spatial de Surveillance de l'Acidité de Lacs du Québec peuvent également être trouvés dans des publications présentant les résultats globaux de cette étude (Dupont 1992a), (Dupont 1992b) et (Dupont 1993b).

Cette base de données contient des informations sur 30 variables. Parmi celles-ci se trouvent 19 variables chimiques mesurées ou calculées, ainsi que 4 variables physiques mesurées. Parmi ces 23 variables physico-chimiques, nous utiliserons les concentrations en ions calcium, magnésium, sodium et potassium ainsi que l'alcalinité pour caractériser la chimie des eaux des lacs. D'autre part, les concentrations en sulfate, nitrate ainsi que

l'altitude feront partie des variables que nous utiliserons pour tenter d'expliquer les caractéristiques chimiques de l'eau des lacs. La liste de ces variables ainsi que de plus amples informations peuvent être trouvées dans les rapports de J. Dupont susmentionnés.

En ce qui concerne notre étude, les critères de sélection des lacs employés par les services du Ministère de l'Environnement, ne posent pas de problèmes majeurs. Les critères de sélection sont les suivants :

- Superficie des lacs comprise entre 10 et 2000 hectares;
- Absence d'activités humaines importantes (villes, mines, etc.);
- Élimination des tourbières.

L'ordre hydrologique des lacs, n'étant pas pris en compte comme facteur de sélection, ni repris dans les données physiques des lacs contenus dans la base RESSALQ, il faudra garder en mémoire que ce facteur peut potentiellement générer des interférences dans nos résultats subséquents.

6.2.2 La base de données BQMA

Il s'agit d'une base de données constituée par le ministère de l'Environnement du Québec et qui regroupe des informations sur la physico-chimie de 2173 lacs (conférer la figure 6-2). Ces lacs incluent les 1239 lacs constituant la base RESSALQ, ainsi qu'un groupe moins homogène de lacs échantillonnés par les services de ce ministère au cours de diverses études portant sur les précipitations acides (échantillonnages régionaux et locaux). Les dates d'échantillonnage des lacs constituant cette base de données vont de 1982 à 1994. Bien que les méthodes analytiques employées pour l'ensemble des lacs constituant cette base de données soient comparables (Dupont, J., communication personnelle), on ne peut nier le caractère hétéroclite¹ de ce regroupement de lacs. Il

¹ Le même protocole d'échantillonnage a été suivi pour tous les lacs étudiés dans le cadre des études sur les pluies acides. En ce qui concerne les lacs étudiés dans le cadre du défunt réseau-lacs le protocole d'échantillonnage consistait en plusieurs visites réalisées sur une base triennale.

n'existe en outre aucun document présentant une méthodologie générale pour les lacs de la base de données BQMA.

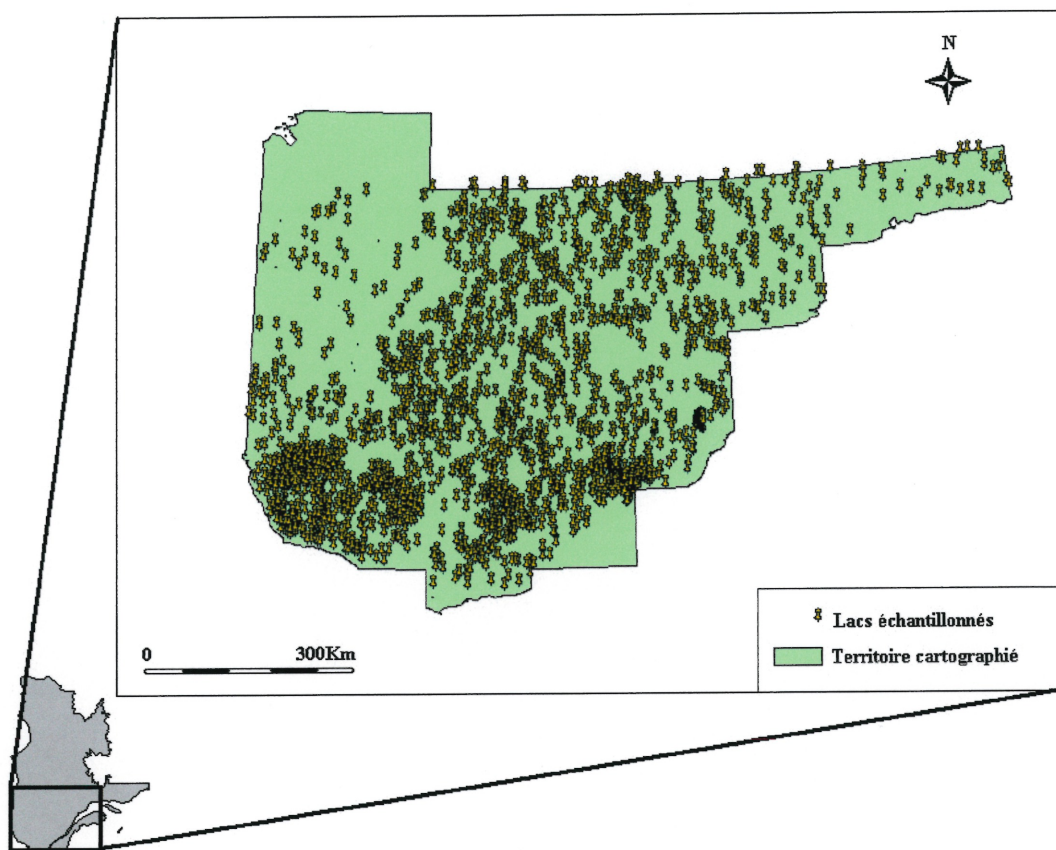


Figure 6-2 : Répartition des lacs de la base de données BQMA sur le territoire d'étude.

Malgré les problèmes potentiels que présente cette base de données, nous avons choisi d'entreprendre de la vérifier et de la considérer ensuite pour comparer ces résultats à ceux obtenus au moyen de la base RESSALQ. Les raisons de ce choix résident dans l'importance que revêt l'effectif de lacs pour la réalisation de la présente étude, et pour son éventuelle utilisation par de tierces personnes.

Le fichier de la base BQMA que nous avons employé pour réaliser cette étude contient 20 variables. Parmi ces variables, 14 sont de nature chimique et 1 est de nature physique. La principale différence, quand aux variables, qui nous semble pertinente dans notre contexte est l'absence des données sur l'altitude des lacs. De plus amples informations

sur cette base de données peuvent être obtenues auprès de la personne qui pilote le système BQMA à la Direction du suivi de l'état de l'environnement, au Ministère de l'Environnement du Québec, Mario Bérubé [REDACTED]

6.3 L'étude de terrain

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'emploi de bases de données, telles que les bases RESSALQ et BQMA, revêt une importance primordiale au niveau d'une étude comme celle-ci. Toutefois, cette utilisation entraîne inévitablement l'acceptation de certains compromis quant aux critères de sélection des lacs, et de façon plus générale, la méthodologie employée. Celle-ci étant déterminée par les buts visés par l'étude originale, il nous faudra nous en accommoder. Pour tenter de parer aux éventuels problèmes, nous avons choisi d'effectuer une étude de terrain, servant à raffiner les résultats obtenus par l'exploitation des bases de données existantes. C'est dans cette optique que nous avons entrepris l'échantillonnage d'une cinquantaine de lacs dans la région des Laurentides.

Le fait que nous ignorions l'ordre hydrologique des lacs⁵, qui composent les bases de données BQMA et RESSALQ, est susceptible de poser de sérieux problèmes puisque l'étendue et la localisation des bassins versants alimentant ces lacs sont incertaines. L'étude de terrain doit nous permettre de déterminer ce qu'il en est.

6.3.1 Objectifs de l'étude de terrain

- Prise en compte de l'ordre hydrologique des lacs et détermination de la possible incertitude que l'ignorance de ce facteur introduit au sein des résultats obtenus à partir des bases de données.

⁵ Dans le cadre de certaines de leurs études, J. Dupont et ses collaborateurs ont déterminé l'ordre hydrologique pour quelques-unes des régions hydrographiques du Québec. Selon les résultats de ces études, les lacs d'ordre hydrologique un, deux et supérieurs à trois étaient, statistiquement, significativement différents (J. Dupont, Ministère de l'Environnement, communication personnelle).

- À la suite du travail réalisé sur les bases de données, nous avons sélectionné deux géologies se caractérisant par des signatures géochimiques des eaux différentes. L'étude de terrain doit nous permettre de vérifier à l'échelle locale ces faits.
- Finalement, l'étude de terrain doit nous permettre d'évaluer l'effet de l'échelle sur l'impact de l'épanchement des dépôts de surface sur la chimie des eaux.

6.3.2 Sélection des lacs

Les critères de sélection que nous avons retenus lors du choix des lacs à échantillonner, ont été les suivants :

- Lacs d'ordre hydrologique 0 (lacs de tête).
- Lacs n'étant pas affectés par l'épandage de sel sur les voies de communications, ou autres perturbations anthropiques.
- Élimination des tourbières et des marécages.

La sélection des lacs s'est faite dans un premier temps sur des cartes topographiques à l'échelle 1/50000^{ème}. Les lacs ainsi retenus furent ensuite vérifiés sur des cartes topographiques au 1/20000^{ème}. Après cette dernière étape, un total de 53 lacs situés sur cinq géologies différentes furent retenus. Un des buts de cette campagne de terrain étant de comparer deux géologies caractéristiques, la majeure partie de l'effectif des lacs se retrouve sur les géologies correspondant à l'anorthosite et au gneiss saturation

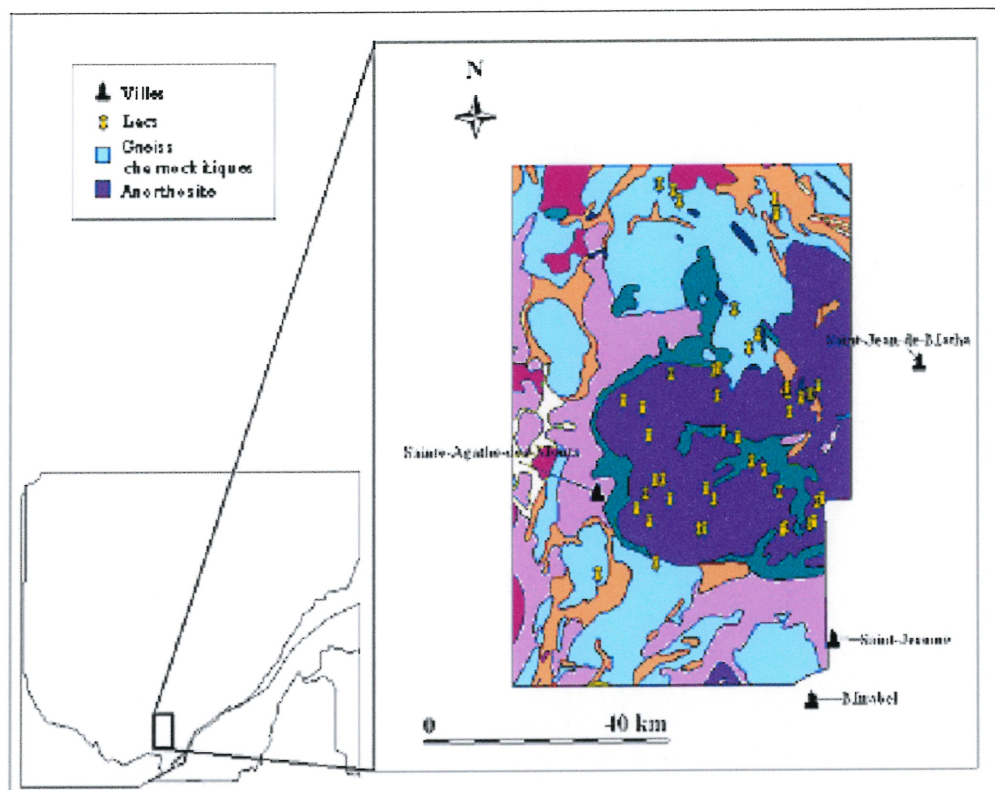


Figure 6-3 : Territoire couvert par l'étude de terrain menée dans la région des Laurentides (53 lacs échantillonnés).

Géologies	Nombre de lacs
Anorthosite	33
Gneiss charnockitique	12
Mangérite	2
Gabbro anorthosite	2
Monzonite	3

Tableau I: Répartition des effectifs de lacs par géologie.

6.3.3 Description de l'échantillonnage et des mesures

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée entre les mois de juillet et août 2000, dans la région des Laurentides, au nord de la Station de Biologie des Laurentides (SBL) de l'Université de Montréal, qui a servi de base d'opérations. Cinquante-trois lacs répartis sur cinq géologies furent échantillonnés. L'échantillonnage pour chacun des lacs a consisté dans le prélèvement d'un litre d'eau dans les récipients adéquats (bouteilles Nalgène de 1L), à l'émissaire du lac. Des duplicata furent prélevés pour chacun des échantillons. Ces contenants étaient ensuite placés dans des glacières (des blocs de congélation furent utilisés pour maintenir la température), en attendant le retour à la SBL. Le soir même, le pH fut mesuré sur les échantillons non filtrés. Un réplique analytique fut fait pour l'ensemble des mesures. Un sous-échantillon fut ensuite filtré (Gelman Super 450) et réfrigéré. En laboratoire, les concentrations en ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , carbone organique dissous et silice furent mesurées. Les échantillons non filtrés furent réfrigérés pendant environ 7 jours et l'alcalinité fut mesurée (réplique) au moyen d'une titreuse automatique (Metrohm Titrino) en employant la méthode de Gran.

6.4 Les facteurs de variation régionaux et locaux

La géologie est l'un des facteurs abiotiques susceptibles d'affecter la chimie des eaux des lacs. Son effet ne peut être dissocié de celui d'autres facteurs, qui pourront dans certains cas masquer son impact. Pour cette raison, seuls les facteurs étant reconnus comme ayant les effets les plus notoires seront considérés par cette étude. La quantification de l'effet de ces facteurs, additionné à celui de la géologie, nous permettra de dresser un tableau plus général des sources abiotiques d'hétérogénéité de l'eau des lacs situés sur le Bouclier canadien dans la province du Québec. Nous avons regroupé ces facteurs selon qu'ils agissent à une échelle régionale ou locale.

6.4.1 Les facteurs régionaux

6.4.1.1 Les dépôts acides

L'existence d'un gradient sud-ouest / nord-est de la concentration en sulfate mesuré dans l'eau des lacs de la province du Québec a été mis en évidence lors de l'analyse des données de la base RESSALQ (Dupont 1992a; Dupont 1992b; Dupont 1993b). La concentration en sulfate sera donc incluse dans les variables indépendantes lors de l'analyse statistique.

6.4.1.2 Le ruissellement

La prise en compte de ce facteur nous permet de considérer les effets des gradients de plusieurs autres facteurs présents sur le territoire d'étude. Ainsi, les variations du ruissellement prennent en compte les variations de : la pluviométrie, les températures et l'évapotranspiration. L'information sur le ruissellement a été obtenue à partir d'une carte d'isolignes tirée d'un rapport gouvernemental (Québec (Province). Ministère de l'Environnement 1993). Nous avons ensuite interpolé cette carte au moyen des S.I.G., ce qui nous a permis d'obtenir une carte (figure 6-4) sur laquelle nous avons superposé la carte des lacs de chacune des bases de données. Nous avons ainsi obtenu des valeurs ponctuelles du ruissellement pour chacun des lacs.

Carte de ruissellement pour la province de Québec

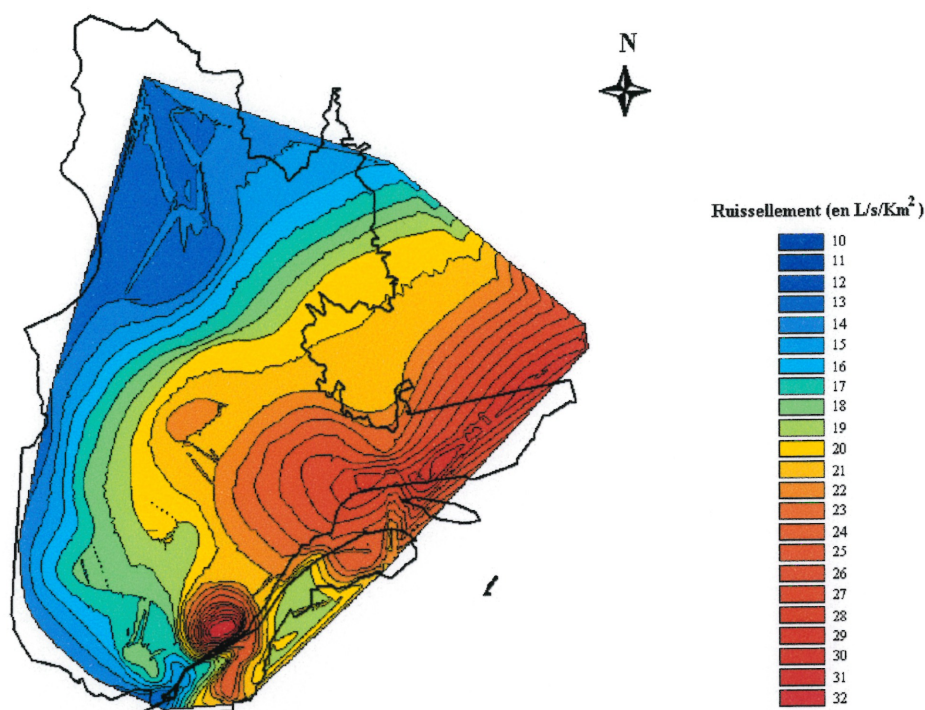


Figure 6-4 : Carte interpolée à partir des données d'isolignes de ruissellement pour la province du Québec.

6.4.2 Le facteur local : l'altitude

L'impact de l'altitude sur les variables de minéralisation mesurées peut se faire à deux échelles. La composante régionale de la variabilité introduite par l'altitude est majoritairement prise en considération par le ruissellement. Toutefois, une composante de l'altitude à une échelle plus locale, peut persister, introduisant de la variabilité dans les données au sein d'une zone d'égal ruissellement.

La base de données RESSALQ comprend l'altitude de chacun des lacs échantillonnés. Inversement pour la base BQMA, cette mesure n'a pas été consignée de façon systématique dans la base de données en notre possession. Nous retiendrons par conséquent la base de données RESSALQ pour les analyses nécessitant cette variable.

6.5 Vérification et préparation des données

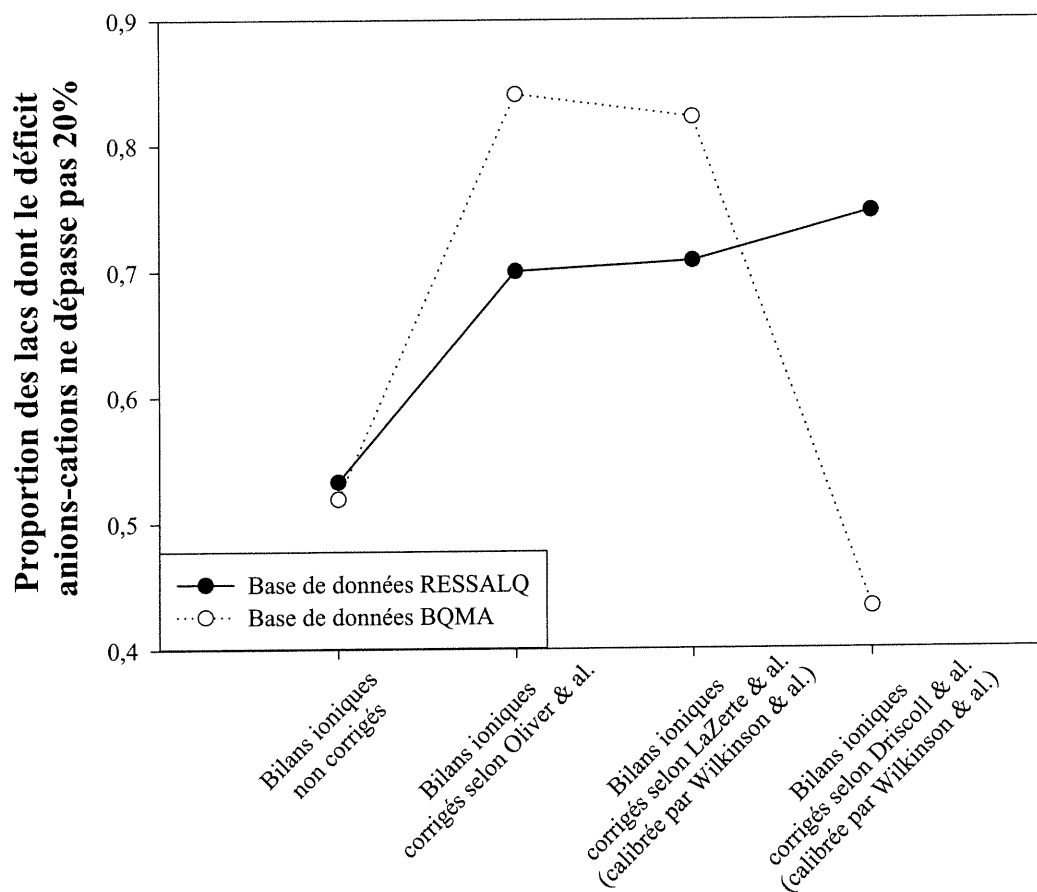
6.5.1 Les bases de données

Avant d'utiliser les bases de données, nous avons voulu vérifier leur consistance. Ceci s'applique en particulier à la base BQMA, puisque la base RESSALQ a déjà subi un tel processus de vérification. À ce niveau, notre première étape a consisté à vérifier la neutralité des bilans ioniques pour chacune des bases de données.

6.5.2 Bilans ioniques

Les bilans ioniques (aussi nommés balances ioniques) sont basés sur le principe d'électroneutralité qui régit les eaux naturelles. Ils consistent à comparer les concentrations totales en anions et cations mesurées dans l'eau, sachant que leur différence doit être théoriquement égale à 0. Dans la pratique, il est impossible de mesurer la totalité des cations et des anions, et un seuil de 20% est généralement considéré. Toute balance ionique dont la valeur absolue est supérieure à 20% est dès lors considérée suspecte.

Une étude menée sur la base de données RESSALQ (Wilkinson *et al.* 1992) démontre que les balances ioniques des lacs de la province du Québec, situés sur le Bouclier canadien, se caractérisent par un déficit anionique chronique. Celui-ci est généralement causé par les radicaux libres et les acides humiques (anions organiques A⁻). Dans cette même étude, plusieurs méthodes de corrections des balances ioniques furent calibrées (différences dans la composition de la matière organique) et comparées. À la vue des résultats de cette étude, nous avons choisi d'appliquer chacune des méthodes de corrections des balances ioniques considérées par ces auteurs, à nos données. Une fois les corrections réalisées nous avons mesurés les écarts à la neutralité pour les bilans ioniques corrigés et ceux non corrigés.



Méthode de correction employée

Figure 6-5 : Comparaison des déséquilibres anions-cations des lacs pour les bilans ioniques non corrigés et ceux corrigés par les différentes méthodes considérées par Wilkinson & al. (Wilkinson, Jones, and Campbell 1992).

Nous observons que la méthode de correction proposée par Driscoll & al. une fois calibrée par Wilkinson et al. est, comme rapporté par ces derniers, la correction des balances ioniques donnant les résultats les plus satisfaisants dans le cas de la base RESSALQ. Nos résultats semblent toutefois montrer qu'il n'en va pas de même pour la base de données BQMA. Ce dernier point nous semble troublant puisque la raison communément avancée pour expliquer les différences observées dans les corrections produites par ces différentes méthodes sont des divergences dans la composition de la matière organique, selon les régions. Or, les territoires couverts par les bases de données RESSALQ et BQMA (Figure 6-1 et Figure 6-2) sont très similaires. Quoiqu'il en soit, à la vue des résultats présentés par la Figure 6-5, nous avons choisi de retenir l'équation

proposée par LaZerte & al. avec les valeurs calibrées par Wilkinson & al. comme méthode de correction des bilans ioniques pour la base de données BQMA. Cette méthode a été préférée à celle de Oliver et al., donnant des résultats légèrement supérieurs (figure 6-5), mais n'ayant pas été calibrée. Une fois les corrections pertinentes appliquées aux balances ioniques, nous avons éliminé les lacs présentant des écarts à la balance ionique supérieurs à 30%.

6.5.3 Détection et élimination des valeurs aberrantes

Nous avons employé le test de Grubbs pour éliminer les valeurs aberrantes se trouvant dans les bases de données. Il est à noter que ce test s'appuie sur l'hypothèse que la population analysée correspond effectivement à une population de type normal. Nous avons donc normalisé les données ne correspondant pas à une population normale. Ce test a ensuite été appliqué aux lacs regroupés par géologie.

Les actions prises, dans le cas de la détection de valeurs aberrantes, à la suite de la réalisation de ce test sont les suivantes :

- Pour un lac donné, une seule des concentrations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et alcalinité) a une valeur aberrante : Élimination de cette concentration pour ce lac.
- Pour un lac donné, deux ou plus des concentrations ont des valeurs aberrantes : Élimination du lac.

6.6 Les méthodes statistiques employées

6.6.1 L'analyse de variance à plusieurs critères de classification

Pour réaliser un choix parmi les bases de données qui étaient en notre possession, nous avons eu recours à l'analyse de variance. Cette méthode statistique consiste dans la comparaison des variances intergroupes et des variances intragroupes, pour déterminer s'il existe une différence significative entre ces deux composantes. Cette analyse a été

menée sur chacune des variables dépendantes dans tous les cas de figure considérés, soit deux bases de données et quatre distances de sélection pour les lacs.

L'analyse de variance couplée à l'emploi de tests de comparaisons multiples, tels que ceux choisis, permet de déterminer quelles sont les données maximisant les différences observées pour les variables dépendantes selon la géologie, tout en minimisant les intervalles de confiance.

L'application de l'analyse de variance à des données requiert la normalité des données ainsi que l'homogénéité des variances au sein des divers groupes (hétéroscédasticité). La transformation logarithme décimal a permis de répondre à la première de ces deux conditions. L'homogénéité des variances n'étant pas respectée dans tous les cas (test de log-anova, résultats non donnés), nous avons choisi d'employer dans ces cas de figure un test de comparaison multiple n'assumant pas l'égalité des variances (test de Games-Howell dans SPSS 10.0). Dans les autres cas, le test GT2 de Hochberg a été retenu.

6.6.2 La régression multiple

Le principe de la régression permet d'évaluer la relation entre une variable dépendante et une (régression simple) ou plusieurs (régression multiple) variables explicatives.

Considérant le but de cette étude, l'intérêt d'un modèle synthétisant la relation existant entre les facteurs pris en considération et chacune des variables caractérisant la chimie de l'eau des lacs, nous semble certain.

L'application pratique du principe de la régression linéaire multiple de type I a nécessité la standardisation et normalisation (transformation logarithme décimal) des variables quantitatives. La variable donnant la géologie du sol sous-jacent aux lacs étant une variable qualitative multiclasse, nous avons dû la transformer pour qu'elle puisse être incluse dans les régressions. Ceci a été fait par la transformation de la variable qualitative multiclasse en un nombre de variables binaires égal au nombre de classes (Legendre et Legendre 1998).

			Variables binaires								
			Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9 ⁶
G1	Complexe gneissique	Geol1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
G12	Mangérite	Geol2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
G2	Gneiss granitique	Geol3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
G20	Migmatites	Geol4	0	0	0	1	0	0	0	0	0
G20A	Migmatites (gneiss et paragneiss)	Geol5	0	0	0	0	1	0	0	0	0
G20B	Migmatites (paragneiss)	Geol6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
G4	Gneiss charnockitiques	Geol7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
G8	Anorthosite	Geol8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
S9	Granitoïdes	Geol9	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tableau II : Codage de la variable qualitative multiclassées géologie en variables binaires.

6.6.3 L'analyse canonique de redondance

L'analyse canonique de redondance est une application du principe de la régression au domaine multivarié. Elle permet d'évaluer la relation existant entre plusieurs variables dépendantes et une ou plusieurs variables explicatives. Ceci est obtenu en régressant les variables explicatives sur les 2 premiers axes obtenus par une analyse en composantes principales. Ces deux axes sont le résultat d'une rotation dans l'espace multidimensionnel des variables dépendantes, donnant une projection bidimensionnelle maximisant la variabilité des données d'origine expliquée.

Par une procédure homologe à celle employée par les régressions multiples, l'analyse canonique de redondance nous permet d'appréhender un modèle mettant en relation les

⁶ La neuvième variable binaire peut-être éliminée sans préjudice, pour ainsi obtenir le codage d'une variable qualitative à x classe en x-1 variable binaire. Nous l'avons conservé ici à des fins pratiques car elle est nécessaire aux programmes utilisés pour la régression multiple et l'analyse canonique de redondance.

cinq variables dépendantes avec les facteurs de variations considérés. Ces deux approches nous semblent être complémentaires et seront donc retenues dans la suite de cette étude.

6.7 Base de données et distance de sélection des lacs

Tel que nous l'avons mentionné, les dépôts quaternaires qui recouvrent le Bouclier canadien rendent hasardeuse la mise en relation de la géologie de la roche en place et la chimie des eaux de surface puisque la minéralogie des dépôts meubles ne correspond pas nécessairement à celle de la roche en place. Pour tenter d'apporter une réponse à ce problème nous avons effectué une sélection parmi les lacs de la base de données BQMA (figure 6-6).

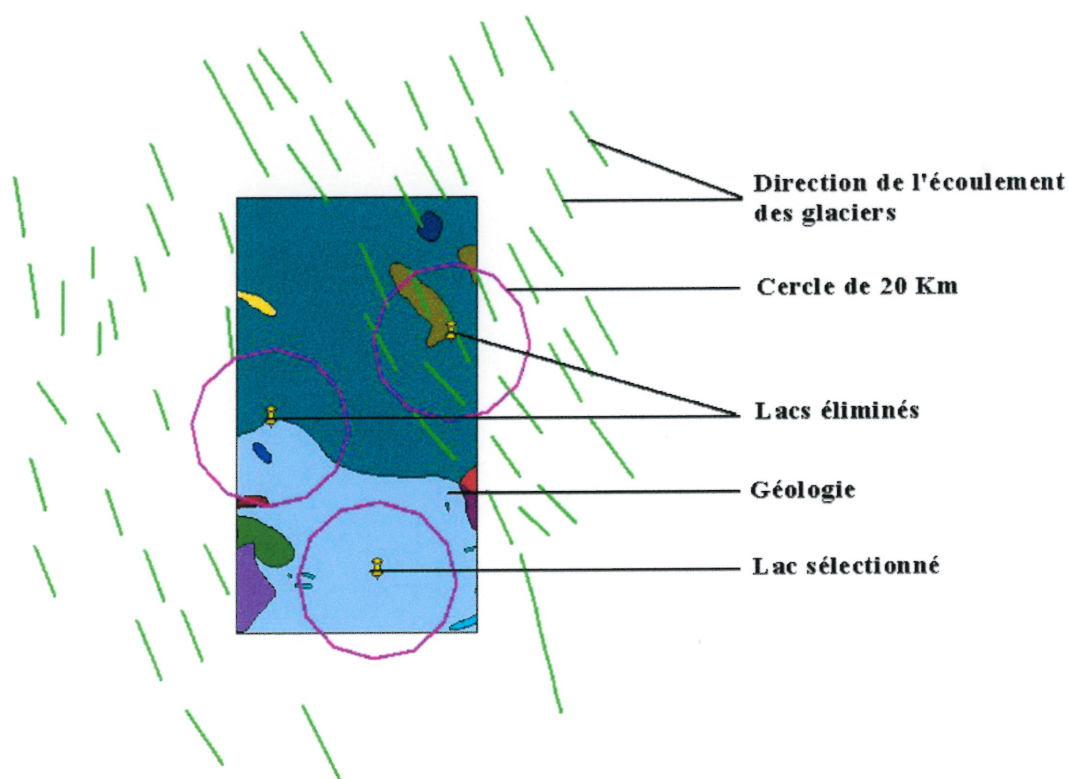


Figure 6-6 : Explication de la sélection réalisée parmi les lacs des bases RESSALQ et BQMA⁷.

⁷ La direction de l'écoulement glaciaire sur le Bouclier canadien a été obtenue du document numérique *Surficial materials of Canada* (Fulton, R.J. 1996).

Nous devons préciser que l'épanchement des dépôts de surface par les glaciers se fait sous forme de cônes et qu'il n'est pas totalement linéaire. Nous pensons que l'approximation réalisée est raisonnable et ne posera pas de problème vu les distances considérées comme critère de sélection des lacs.

La sélection que nous avons menée parmi les lacs des deux bases de données, a visé à ne retenir que les lacs situés sur une couche géologique ayant une continuité d'au moins « x » Km en amont, dans le sens du mouvement des glaciers. Nous avons réalisé cette sélection en donnant les valeurs 10, 20 et 30 Km à « x ». Ces distances représentent une hypothèse quand à la distance parcourue par les dépôts d'origine glaciaire depuis leur point d'érosion jusqu'à leur point de sédimentation. Le choix de ces distances s'est fait à partir des résultats obtenus par Prichonnet et collaborateurs (Prichonnet *et al.* 1987) au cours de l'étude de la moraine de Saint-Narcisse. Ces auteurs ont réalisé des comptages pétrographiques sur des galets dans les tills (régions du lac Ouareau et de Rawdon) en utilisant l'anorthosite de Morin comme indicateur. Ils ont mis en évidence que la distance de transport glaciaire variait entre quelques kilomètres et 40 Km avec un maximum de fréquence à 20 Km (ces distances peuvent être inférieures dans le cas de certains types de sédiments glaciaires).

Parmi les données que nous avons présentées, nous avons dû retenir pour les résultats de cette étude, une des deux bases de données présentées, ainsi qu'une des quatre distances de sélection des lacs. Afin d'optimiser nos chances de mettre en lumière une relation entre la géologie et la chimie des eaux de surface, nous avons cherché à retenir les données maximisant les contrastes entre géologies.

Dans un premier temps nous avons employé à cette fin les diagrammes ternaires (figure 6-7). Ce type de représentation graphique couramment employé en géochimie pour la caractérisation d'une eau, permet de représenter en deux dimensions les concentrations des quatre cations majeurs.

	[Ca ²⁺]	[Mg ²⁺]	[Na ⁺]+[K ⁺]	Total
Concentration en μeq pour les groupes de lacs	0,04	0,04	0,02	0,1
Concentration en % relatif pour les groupes de lacs	40%	40%	20%	

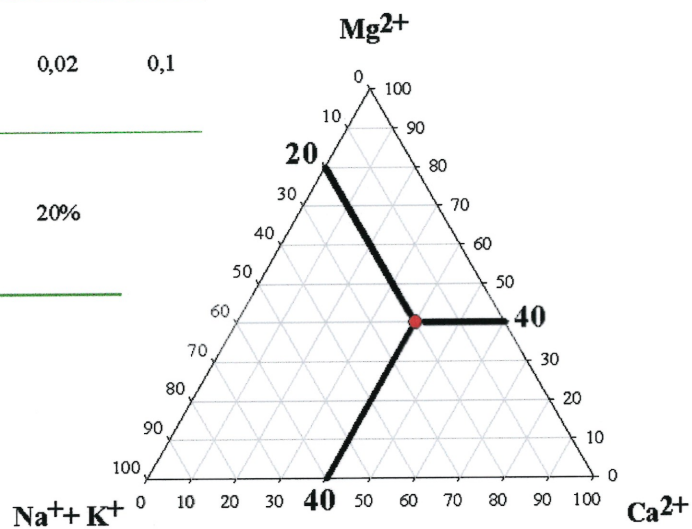


Figure 6-7 : Comment lire un diagramme ternaire.

Ce type de graphique nous a permis de comparer les caractéristiques des eaux des lacs de la base BQMA situés sur chacune des géologies et ce pour chacune des distances de sélection des lacs retenus. Les diagrammes obtenus, sont présentés aux figures 6-8 et 6-9.

Distance de sélection : 0 Km

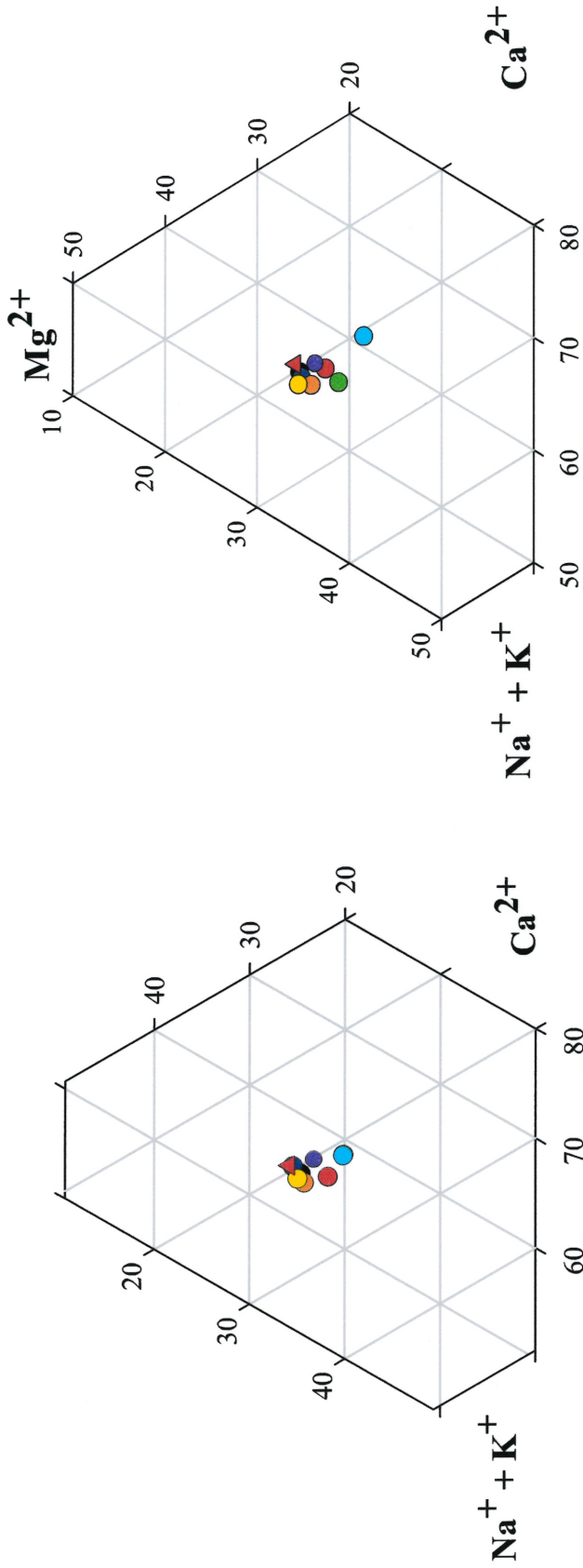
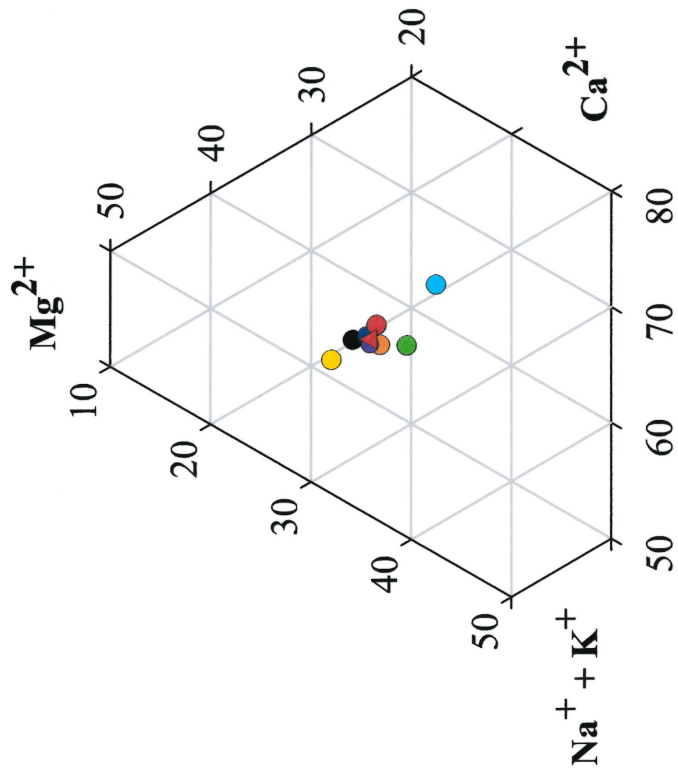
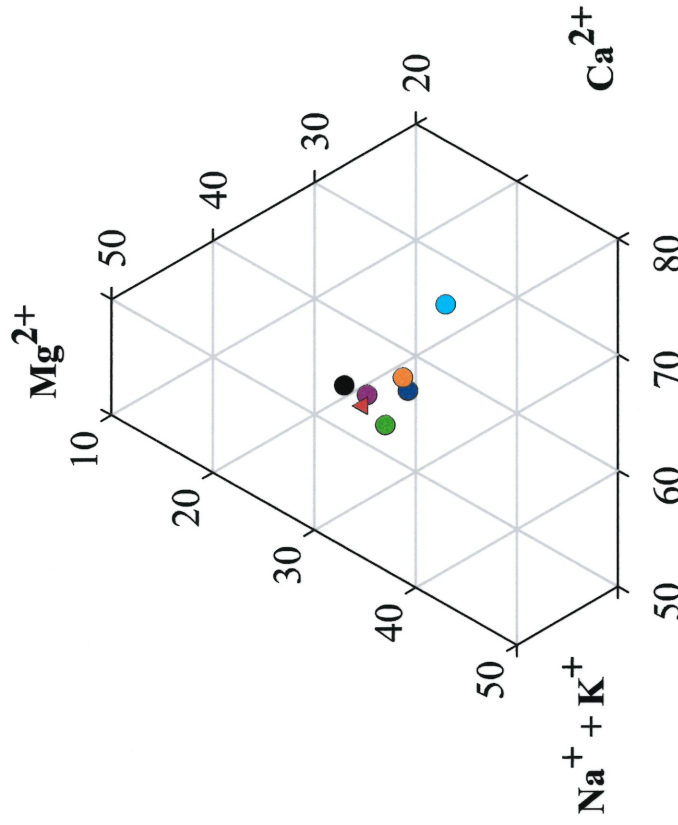


Figure 6-8 : Composition chimique des eaux des lacs en cations majeurs, selon la distance de sélection appliquée pour la base de données BQMA à 0 et 10 Km.

Distance de sélection : 20 Km



Distance de sélection : 30 Km



- Complexe gneissique
- Mangérite
- Gneiss granitique
- Migmatites
- Migmatites - gneiss et paragneiss avec granite
- Migmatites - paragneiss
- Gneiss charnockitique
- Anorthosite
- Granitoïdes

Figure 6-9 : Composition chimique des eaux des lacs en cations majeurs, selon la distance de sélection appliquée pour la base de données BQMA à 20 et 30 Km.

Nous observons qu'avec l'augmentation de la distance de sélection des lacs, la dispersion des points devient plus importante. Ceci indique qu'avec l'augmentation de la distance, les signatures géochimiques de certaines géologies, auparavant masquées, se différencient. La figure 6-9 suggère également qu'à 30 Km, l'effet de l'épanchement des dépôts de surface est encore très sensible et se prolonge probablement au delà de cette distance. Ces résultats semblent bien illustrer l'impact de l'épanchement des dépôts de surface sur la chimie des eaux des lacs. Ils négligent toutefois un aspect d'une importance capitale, dans le cadre de la présente étude. En augmentant la distance de sélection des lacs, les effectifs de ces derniers chutent de façon considérable (tableau III). Or, cette diminution notable de l'effectif de lacs est susceptible de produire une augmentation des marges d'erreurs des données. Les diagrammes ternaires ne donnent aucune information sur ce paramètre dont l'impact est plus que probable. Les données optimales pour la réalisation de cette étude, sont celle qui non seulement manifestent le plus important contraste mais également celles qui ont des intervalles de confiance les plus petits.

Pour déterminer quelles sont les données qui répondent le mieux à ces deux critères, nous avons employé l'analyse de variance. Le tableau III présente, pour chacune des variables de minéralisation et chacune des distances de sélection, le nombre de fois qu'une différence significative entre deux des géologies a été observée.

Distance de sélection	BQMA				RESSALQ			
	0 Km	10 Km	20 Km	30 Km	0 Km	10 Km	20 Km	30 Km
Effectif de lacs	1259	589	342	185	967	400	229	120
Ca ²⁺	3	5	1	4	4	6	5	3
Mg ²⁺	19	15	7	3	16	10	4	3
Na ⁺	10	3	4	1	4	2	0	0
K ⁺	16	14	7	5	11	9	8	3
Alcalinité	12	12	6	5	9	7	5	2
Total	60	49	25	18	44	34	22	11

Tableau III : Comptage du nombre de différences significatives (au seuil de 0,05, par une analyse de variance) entre deux des géologies considérées pour chacune des variables de minéralisation mesurées dans l'eau des lacs et chacune des distances de sélection.

Les résultats présentés au tableau III, permettent d'observer que de façon générale, le nombre de différences significatives ne diminue pas de façon marquée (ou augmente dans le cas du calcium) entre les distances 0 et 10 Km, pour ensuite chuter avec l'augmentation de la distance. Cette observation, ainsi que celles faites pour les figures 6-8 et 6-9, indiquent que :

- L'épanchement des dépôts de surface par les glaciers a un impact sur les signatures géochimiques des géologies pour une distance d'épanchement égale et probablement supérieure à 30 Km (Prichonnet *et al.* ont mis en évidence que cette distance pouvait atteindre entre 40 et 60 Km)
- La distance de sélection des lacs la plus intéressante à appliquer dans le cadre de cette étude est un compromis entre une diminution de l'impact des dépôts de surface et le maintien d'un effectif de lacs suffisant.

À la vue de ceci, nous avons choisi de retenir une distance de 10 Km pour la sélection des lacs. Celle-ci nous permet de maintenir un effectif de lacs suffisant et semble être la distance la plus appropriée pour les deux bases de données (tableau III). De plus, l'effectif de lacs plus important de la base de données BQMA, engendre un nombre de différences significatives plus importantes entre géologies. L'ensemble de ces raisons nous font retenir la base de données BQMA et une distance de sélection des lacs de 10 Km comme étant les plus appropriés aux fins de cette étude. Ces données seront donc utilisées dans la suite de notre recherche⁸.

⁸ Sauf pour les analyses qui requiert l'altitude des lacs. Dans ce cas, les lacs de la base RESSALQ sélectionnés à une distance de 10 Km ont été retenus.

6.8 Les données de terrain

La même méthodologie de préparation des données appliquée aux données des bases BQMA et RESSALQ a été reprise pour les données obtenues au cours de la campagne de terrain en ce qui concerne les balances ioniques et l'élimination des valeurs aberrantes.

En ce qui concerne la sélection des lacs échantillonnés visant à éliminer le problème posé par l'épanchement des dépôts de surface, elle a été menée de façon similaire sur ces données. L'approche a été identique, seule les distances de sélection ont été différentes. Des distances de sélection de 2,5 et 10 Km ont été considérées en plus de la non-application d'une sélection des lacs (distance de 0 Km). L'échelle relativement locale, à laquelle a été menée notre campagne d'échantillonnage, nous a poussé à adapter la distance de sélection de façon à atteindre un nouveau compromis entre sélection et l'effectif des lacs. Les trois distances considérées ont été ensuite comparées entre elles de façon identique à ce que nous avons fait dans le cas des bases de données. Les résultats obtenus par analyse de variance sont consignés dans le tableau IV (seuils de signification).

	0 Km	2 Km	5 Km	10Km
Alcalinité	0,024	0,008	0,028	0,081
pH	0,000	0,000	0,027	0,046
Ca²⁺	0,020	0,008	0,022	0,086
Mg²⁺	0,909	0,463	0,393	0,766
Na⁺	0,044	0,018	0,069	0,313
K⁺	0,181	0,857	0,366	0,345

Tableau IV : Comparaison des distances de sélection des lacs pour la campagne de terrain (seuil de signification de l'analyse de variance réalisée).

Nous observons que les concentrations en ions Mg²⁺ et K⁺ ne présentent pas de différences significatives au seuil de 0,05 pour aucune des trois distances considérées. Pour les variables montrant des différences significatives, la distance de 2 Km semble

être ici, le meilleur compromis entre la minimisation de l'effet des dépôts de surface et le maintien d'un effectif de lacs suffisant. Cette distance sera ultérieurement retenue.

7 RÉSULTATS

7.1 Variabilité de la minéralisation des lacs

Lors de l'exploitation des données de la base RESSALQ, une importante hétérogénéité des concentrations en ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , ainsi qu'en alcalinité, fut mise en évidence (Dupont 1992a) (figure 7-1). Nous avons vérifié si cette observation était aussi valable dans le cas des données de la BQMA. Rappelons que le territoire couvert par ces deux jeux de données est quasi identique, si bien la base de données RESSALQ dessert un territoire plus représentatif que la BQMA, constituée d'échantillonnages locaux spécifiques à un secteur donné.

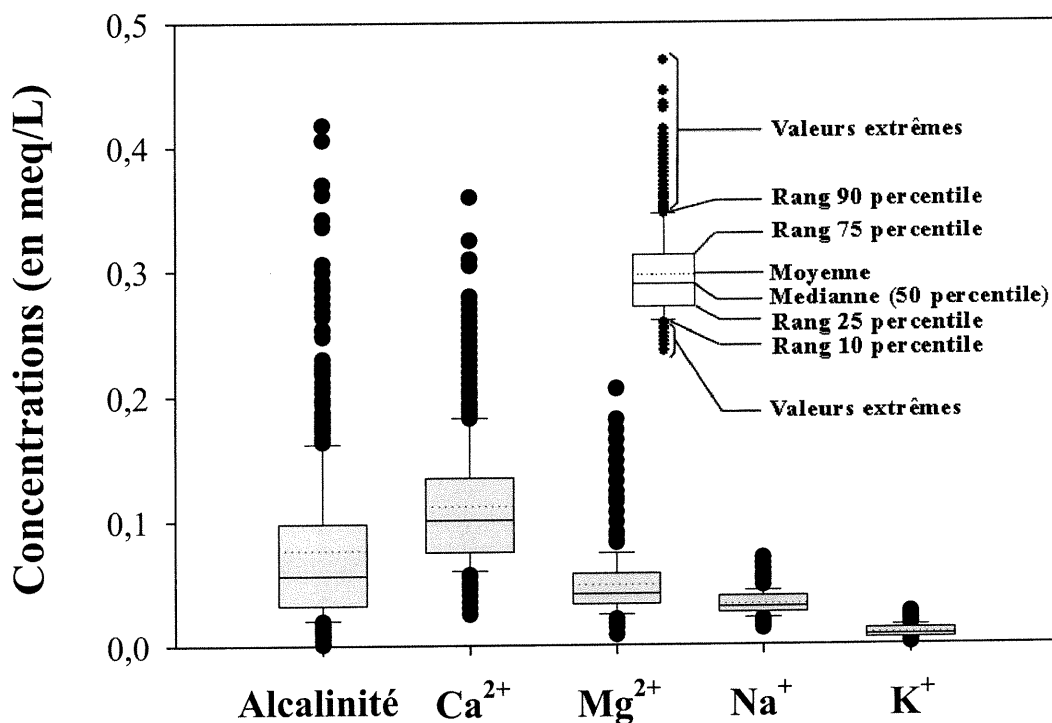


Figure 7-1 : Variabilité des cinq variables dépendantes considérées sur le Bouclier canadien (base de données BQMA).

Les données de la BQMA montrent une grande variabilité dans le cas des concentrations en alcalinité et des ions calcium (Ca^{2+}). Les ions magnésium (Mg^{2+}) se caractérisent par une variabilité intermédiaire entre les facteurs précédemment mentionnés et les

concentrations en ions sodium (Na^+) et potassium (K^+) peu variables. Nous observons que les ions Ca^{2+} sont non seulement l'espèce ionique montrant le plus de variabilité entre les lacs, mais également l'espèce dominante. Ces observations sont en accord avec celles faites sur la base RESSALQ (Dupont 1992a), (Dupont, 1993b).

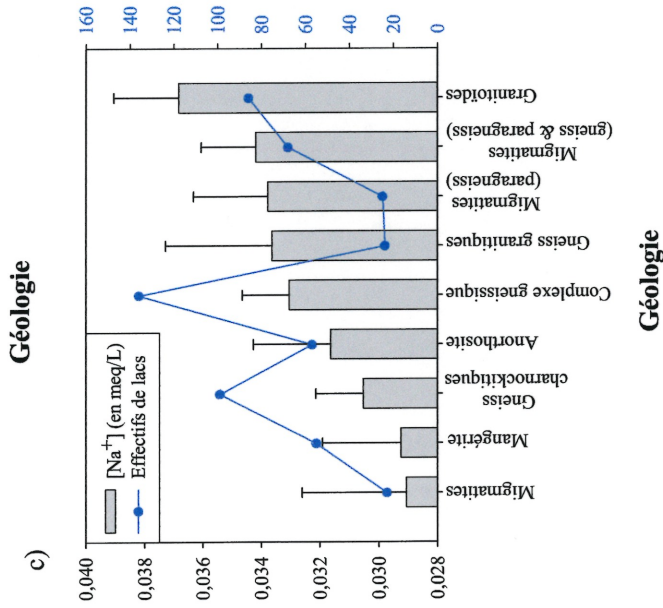
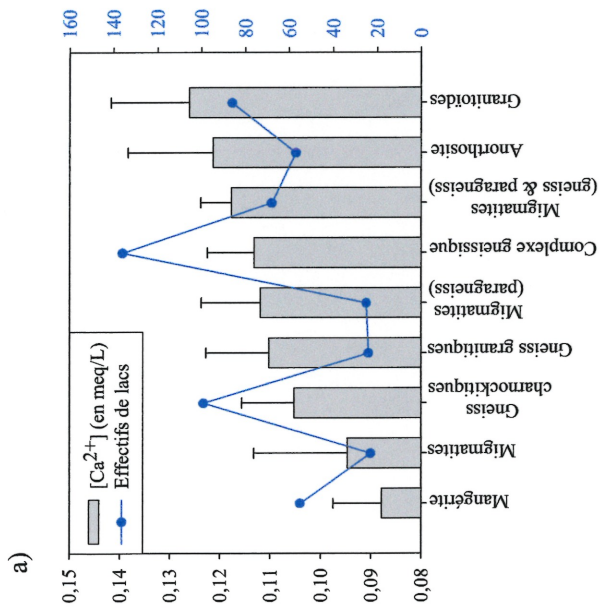
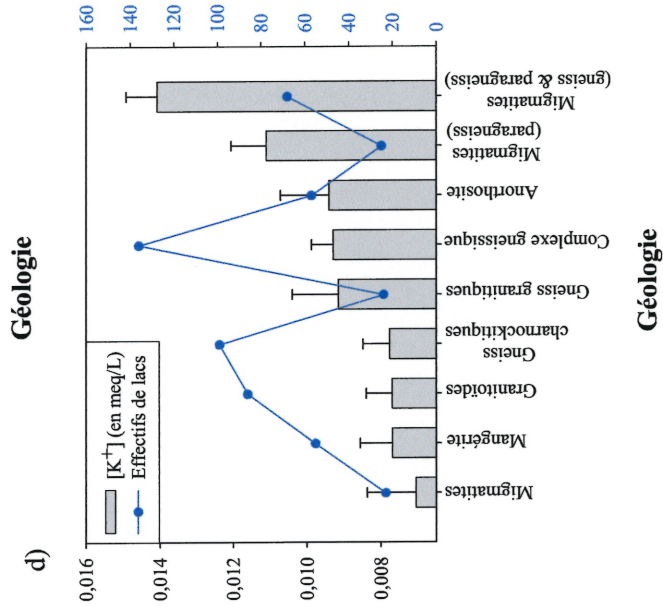
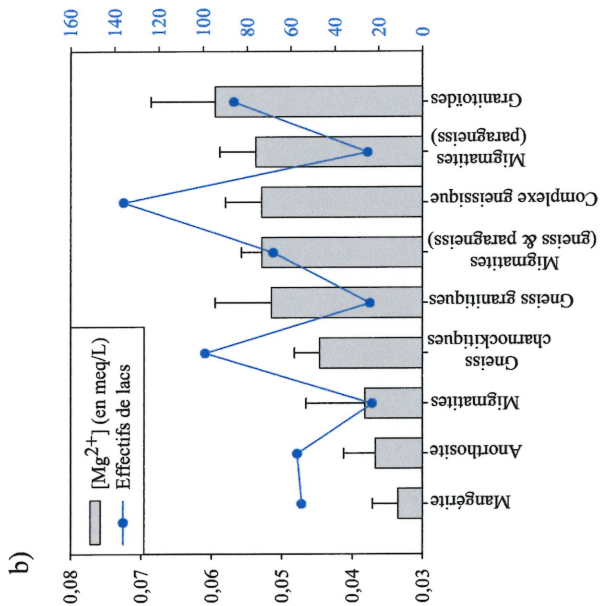
7.2 Concentrations des cations majeurs et géologies

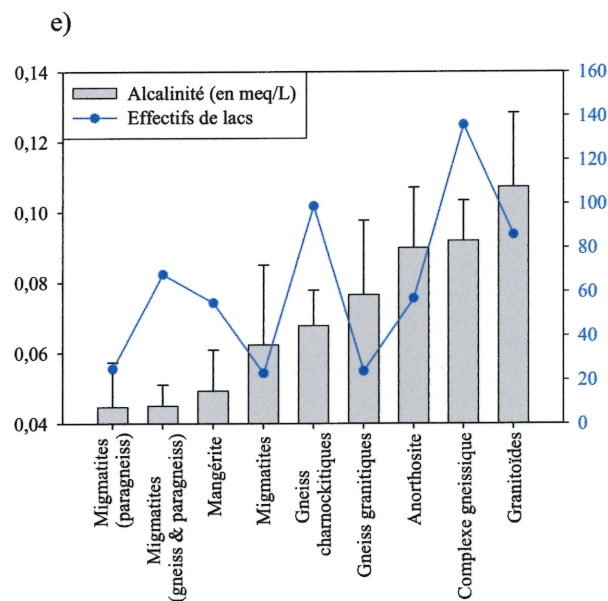
Nous cherchons à expliquer la variabilité observée. À ce propos, l'étude de Bellehumeur et al. (1999a) a mené les auteurs à la conclusion que l'hétérogénéité locale pourrait être la source de cette variabilité accrue. Nous avons cherché à savoir si la géologie de la roche en place (et non celle des dépôts de surface) pouvait, combinée à d'autres facteurs, expliquer en partie l'hétérogénéité locale. Dans ce but, nous avons regroupé les lacs selon la nature géologique de la roche en place qui était sous-jacente. Pour les quatre concentrations de cations majeurs et l'alcalinité, nous avons calculé les moyennes pour chacun des groupes de lacs ainsi que l'intervalle de confiance à 95%. Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'histogrammes aux figures 7.2. L'effectif de lacs correspondant à chacun des groupes de lacs est donné sous forme de courbe, à titre indicatif. Le tableau V présente d'autre part ces résultats sous forme de chiffres en y ajoutant les valeurs maximales et minimales observées ainsi que la variance pour chacun des groupes de lacs.

	Alcalinité			Ca ²⁺			Mg ²⁺					
	Moy.	Min.	Max.	Var.	Moy.	Min.	Max.	Var.	Moy.	Min.	Max.	Var.
Complexe gneissique	0,0919335	0,000999	0,341699	0,0045119	0,1133089	0,024950	0,309380	0,0029587	0,0529134	0,008230	0,205750	0,0009278
Mangérite	0,0492591	0,000999	0,203821	0,0018675	0,0879309	0,049900	0,219560	0,0012543	0,0335152	0,016460	0,074070	0,0001803
Gneiss granitiques	0,0765645	0,011989	0,185836	0,0025115	0,1102738	0,054890	0,179640	0,0008818	0,0514804	0,032920	0,098760	0,0003622
Migmatites	0,0623895	0,000999	0,187835	0,0027415	0,0947060	0,034930	0,194610	0,0018449	0,0382161	0,016460	0,090530	0,0003739
Migmatites (gneiss et paragneiss)	0,0450496	0,001998	0,109903	0,0006153	0,1178219	0,039920	0,184630	0,0006362	0,0528350	0,024690	0,090530	0,0001457
Migmatites (paragneiss)	0,0446940	0,009991	0,158860	0,0009476	0,1119756	0,069860	0,182135	0,0008174	0,0537693	0,024690	0,074070	0,0001538
Gneiss charnockitiques	0,0677513	0,003996	0,285749	0,0025847	0,1052415	0,029940	0,269460	0,0027189	0,0446478	0,016460	0,098760	0,0003164
Anorthosite	0,0899266	0,009991	0,253777	0,0041531	0,1214744	0,034930	0,254490	0,0040704	0,0367342	0,008230	0,068583	0,0002861
Granitoïdes	0,1071940	0,007993	0,417632	0,0097256	0,1262073	0,044910	0,359280	0,0052841	0,0595965	0,016460	0,181060	0,0017731
Toutes géologies confondues	0,0762955	0,000999	0,417632	0,0043247	0,1118265	0,024950	0,359280	0,0028056	0,0484729	0,008230	0,205750	0,0007057

	Na ⁺			K ⁺				
	Moy.,	Min.	Max.	Var.	Moy.	Min.	Max.	Var.
Complexe gneissique	0,0330580	0,013050	0,065250	0,0000889	0,0092964	0,002560	0,020480	0,0000118
Mangérite	0,0292417	0,017400	0,069600	0,0000977	0,0076945	0,002560	0,015360	0,0000102
Gneiss granitiques	0,0336416	0,021750	0,052200	0,0000747	0,0091600	0,005120	0,015360	0,0000086
Migmatites	0,0290604	0,017400	0,052200	0,0000676	0,0070459	0,002560	0,012800	0,0000094
Migmatites (gneiss et paragneiss)	0,0342005	0,021750	0,056550	0,0000602	0,0140849	0,007680	0,025600	0,0000119
Migmatites (paragneiss)	0,0337850	0,021750	0,043500	0,0000381	0,0111104	0,005120	0,013653	0,0000053
Gneiss charnockitiques	0,0305341	0,017400	0,060900	0,0000650	0,0077687	0,002560	0,020480	0,0000128
Anorthosite	0,0316456	0,017400	0,054375	0,0000984	0,0094054	0,002560	0,023040	0,0000245
Granitoïdes	0,0368447	0,017400	0,060900	0,0001059	0,0076982	0,001280	0,018773	0,0000106
Toutes géologies confondues	0,0327468	0,013050	0,069600	0,0000866	0,0091994	0,001280	0,025600	0,0000163

Tableau V : Données présentant pour chacune des variables de minéralisation considérée et chacune des géologies, la valeur moyenne (moy.), minimale (min.), maximale (max.) ainsi que la variance (var.). L'unité est le meq/L.





Géologie

Figure 7-2 : Variation des valeurs d'ions calcium(a), magnésium(b), sodium(c), potassium(d) et de l'alcalinité(e) mesurées dans l'eau des lacs selon la nature géologique de la roche en place⁹.

Nous observons qu'il existe des différences significatives (intervalles de confiance à 95%) entre certaines géologies dans le cas des cinq variables considérées. Nous constatons également que les moyennes des concentrations mesurées dans l'eau des lacs correspondent dans certains cas de façon marquée à la composition minéralogique des géologies considérées (référer à l'annexe 1 en page 78). Ainsi, dans le cas de l'anorthosite, une roche riche en calcium¹⁰, nous observons que les lacs qui lui sont superposés se caractérisent par des plus fortes concentrations moyennes de calcium dans les eaux de surface. À l'extrême opposé du gradient de concentration en ions calcium, nous retrouvons des roches telles que la mangérite. Le même type de gradation et de correspondance peut être observé dans le cas des concentrations des trois autres espèces ioniques.

⁹ Les barres d'erreur présentées correspondent aux intervalles de confiance à 95% et permettent par conséquent de déterminer quelles sont les géologies dont les apports sont statistiquement différents.

¹⁰ La composition chimique de l'anorthosite est donnée par la formule chimique suivante : $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. À titre d'exemple, l'altération par l'eau de l'anorthosite en kaolinite (une argile) se fait comme suit: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Ca}^{2+}$ (Stumm et Wollast 1990).

L'alcalinité est celles des variables pour laquelle nous avons observé les différences de concentrations moyennes les plus marquées. Parmi les neuf géologies considérées, le contraste est net entre les trois se caractérisant par les valeurs d'alcalinité les plus faibles et les trois montrant les valeurs d'alcalinité les plus fortes. Dans ce dernier groupe, nous retrouvons l'anorthosite, alors que la mangérite se retrouve dans le groupe de trois géologies caractérisées par les plus faibles valeurs d'alcalinité. Nous observons que l'effectif des lacs, donné par la courbe sur les graphiques, semble avoir peu d'impact sur l'importance des barres d'erreur. Ceci suggère que le nombre de lacs compris dans les divers groupes est suffisant.

Une autre façon d'illustrer les différences existant entre les géologies pour chacune des variables de minéralisation est obtenue au moyen de l'analyse de variance. Dans le tableau VI, les différences significatives (au seuil de 0,05) existant entre deux géologies¹¹ sont indiquées par une croix.

		<u>Alcalinité</u>								
		G1	G2	G4	G8	S9	G12	G20	G20A	G20B
<u>Calcium</u>	G1	-		X			X		X	X
	G2		-							
	G4			-	X				X	
	G8				-		X		X	X
	S9					-	X		X	X
	G12	X			X	X	-			
	G20							-		
	G20A						X		-	
	G20B						X			-

		<u>Potassium</u>								
		G1	G2	G4	G8	S9	G12	G20	G20A	G20B
<u>Magnésium</u>	G1	-		X		X			X	X
	G2		-						X	
	G4			-					X	X
	G8	X	X		-				X	
	S9				X	-			X	X
	G12	X	X	X		X	-		X	X

¹¹ Consulter l'annexe à la page 78, pour avoir les noms des géologies dont les sigles sont données au tableau VI.

	<u>Sodium</u>								
	G1	G2	G4	G8	S9	G12	G20	G20A	G20B
G20					X		-	X	X
G20A			X	X			X	X	-
G20B				X			X	X	-
G1	-								
G2		-							
G4			-		X				
G8				-					
S9					-	X	X		
G12						-			
G20							-		
G20A								-	
G20B									-

Tableau VI : Géologies significativement différentes (X) pour chacune des variables de minéralisation.

L'observation de ces résultats semble confirmer ce que les histogrammes de la figure 7-2 avançaient déjà. À savoir que parmi les neuf géologies prises en considération par cette étude, certaines confèrent des signatures géochimiques significativement différentes aux eaux de surface. De plus, en se référant à l'annexe 1, l'impact des différences dans la composition minéralogiques des géologies sur la composition chimique des eaux de surface semble assez claire. Les résultats présentés dans les figures 7-3 à 7-6 ont pour but de compléter ces observations. Ces figures présentent les groupements réalisés au moyen de l'analyse de variance couplée à un test de comparaison multiple de plages de variation. Pour chacune des variables de minéralisation, des groupes de géologies ont été définis. Les lignes de croix indiquent dans chaque colonne (groupe) les géologies appartenant à un même groupe. Les groupes ainsi obtenus sont :

a)

Alcalinité

Hochberg					
GEOL	N	Subset for alpha = ,05			
		1	2	3	4
Migmatites (paragneiss)	25	*****			
Migmatites (gneiss et paragneiss)	68	*****			
Mangérite	55	*****	*****		
Migmatites	23	*****	*****	*****	
Gneiss charnockitiques	99	*****	*****	*****	*****
Gneiss granitiques	24	*****	*****	*****	*****
Anorthosite	57		*****	*****	*****
Complexe gneissique	136			*****	*****
Granitoïdes	86				*****
Sig.		,361	,057	,564	,141

b)

Ions calcium

Hochberg			
GEOL	N	Subset for alpha = ,05	
		1	2
Mangérite	56	*****	
Migmatites	24	*****	*****
Gneiss charnockitiques	100	*****	*****
Gneiss granitiques	24	*****	*****
Migmatites (paragneiss)	25	*****	*****
Complexe gneissique	143	*****	*****
Migmatites (gneiss et paragneiss)	69	*****	*****
Anorthosite	57	*****	*****
Granitoïdes	88		*****
Sig.		,085	,166

c)

Ions magnésium

Hochberg

GEOL	N	Subset for alpha = ,05			
		1	2	3	4
Mangérite	53	*****			
Anorthosite	57	*****	*****		
Migmatites	24	*****	*****	*****	
Gneiss charnockitiques	100	*****	*****	*****	*****
Gneiss granitiques	24		*****	*****	*****
Complexe gneissique	139		*****	*****	*****
Migmatites (gneiss et paragneiss)	69		*****	*****	*****
Migmatites (paragneiss)	25			*****	*****
Granitoïdes	87				*****
Sig.		,710	,074	,102	,222

d)

Ions sodium

Hochberg

GEOL	N	Subset for alpha = ,05	
		1	2
Migmatites	24	*****	
Mangérite	51	*****	
Gneiss charnockitiques	101	*****	
Anorthosite	57	*****	*****
Complexe gneissique	144	*****	*****
Gneiss granitiques	23	*****	*****
Migmatites (paragneiss)	25	*****	*****
Migmatites (gneiss et paragneiss)	67	*****	*****
Granitoïdes	89		*****
Sig.		,246	,234

e)

Ions potassium

Hochberg				
GEOL	N	Subset for alpha = ,05		
		1	2	3
Migmatites	24	*****		
Mangérite	53	*****		
Granitoïdes	89	*****		
Gneiss charnockitiques	101	*****		
Gneiss granitiques	24	*****	*****	
Complexe gneissique	143	*****	*****	
Anorthosite	57	*****	*****	
Migmatites (paragneiss)	25		*****	
Migmatites (gneiss et paragneiss)	69			*****
Sig.		,058	,279	1,000

Figure 7-3 : Groupes de géologies définis par l'analyse de variance et le test de Hochberg selon les concentrations en alcalinité (a), ions Ca^{2+} (b), Mg^{2+} (c), Na^+ (d), et K^+ (e) mesurées dans les eaux des lacs.

Tous les groupements présentés à la figure 7-3 ont des niveaux de signification supérieurs à 0,05, ce qui nous indique qu'ils sont significativement différents. Nous observons que le nombre de groupes de géologies formés varie entre 2 et 4 selon la variable de minéralisation considérée. À l'instar de nos observations précédentes, nous remarquons que la composition des groupes de géologies formés varie de façon très importante selon l'espèce chimique considérée.

Les résultats présentés jusqu'à présent semblent tous montrer des différences significatives entre certaines géologies et pourraient même permettre de faire des regroupements parmi celles-ci. Ils peuvent toutefois s'avérer trompeurs. En effet, étant donnée l'étendue du territoire couvert par cette étude, nous pouvons nous demander quel rôle joue la variabilité d'origine purement géographique dans les différences observées. Des différences dans les précipitations, la température ou l'évapotranspiration sont des exemples de sources de variation que nous nommons géographiques.

7.3 Ratios de cations

Pour répondre au problème susmentionné (interférences produite par les sources de variabilité géographique), il nous a fallu trouver un moyen d'éliminer son effet sur les mesures. Considérer les quotients de deux cations peut être un moyen d'atteindre cet objectif. L'impact du ruissellement (précipitations et évapotranspiration) se manifesterait essentiellement sous la forme d'un phénomène de dilution ou de concentration des espèces ioniques mesurées. Ces phénomènes affectant de la même façon toutes les concentrations, n'importe lequel de leur quotient élimine la composante géographique de la variabilité.

De façon analogue aux histogrammes du point précédent, nous avons représenté les moyennes des quotients pour les lacs regroupés par géologie. Nous avons également, dans ce cas, indiqué le nombre de lacs considérés pour chaque géologie sous la forme d'une courbe.

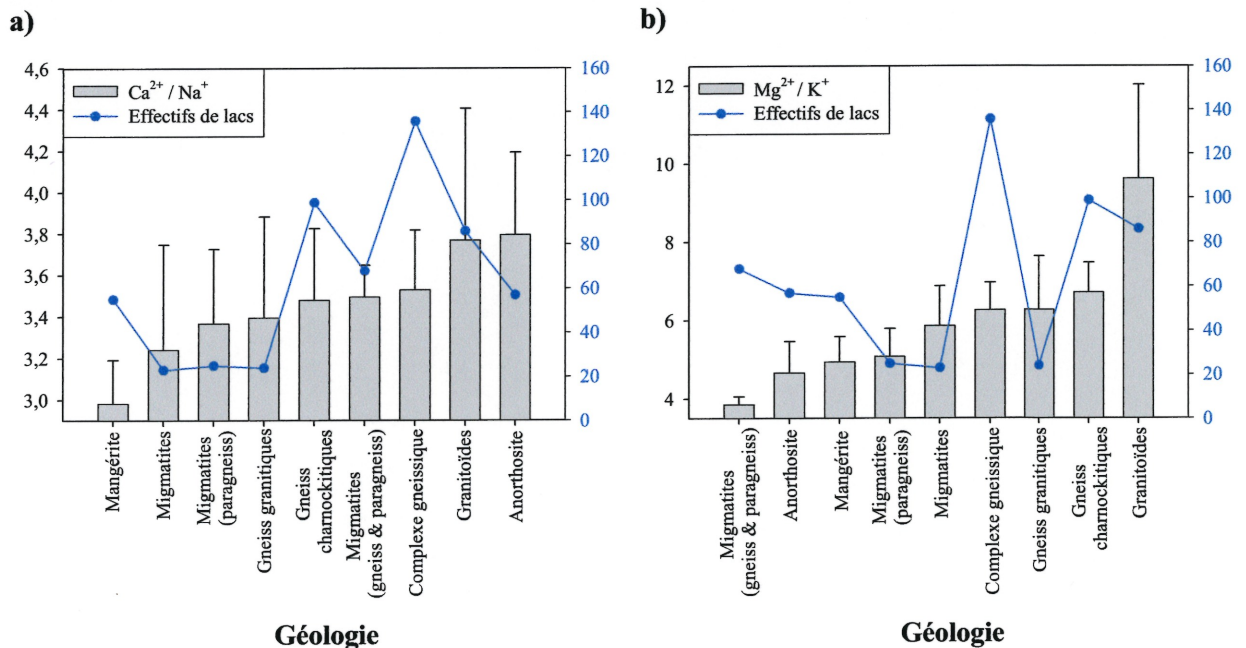


Figure 7-4 : Variation des ratios de cations majeurs, Ca²⁺/Na⁺(a) et Mg²⁺/K⁺(b) mesurés dans l'eau des lacs selon la nature géologique du sol qui leur est sous-jacent.

L'interprétation des ratios de cations peut s'avérer compliquée lorsque considérée par rapport à une géologie particulière. Nous nous proposons donc de n'utiliser ces résultats que pour tenter de mettre en évidence des différences. Les figures 7-4 (a) et (b) montrent qu'il existe des différences significatives entre les ratios de cations pour certaines des géologies. Ces résultats semblent donc confirmer l'existence d'une composante non liée à la variabilité géographique dans les différences observées entre certaines géologies pour les cinq variables de minéralisation considérées.

7.4 Impact des variables explicatives sur chacune des concentrations

Jusqu'à présent, les résultats obtenus suggèrent que certaines géologies donnent aux eaux lacustres des signatures géochimiques particulières. Toutefois, l'importance absolue et relative (par rapport à d'autres sources de variations telles que les dépôts acides, l'altitude, etc.) de cet impact reste inconnue. Dans le but de nous faire une idée à la fois plus globale et précise, nous avons étudié les relations existant entre chacune des variables de minéralisation (alcalinité, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ ; K^+) et cinq sources de variation (sulfate et nitrate mesurés dans l'eau des lacs, altitude, ruissellement et géologie).

Pour ce, nous avons employé des régressions multiples linéaires de type I, définissant les variables de minéralisation comme variables dépendantes et les facteurs de variation comme variables explicatives. Les variables explicatives prises en considération ont été : les neuf géologies sous forme de variables binaires, les concentrations en sulfate et nitrate mesurées dans les eaux des lacs, l'altitude et le ruissellement. Le pourcentage de variation de la variable dépendante expliqué par les variables explicatives (R^2) pour chacun des modèles de régression retenus, est consigné dans le tableau VII. Il faut noter que le pourcentage attribué à la géologie correspond à une somme des pourcentages des géologies prises en considération par le modèle. Le détail de la participation des diverses classes géologiques sera présenté après dans le tableau VIII.

	R ²	% géologie	% sulfate	% nitrate	% altitude	% ruissellement
Alcalinité	10,9	10 (+)			1 (-)	
Ca ²⁺	16,9	3 (+)	1 (+)	2 (+)	10 (-)	1 (-)
Mg ²⁺	15,5	5 (-)			2 (+)	9 (+)
Na ⁺	13,3	1 (-)			9 (-)	3 (-)
K ⁺	31,4	10 (+)	17 (+)	3 (+)	1 (-)	

Tableau VII : R² associés à chacune des régressions multiples réalisées sur les variables dépendantes¹². Les signes + et – donné entre parenthèses indiquent la nature de l'influence de la variable explicative sur la variable dépendante. Ainsi un signe + indique une influence positive alors qu'un signe – traduira une influence négative. Tous les résultats présentés dans ce tableau sont significatifs au seuil de 0,05¹³.

Le tableau VII présente les résultats globaux des modèles de régression retenus. Il nous permet ainsi de connaître le pourcentage de variabilité expliqué, de même que la variabilité expliquée de façon individuelle par les facteurs de variation retenus par le modèle ainsi que le sens de leur influence. Nous observons que les pourcentages de variabilité expliqué par les 13 variables explicatives varient entre environ 10% et 30%. Nous observons que dans le cas de l'alcalinité, la géologie apparaît comme ayant l'impact le plus important.

Nous avons consigné dans le tableau VIII les pourcentages de variabilité expliqués par les facteurs comme étant significatifs au seuil de 0,1. Ces valeurs ne sont pas associées au modèle final de la régression et ne constituent qu'une manière de comparer l'impact des divers facteurs de variation sur la variable de minéralisation considérée. La colonne notée « influence » contient le signe associé à chacun des facteurs explicatifs dans l'équation de la régression. Les facteurs non représentés ont été ignorés car ils ne sont pas significatifs au seuil retenu et/ou ont une participation nulle à l'explication de la variabilité de la minéralisation. Nous précisons que ces données sont présentées dans le

¹² Les pourcentages de variabilité expliquée sont des pourcentages absolus et sont arrondis à l'entier.

¹³ Bien que les embruns marins soient susceptibles d'avoir un impact sur les concentrations de cations considérées, nous avons choisi d'ignorer cet effet pour la suivante raison. Un test de corrélation de Pearson nous a permis de déterminer que si bien les concentrations en ions Cl⁻ (utilisée comme indicateur de l'importance de l'apport ionique d'origine marine) apparaissent comme étant négativement corrélé avec la latitude et la distance du lac à la mer, ces corrélations sont faibles (inférieures à 13% et 10% respectivement). Notre avis est qu'il reste important de garder en mémoire ces résultats, le risque de l'impact hasardeux d'une éventuelle correction des concentrations ioniques étudiés ne nous semble pas justifié.

but de faciliter la compréhension des processus étudiés et non avec l'ambition d'être des modèles numériques à appliquer.

Variables dépendantes	Variables explicatives	% associés	Influence
Alcalinité	Granitoïdes	5	+
	Altitude	3	-
	Gneiss charnockitiques	1	-
	Migmatites (gneiss & paragneiss)	1	-
	Mangérite	1	-
	Complexe gneissique	1	+
	Migmatites (paragneiss)	1	-
	Sulfate	1	-
Ca ²⁺	Altitude	10	-
	Ruissellement	6	-
	Sulfate	4	+
	Granitoïdes	3	+
	Gneiss charnockitiques	2	-
	Mangérite	2	-
	Nitrate	1	+
	Migmatites	1	-
Mg ²⁺	Ruissellement	9	-
	Altitude	7	-
	Granitoïdes	4	+
	Anorthosite	2	-
	Mangérite	2	-
	Sulfate	2	+
	Gneiss charnockitiques	1	-
	Complexe gneissique	1	+
Na ⁺	Altitude	9	-
	Ruissellement	6	-
	Granitoïdes	3	+
	Sulfate	3	+
	Mangérite	2	-
	Gneiss charnockitiques	2	-
	Nitrate	1	+
	Migmatites	1	-

Variables dépendantes	Variables explicatives	% associés	Influence
K ⁺	Sulfate	17	+
	Migmatites (gneiss & paragneiss)	14	+
	Ruissellement	9	-
	Altitude	6	-
	Nitrate	4	+
	Gneiss charnockitiques	3	-
	Granitoïdes	3	-
	Migmatites (paragneiss)	2	+
	Migmatites	1	-
	Mangérite	1	-

Tableau VIII : Contributions relatives des variables explicatives aux modèles des régressions multiples. Le sens de l'influence des variables explicatives sur les variables dépendantes est donné par les signes + (corrélation positive) et - (corrélation négative).

L'observation des résultats présentés dans le tableau ci-dessus est à même de nous permettre de déterminer l'impact des divers facteurs de variation sur la composition chimique de l'eau des lacs. Nous remarquons que deux des facteurs de variation régionaux que nous avons retenus, le sulfate (proportionnel aux concentrations ioniques) et le ruissellement (inversement proportionnel), se retrouvent de façon quasi systématique parmi les variables ayant les impacts les plus importants. Nous observons que le sulfate est positivement corrélé aux concentrations ioniques considérées, mais négativement corrélé aux valeurs d'alcalinité. D'un part, ceci semble être lié à son influence comme facteur d'altération des minéraux et, d'autre part, à son impact sur la capacité de neutralisation. L'altitude, exception faite du cas de la concentration en ions potassium, semble également jouer un rôle de premier plan, en étant inversement proportionnelle aux concentrations ioniques mesurées. Bien que la prise en considération de l'altitude repose plus sur son impact local dans le cadre de cette étude, les valeurs importantes que cette variable semblent avoir dans le tableau VIII, répondent sans doute, en partie, à une corrélation existant entre le ruissellement et l'altitude¹⁴ (corrélation de 37%, selon un test de corrélation de Pearson). Le tableau VII semble confirmer cette hypothèse puisque

¹⁴ En effet l'altitude influence le ruissellement de deux façons. Lorsque l'altitude augmente, les précipitations augmentent et l'évapotranspiration diminue

nous observons que pour une variable dépendante, l'importance de ces deux facteurs de variation est inversement proportionnelle. L'apparente indépendance de l'alcalinité vis à vis du ruissellement n'est sans doute qu'un reflet de la corrélation mentionnée.

La concentration en sulfate mesurée dans l'eau des lacs se retrouve de façon régulière parmi les facteurs explicatifs significatifs. L'importance de son impact est variable selon le facteur de minéralisation considéré, mais semble toujours être positivement corrélée aux concentrations ioniques. Son effet est très important dans le cas des ions K^+ , mais se retrouve de façon plus générale en arrière plan. L'impact de la concentration en nitrate de l'eau des lacs, autre variable pouvant révéler l'acidification d'origine anthropique, est, selon nos résultats, quasi marginal. Ceci correspond à ce qui est généralement observé, à savoir, que l'azote est dans sa majeure partie retenu dans les sols par rétention physique ou assimilation au niveau des plantes et des micro-organismes. Seul son effet sur la concentration en ions K^+ semble être digne de mention (corrélation positive).

Les résultats du tableau VIII confirment ce que nous avons auparavant observé au tableau VII; à savoir que l'impact de la géologie est variable, mais présent pour l'ensemble des variables de minéralisation. Sur les neuf classes géologiques considérées initialement par l'étude, huit apparaissent comme facteurs explicatifs pour au moins une des variables de minéralisation. Au sein de ce groupe de huit géologies, des différences substantielles semblent exister. Ainsi, trois des géologies (granitoïdes, gneiss charnockitiques, mangérite) semblent être à même d'expliquer une part de la variation de chacune des variables de minéralisation. Selon les résultats obtenus pour ces trois géologies, les granitoïdes représentent la géologie la plus caractéristique (gneiss charnockitiques et mangérite sont respectivement les suivantes). D'autres géologies, telles que les différentes classes de migmatites et le complexe gneissique, se trouvent liées à deux ou trois des variables de minéralisation. L'anorthosite ne semble, quand à elle, constituer un facteur explicatif de variabilité que dans le cas des ions Mg^{2+} . L'observation de ces résultats doit toutefois se faire en gardant à l'esprit que la présence de géologies non caractéristiques parmi les neuf classes géologiques retenues, masque partiellement dans une analyse telle que celle-ci, la réponse des géologies

caractéristiques. Cet effet est probablement responsable du fait que cette analyse statistique échoue à mettre en lumière l'impact très probable d'une géologie telle que l'anorthosite sur la chimie des eaux.

7.5 Modèle global de la chimie des eaux à partir des facteurs abiotiques considérés

L'analyse canonique de redondance nous permet de mettre en relation les variables abiotiques prises en considération avec l'ensemble des variables de minéralisation en un seul modèle. Les premiers résultats que nous présentons donnent une ordination des lacs en deux dimensions. Cette ordination exprime la plus grande part possible de la variabilité des données d'origine (les cinq variables de minéralisation) et se fait de plus sous la contrainte des variables sur lesquelles elle est régressée (les variables explicatives).

Sur le graphique utilisé, les lacs sont représentés par des points dont la couleur indique la nature géologique des sols sur lesquels ils reposent. Les deux axes (notés axes 1 et 2) sont les deux premiers axes canoniques obtenus lors de l'analyse. Rappelons que ces axes n'ont pas de réalité physique et donc pas d'unités. Le pourcentage associé à chacun de ces axes sur la figure 7-5, nous indique la variabilité initiale des données expliquée par cet axe. L'addition des variabilités exprimées par les deux axes, nous donne la part de variabilité exprimée par cette représentation graphique.

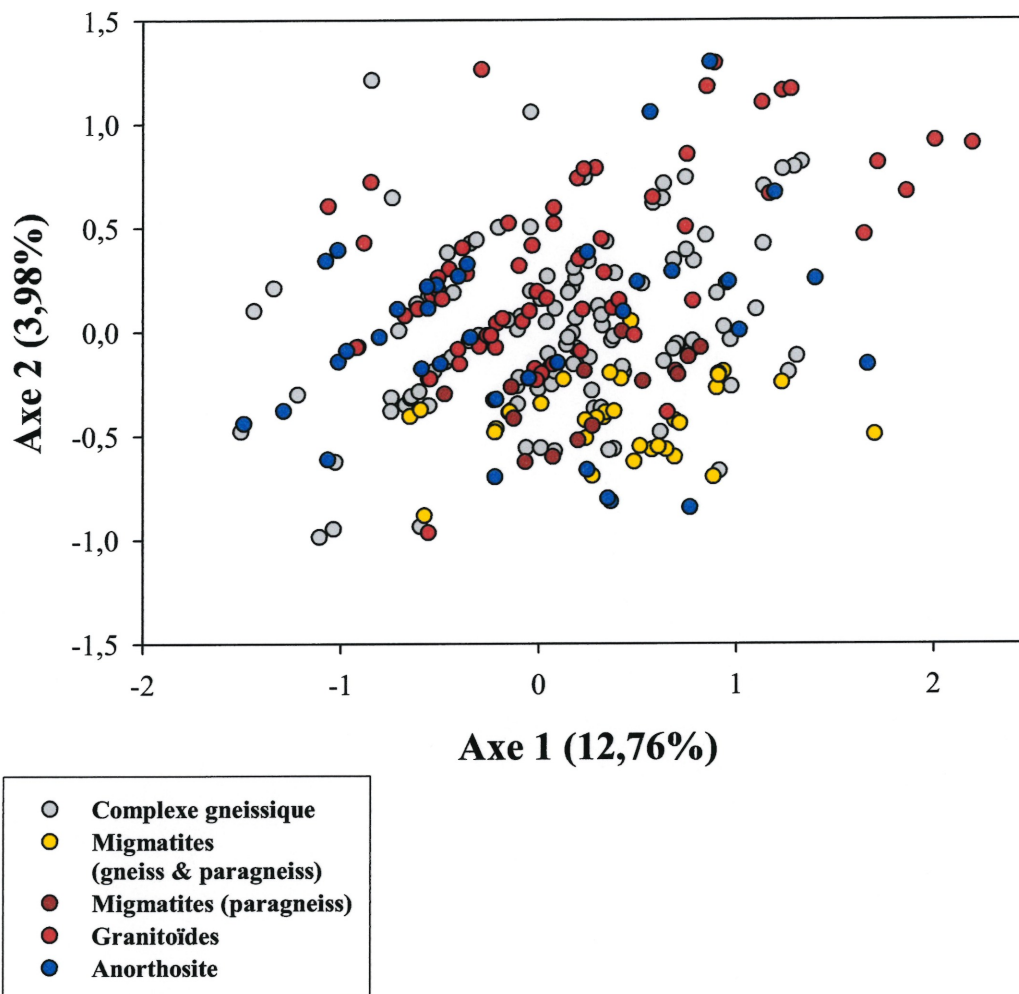


Figure 7-5 : Ordination des lacs obtenue au moyen de l'analyse canonique de redondance.¹⁵

L'ordination des lacs présentée est obtenue sur la base de l'information contenue par les cinq variables dépendantes et les treize variables explicatives considérées. Elle exprime 16,74% de la variabilité de la minéralisation des lacs telle qu'appréhendée sur la base des cinq variables dépendantes considérées. La répartition des points de couleur sur la figure 7-5, semble mettre en évidence le regroupement de certains lacs selon la géologie sur laquelle ils reposent. Nous observons en particulier une délimitation assez nette entre les

¹⁵ De façon à améliorer la lisibilité de l'ordination des lacs produite par l'analyse canonique de redondance, nous avons choisi de ne représenter que les lacs reposant sur des géologies retenues par cette analyse pour leur impact significatif. Notons également que les deux composantes principales représentées sont statistiquement significatives.

divers groupes de migmatites et les granitoïdes. Les lacs reposant sur l'anorthosite et le complexe gneissique se trouvent répartis de façon moins groupée. Le manque de netteté des résultats présentés à la figure 7-5, qui s'explique par le pourcentage relativement faible de variabilité exprimée, confirme que les sources de variation prises en considération dans cette étude, génèrent une partie de l'hétérogénéité, mais ne sont pas les principaux déterminants de la composition chimique des eaux des lacs. Nous pourrions citer comme exemples des facteurs d'ordre biologique ou des facteurs liés à la topographie des bassins versants des lacs.

L'analyse canonique de redondance nous permet également de mettre en relation les effets des variables dépendantes et explicatives. Ces résultats sont présentés à la figure 7-6. Les différentes variables se présentent toutes sous forme de vecteurs partant de l'origine (0,0). La représentation des variables dépendantes sous forme ponctuelle, ne répond qu'à des impératifs de lisibilité. Les relations entre deux variables sont données par l'angle existant entre les vecteurs les représentant. Ainsi, deux variables ayant des vecteurs à angle droit seront indépendantes, alors que, si leurs vecteurs forment un angle à 180°, ces deux variables auront des effets opposés. D'autre part, la longueur des vecteurs détermine l'importance relative des variables.

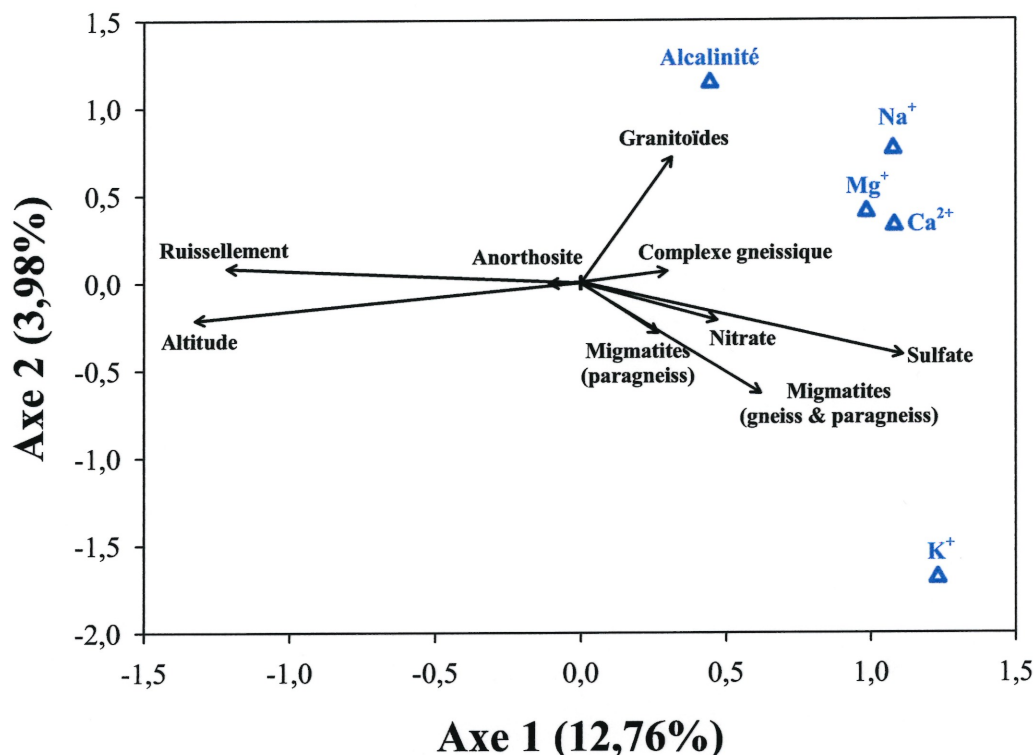


Figure 7-6¹⁶ : Importance et influence des variables explicatives par rapport aux variables dépendantes.

Nous observons que le premier axe canonique semble faire ressortir le rôle des facteurs favorisant la minéralisation des eaux par altération chimique des minéraux (temps de contact de l'eau dans les sols en particulier). Ainsi, cet axe ségrège les eaux des lacs selon leur minéralisation. Nous retrouvons ainsi toutes les variables de minéralisation sur la partie positive de cet axe. Inversement, l'altitude et le ruissellement se retrouvent sur la partie négative. Le deuxième axe canonique semble correspondre à un axe représentant la sensibilité des eaux des lacs aux phénomènes d'acidification. L'angle quasi droit observé entre les vecteurs représentant l'alcalinité et les sulfates, qui traduirait l'indépendance de ces deux variables, suggère l'existence de phénomènes non considérés au rôle prédominant à cette échelle. Les cations majeurs, ainsi que l'alcalinité

¹⁶ Pour permettre que la visibilité de la figure 7-5 soit la plus satisfaisante possible, la longueur des vecteurs propres (variables explicatives) a été multipliée par cinq. D'autre part et toujours dans le même but les cinq vecteurs les plus proches de l'origine sont représentés sur la section b) de la figure 7-5.

se retrouvent dans le positif de l'axe, alors que les ions K^+ (le moins abondant des cations considérés) ainsi que les concentrations en sulfate et en nitrate se trouvent sur la partie négative. Nous observons, d'autre part, que les granitoïdes représentent la géologie ayant l'impact le plus positif sur l'alcalinité. Le rôle prédominant du ruissellement et de l'altitude comme facteur de variation est, comme dans les régressions multiples, mis en évidence. Les impacts du sulfate et de la géologie, moins importants, se manifestent toutefois de façon nette. L'apparente corrélation positive de la concentration en sulfate avec les concentrations en cations majeurs est intéressante à remarquer. Le positionnement du vecteur représentant la concentration en ions K^+ nous semble également à noter. Comme dans le cas des régressions multiples, il est probable que certaines géologies ayant des signatures géochimiques semblables masquent les effets d'autres géologies dont les influences sont plus distinctes. Il en va ainsi pour l'effet de l'anorthosite, qui se trouve négativement et faiblement corrélée aux concentrations ioniques, ce qui semble assez paradoxal à la lumière des résultats présentés précédemment. Nous pensons que la disposition éparse ainsi que la taille réduite des affleurements d'anorthosite sont susceptibles de favoriser que sa signature géochimique soit masqué par celle d'autres géologies situés en amont dans le sens du mouvement des glaciers.

7.6 Comparaison de deux géologies

Jusqu'à présent, les résultats que nous avons exposés sont issus de bases de données couvrant un large territoire; ceci nous a permis de nous faire une idée générale de l'impact des facteurs de variation considérés sur la chimie des eaux des lacs situés sur le Bouclier canadien. Toutefois, outre la complexité que comporte l'étude de sources d'hétérogénéité à si grande échelle, les bases de données utilisées comportent, elles mêmes, certaines limites. Par la suite, nous allons comparer deux géologies, sur un territoire plus réduit en n'employant à cette fin que des lacs de tête. Les détails de l'emplacement des lacs étudiés sont consignés dans le tableau IX ci-après.

Nom	Géologie	Latitude	Longitude
Lac Charette	Gneiss charnockitique	46,23460	-74,13963
Lac du bois franc	Gneiss charnockitique	46,45098	-74,32165
Lac au foin	Gneiss charnockitique	46,42088	-74,09680
Lac Fromin	Gneiss charnockitique	46,43625	-74,30697
Lac Heart	Gneiss charnockitique	46,41477	-74,09747
Lac de la tête de Pimbina	Gneiss charnockitique	46,46128	-74,35228
Lac Millette	Gneiss charnockitique	45,87983	-74,49005
Lac SND	Gneiss charnockitique	46,27347	-74,19070
Lac Violon	Gneiss charnockitique	46,21530	-74,16078
Lac à l'Ours	Anorthosite	46,13875	-74,04833
Lac Cloutier	Anorthosite	46,18215	-74,23567
Lac Limoges	Anorthosite	46,18245	-74,22607
Lac Quévillon	Anorthosite	45,99787	-74,09775
Lac Alice	Anorthosite	46,03113	-74,13017
Lac Caché	Anorthosite	46,17825	-74,32797
Lac O'Rich	Anorthosite	46,13857	-74,43277
Lac Noir	Anorthosite	45,98267	-74,01588
Lac des Sables	Anorthosite	45,95363	-74,02447
Lac SNB	Anorthosite	46,14257	-74,22867
Lac Casseau	Anorthosite	46,11765	-74,07325
Lac SN06	Anorthosite	45,94633	-74,08502
Lac Violon	Anorthosite	45,94183	-74,09162
Lac SNC	Anorthosite	46,12677	-74,39040
Lac à la brume	Anorthosite	46,08523	-74,37740
Lac en poudre	Anorthosite	46,02000	-74,34882
Lac Pauvre	Anorthosite	46,01858	-74,36502
Lac du Gore	Anorthosite	46,00605	-74,25662
Lac Dubuc	Anorthosite	45,99817	-74,38512
Lac SN30	Anorthosite	45,98905	-74,23797
Lac SN07	Anorthosite	45,97757	-74,40542
Lac Valiquet	Anorthosite	45,99102	-74,33340
Lac SNA	Anorthosite	46,15672	-74,01037
Lac à May I	Anorthosite	46,14290	-74,03202
Lac à May II	Anorthosite	46,14312	-74,02655
Lac Carré	Anorthosite	45,95848	-74,37655
Lac de la montagne	Anorthosite	45,94567	-74,26117
Petit lac vert	Anorthosite	45,94465	-74,27197
Lac Croche	Anorthosite	45,98883	-74,00583

Tableau IX: Données physiques sur l'identification la localisation et la nature géologique de la roche mère sous-jacente aux trente huit lacs échantillonnés.

Nous allons commencer par la comparaison de quelques unes des variables de minéralisation mesurées en fonction de la composition géologique de la roche mère sur laquelle reposent les lacs.

Nom	pH	Alcalinité	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Lac Charette	6,20	0,130376	0,031755	0,000870	0,057857	0,144560	0,000354	0,028434
Lac du bois franc	5,67	0,025444	0,022925	0,003635	0,023291	0,067914	0,000177	0,025480
Lac au foin	5,15	0,007596	0,024491	0,004454	0,032920	0,062425	0,000000	0,033259
Lac Fromin	5,10	-0,005668	0,020184	0,002176	0,015472	0,043164	0,001336	0,023878
Lac Heart	5,69	0,043701	0,030363	0,004045	0,047076	0,083383	0,000258	0,029598
Lac de la tête de Pimbina	6,19	0,015996	0,022925	0,002893	0,026089	0,061028	0,000000	0,023234
Lac Millette	6,05	0,055830	0,029624	0,008755	0,038105	0,096107	0,002045	0,025376
Lac SND	5,63	0,013806	0,024752	0,001587	0,027571	0,056986	0,000225	0,026811
Lac Violon	6,13	0,026928	0,028841	0,003021	0,033496	0,071607	0,000869	0,020717
Lac à l'Ours	5,88	0,071062	0,026448	0,007117	0,035554	0,093463	0,000708	0,026541
Lac Cloutier	5,50	0,017910	0,017096	0,001946	0,023702	0,046457	0,000000	0,017555
Lac Limoges	5,94	0,130454	0,040107	0,004787	0,082958	0,135978	0,000000	0,028246
Lac Quévillon	6,97	0,117526	0,048111	0,001843	0,047240	0,151796	0,000000	0,030805
Lac Alice	6,39	0,138340	0,038846	0,005478	0,044854	0,139570	0,000370	0,025688
Lac Caché	6,04	0,046737	0,029624	0,005248	0,024608	0,087824	0,001449	0,025979
Lac O'Rich	6,49	0,021866	0,021446	0,003917	0,016872	0,062525	0,000161	0,022610
Lac Noir	6,39	0,045194	0,035409	0,000742	0,022879	0,099002	0,000628	0,028226
Lac des Sables	6,84	0,084864	0,030581	0,002483	0,034813	0,132884	0,000290	0,023629
Lac SNB	6,39	0,198485	0,050678	0,004198	0,075387	0,204690	0,001691	0,029827
Lac Casseau	6,24	0,049263	0,030363	0,001075	0,033990	0,098403	0,000564	0,023816
Lac SN06	6,94	0,166786	0,043805	0,002227	0,047240	0,207933	0,000097	0,028413
Lac Violon	6,22	0,181898	0,041325	0,002022	0,049215	0,194410	0,000000	0,031824
Lac SNC	6,21	0,080868	0,034104	0,006810	0,030369	0,135978	0,001433	0,029099
Lac à la brume	6,44	0,172630	0,041195	0,006093	0,059338	0,192464	0,000886	0,031366
Lac en poudre	6,34	0,049114	0,027710	0,002483	0,027900	0,082684	0,000000	0,021674
Lac Pauvre	6,72	0,041130	0,028406	0,003098	0,030369	0,087575	0,000000	0,025646
Lac du Gore	6,66	0,085475	0,034713	0,002765	0,035554	0,121307	0,000000	0,026707
Lac Dubuc	6,16	0,062520	0,032321	0,004224	0,031603	0,116766	0,000000	0,032698
Lac SN30	6,36	0,136369	0,050808	0,002022	0,046993	0,162524	0,000290	0,028954
Lac SN07	6,19	0,076097	0,035975	0,005043	0,030204	0,102545	0,000370	0,020509
Lac Valiquet	5,85	0,025163	0,021924	0,002432	0,018435	0,072355	0,001175	0,020696
Lac SNA	6,12	0,072246	0,033887	0,000998	0,043784	0,109331	0,000918	0,025147
Lac à May I	6,36	0,054568	0,031625	0,002125	0,044936	0,092115	0,000000	0,025272
Lac à May II	5,91	0,060642	0,017748	0,005427	0,025019	0,078293	0,000290	0,014435
Lac Carré	6,20	0,075466	0,031277	0,005888	0,030945	0,099451	0,000290	0,022339
Lac de la montagne	6,36	0,139955	0,035627	0,002202	0,045265	0,144610	0,000000	0,023150
Petit lac vert	6,86	0,045984	0,034365	0,001306	0,025266	0,098303	0,000242	0,028496
Lac Croche	6,21	0,074196	0,029928	0,001306	0,029793	0,111876	0,000580	0,025709

Tableau X: Variables chimiques mesurées dans l'eau des lacs et exploitée dans le cadre de la présente étude. Les concentrations sont données en meq/L.

Seules les variables présentant des différences significatives, selon l'analyse de variance réalisée au point 6-7 (Tableau IV), ont été retenues. Les barres d'erreurs représentées sur les graphiques de la figure 7-7, sont des intervalles de confiance à 95%.

Nom	Silice	COD	Cl-	H+
Lac Charette	0,377	5,220	0,001466	0,000000631
Lac du bois franc	2,610	2,340	0,004850	0,000002138
Lac au foin	2,535	6,560	0,006486	0,000007079
Lac Fromin	3,320	4,900	0,004822	0,000007943
Lac Heart	4,195	5,830	0,006571	0,000002042
Lac de la tête de Pimbina	2,465	5,730	0,003779	0,000000646
Lac Millette	0,972	4,110	0,009447	0,000000891
Lac SND	5,780	4,610	0,003722	0,000002344
Lac Violon	2,000	6,100	0,006627	0,000000741
Lac à l'Ours	0,938	5,140	0,005302	0,000001318
Lac Cloutier	0,464	4,890	0,004230	0,000003162
Lac Limoges	6,580	7,010	0,005048	0,000001148
Lac Quévillon	4,300	4,040	0,020360	0,000000107
Lac Alice	2,685	2,540	0,011759	0,000000407
Lac Caché	3,780	3,440	0,004879	0,000000912
Lac O'Rich	1,785	3,260	0,005781	0,000000324
Lac Noir	6,280	3,040	0,008319	0,000000407
Lac des Sables	3,750	4,910	0,007388	0,000000145
Lac SNB	9,175	4,290	0,004935	0,000000407
Lac Casseau	5,305	4,950	0,004738	0,000000575
Lac SN06	6,130	3,400	0,011365	0,000000115
Lac Violon	6,110	3,090	0,009842	0,000000603
Lac SNC	5,315	2,920	0,006289	0,000000617
Lac à la brume	2,950	2,600	0,009842	0,000000363
Lac en poudre	0,314	4,720	0,003948	0,000000457
Lac Pauvre	2,690	5,560	0,005612	0,000000191
Lac du Gore	1,950	2,640	0,010237	0,000000219
Lac Dubuc	3,330	3,490	0,007445	0,000000692
Lac SN30	4,765	6,290	0,012944	0,000000437
Lac SN07	1,495	5,100	0,007896	0,000000646
Lac Valiquet	2,140	4,640	0,005358	0,000001413
Lac SNA	2,085	3,150	0,004145	0,000000759
Lac à May I	4,410	5,100	0,006148	0,000000437
Lac à May II	1,510	4,890	0,006458	0,000001230
Lac Carré	1,720	5,620	0,004568	0,000000631
Lac de la montagne	0,875	2,310	0,006542	0,000000437
Petit lac vert	2,275	5,090	0,005132	0,000000138
Lac Croche	3,755	3,910	0,007106	0,000000617

Tableau XI: Variables chimiques mesurées dans les lacs échantillonnés et non directement exploitées dans le présent document. Les concentrations ioniques sont données en meq/L et celles en silice et COD en mg/L.

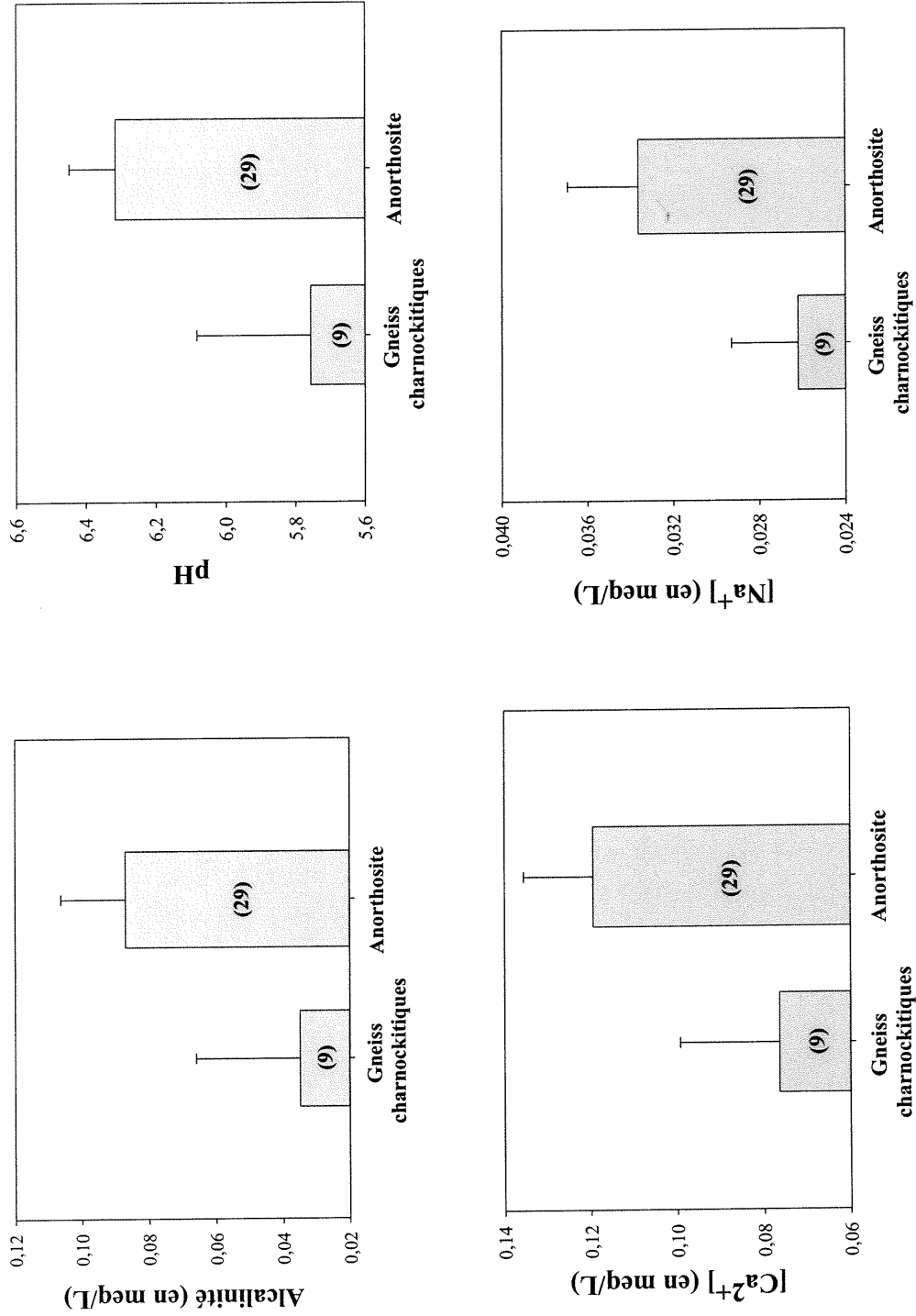


Figure 7-7 : Valeurs moyennes des variables de minéralisation de qualité des eaux des lacs selon la nature géologique de leur sous-sol.

Comme prévu au vu des résultats de l'analyse de variance, nous observons que les valeurs de pH, d'alcalinité, ainsi que les concentrations en ions Ca^{2+} et Na^+ , présentent des différences significatives entre les gneiss charnockitiques et l'anorthosite.

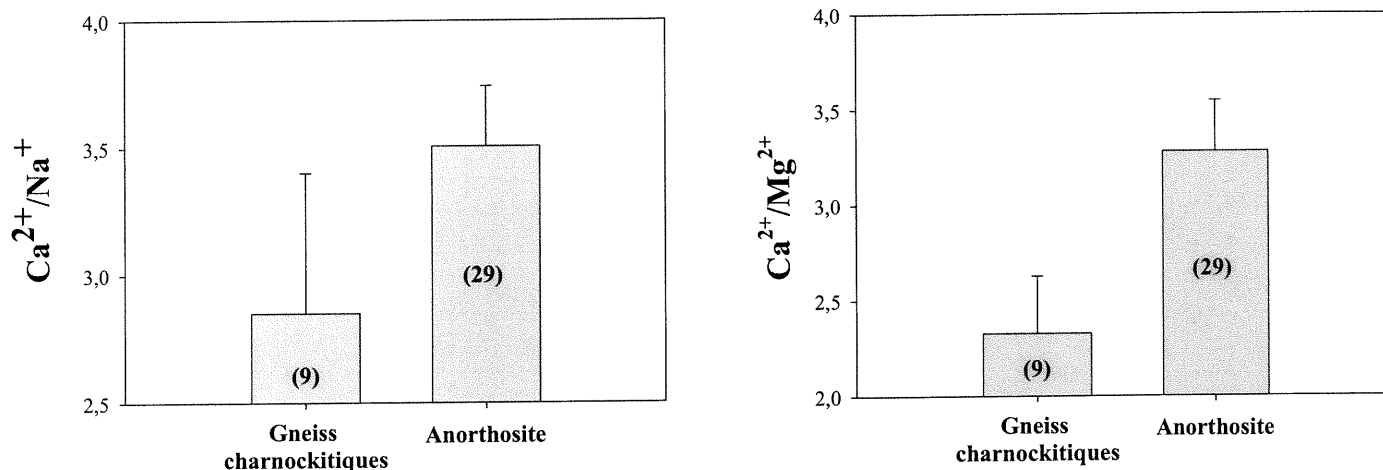


Figure 7-8 : Valeurs moyennes des variables de minéralisation de qualité des eaux des lacs selon la nature géologique de leur sous-sol.

Comme c'était le cas pour la base de données BQMA, l'observation des ratios de cations semble confirmer que la géologie a un impact sur la chimie des eaux, une fois l'effet de la variabilité géographique éliminé.

7.7 Impact des divers facteurs de variation

Une fois l'existence de différences dans la minéralisation des eaux entre ces deux géologies montrée, nous tenterons d'évaluer l'importance des quatre sources d'hétérogénéité que nous avons considérées (les données de ruissellement ont été, dans ce cas, ignorées par manque de précision à cette échelle). De façon analogue à notre approche des résultats sur les bases de données, les variables explicatives sont ici : la géologie, l'altitude ainsi que les concentrations en sulfate et nitrate mesurées dans les eaux lacustres. Le tableau XII synthétise les résultats pour chacun des six modèles obtenus par régression multiple.

	R ²	Géologie	Sulfate	Nitrate	Altitude
pH	31,15	31			
Alcalinité	44,39	7	10		27
Ca ²⁺	54,94	12	14		29
Mg ²⁺	25,42		23		2
Na ⁺	61,91	8	35		19
K ⁺	16,35			16	

Tableau XII : Caractéristiques générales des six modèles obtenus par régression multiple.

Nous observons que les variables explicatives considérées semblent être de bons indicateurs de la minéralisation des eaux des lacs étudiés. La part de la variabilité qu'ils expliquent varie entre 16% (ions K⁺) et 62% (ions Na⁺). Les cations pour lesquels la géologie ne constitue pas un facteur explicatif sont les variables dépendantes pour lesquelles les modèles de régression obtenus expliquent le moins de variance (conférer le tableau XIII).

Variables dépendantes	Variables explicatives	% associé	Influence
pH	Géologie	31	+ (anorthosite) - (gneiss charnockitiques)
	Altitude	14	-
	Nitrate	4	-
	Sulfate	2	+
Alcalinité	Altitude	27	-
	Géologie	18	+ (anorthosite) - (gneiss charnockitiques)
	Sulfate	17	+
Ca ²⁺	Altitude	29	-
	Sulfate	28	+
	Géologie	18	+ (anorthosite) - (gneiss charnockitiques)
Mg ²⁺	Sulfate	23	+
	Altitude	9	-
	Géologie	2	+ (anorthosite) - (gneiss charnockitiques)

Variables dépendantes	Variables explicatives	% associé	Influence
Na ⁺	Sulfate	35	+
	Altitude	35	-
	Géologie	15	+ (anorthosite) - (gneiss charnockitiques)
K ⁺	Nitrate	16	+

Tableau XIII : Effets individuels des variables explicatives sur les variables dépendantes¹⁷.

Les résultats semblent indiquer que la concentration en sulfate joue un rôle de premier plan à l'échelle de l'étude de terrain réalisée (exception faite du pH). Son impact est notoire dans le cas des concentrations de cations (exception faite des ions K⁺). Dans le cas des valeurs d'alcalinité et de pH, cet impact est supplanté au premier plan par la géologie et l'altitude. Il est intéressant de remarquer que selon ces résultats, le pH de l'eau des lacs est très fortement lié à la nature géologique des sols. La corrélation positive du sulfate avec les concentrations ioniques (sauf les ions K⁺) donnée par ces résultats est similaire à celle observée dans nos résultats précédents. Leur corrélation positive avec l'alcalinité et le pH est à noter et est différente de ce que nous avons observé jusqu'à présent dans le cas de l'alcalinité. La corrélation positive qui existe entre les ions K⁺ et les ions nitrate nous semble devoir être remarquée.

¹⁷ Les variables explicatives ayant un seuil de signification inférieur à 0,05 et/ou n'expliquant pas un pourcentage différent de 0 de la variabilité de la minéralisation des eaux ont été éliminées.

7.8 Analyse canonique de redondance terrain

Dans le cas des lacs que nous avons échantillonnés, l'analyse canonique de redondance permet d'expliquer et de représenter en deux dimensions près de 39% de la variabilité des données d'origine. L'importance relative de ce pourcentage, permet d'obtenir une ordination des lacs les séparant assez clairement selon la nature géologique de leur sol.

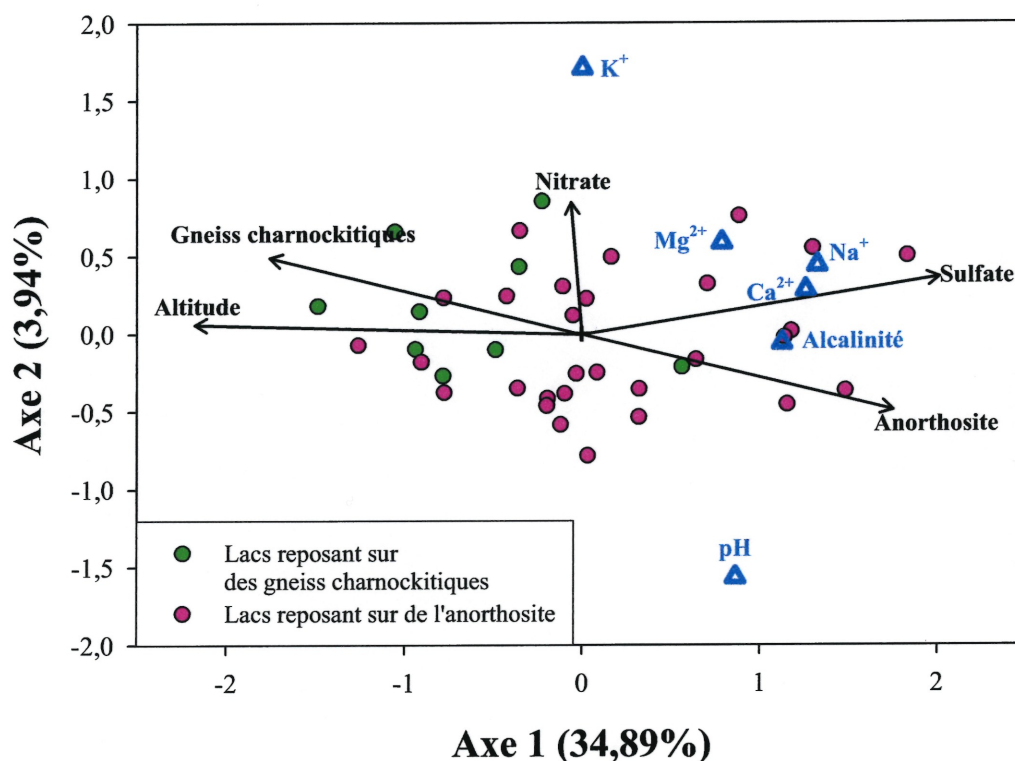


Figure 7-9 : Interactions globales des facteurs de variation et des variables de minéralisation et de qualité des eaux des lacs étudiés¹⁸.

Le premier axe de l'ordination semble être, comme dans le cas de l'analyse canonique précédente, un axe de minéralisation. Nous retrouvons entre autre sur la partie positive de cet axe les trois cations majeurs et l'alcalinité. L'altitude se positionne quand à elle sur la partie négative de cet axe. Le deuxième axe de l'ordination semble quant à lui

¹⁸ Les deux composantes principales présentées sont statistiquement significatives.

opposer le pH à la concentration en ions des eaux, ce qui suggère qu'il s'agit d'un axe caractérisant l'acidité des eaux.

Nous observons que les lacs reposant sur de l'anorthosite se retrouvent, pour la plupart, sur la partie positive de l'axe de minéralisation, inversement aux lacs situés sur des gneiss charnockitiques. L'important impact de l'altitude se fait toutefois sentir, sous la forme d'un étirement du nuage de points vers la partie négative de l'axe de minéralisation.

Nous remarquons, sans surprise, la forte corrélation positive existant entre les concentrations des espèces cationiques (exception faite des ions K^+) et les valeurs d'alcalinité. Nous observons que la concentration en sulfate semble être positivement corrélée à la minéralisation des eaux. L'angle de près de 90° existant entre les vecteurs représentant les concentrations en sulfate et celle de nitrate, qui traduit l'indépendance des deux variables, nous semble également devoir être noté. Nous remarquons que la concentration en ions nitrate est fortement et positivement corrélée à la concentration en ions potassium. À l'inverse, elle est négativement corrélée au pH. Finalement, nous observons que l'anorthosite est, pour ces résultats, positivement corrélée au pH, alors que la corrélation des gneiss charnockitiques est identique en importance, mais opposée quant à son effet.

8 DISCUSSION

Nos résultats confirment l'existence d'une importante variabilité des concentrations en cations majeurs dans les lacs situés sur la portion québécoise du Bouclier canadien (figure 7-1). Ce fait déjà rapporté par certains auteurs (Dupont 1992a, 1993b), s'étend également aux valeurs d'alcalinité. Ceci suggère l'existence de facteurs responsables de cette hétérogénéité sur le Bouclier canadien.

Parmi les facteurs de variation que nous avons pris en considération dans nos analyses, nous avons observé que le ruissellement et l'altitude semblent influencer négativement la minéralisation des eaux. Des variations de l'évapotranspiration ou de l'abondance de précipitations seront reflétées par les valeurs de ruissellement. L'augmentation des valeurs d'évapotranspiration (baisse du ruissellement) entraîne la concentration des solutés présents dans l'eau. À l'inverse, une augmentation du volume de précipitations (augmentation du ruissellement) va contribuer à diluer les concentrations d'espèces ioniques dans les eaux. Une forte valeur de ruissellement entraîne, d'autre part, une réduction du temps de contact de l'eau avec les matériaux, dont on peut s'attendre qu'elle réduise l'enrichissement des eaux en espèces minérales issues de l'altération des sols.

La diminution des concentrations ioniques avec l'augmentation de l'altitude que nous avons observée a également été rapportée par d'autres auteurs (Vitousek 1977). Les résultats de cette étude avancent comme première explication, une diminution de l'évapotranspiration avec l'augmentation de l'altitude. Dans le cas présent, cet aspect a déjà été mentionné par le ruissellement. Ceci et l'augmentation des précipitations (et donc du ruissellement) avec l'altitude, explique probablement la corrélation que nous avons observée entre le ruissellement et l'altitude. D'autres facteurs variant avec le gradient de l'altitude et non pris en considération par le ruissellement peuvent être toutefois mentionnés. Il en va ainsi de la diminution de l'épaisseur des dépôts meubles avec l'altitude (Vitousek 1977). Une diminution de l'importance relative des dépôts meubles (partie la plus altérable des sols) par rapport à celle de la roche en place (beaucoup moins altérable), doit engendrer une diminution de l'altération chimique des

minéraux. Le rôle de la température, inférieure en altitude, serait aussi à même de provoquer une altération moins importante des roches, impliquant ainsi un plus faible taux d'altération chimique des minéraux. L'observation des résultats obtenus dans le cadre de la campagne d'échantillonnage menée à l'échelle locale semble suggérer qu'une variation du ruissellement local soit en cause.

Nous avons observé que la concentration en sulfate semble être fortement corrélée à la minéralisation des eaux (figure 7-6 et 7-9). Cet ion fait partie des nutriments qui sont indispensables au développement des plantes. L'exposition du territoire étudié aux dépôts acides d'origine anthropique, fait toutefois que cette espèce ionique est présente en excès, ce qui exclut son contrôle par l'absorption des plantes (Vitousek 1977). À la suite de ceci, il semble que, comme rapporté pour d'autres régions, la concentration en sulfate des eaux des lacs étudiés ne dépend que des apports atmosphériques et de l'évapotranspiration. La corrélation observée entre le sulfate et les variables de minéralisation semble dès lors être causée par la similitude des variations des concentrations ioniques par rapport au ruissellement et à l'altitude.

Les résultats que nous avons obtenus montrent clairement la forte corrélation positive existant entre les concentrations en ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et sulfates (figure 7-6 et 7-9 entre autres). L'alcalinité est elle aussi fortement corrélée aux trois premières concentrations citées ci-dessus, mais ne semble avoir qu'une corrélation minimale avec les ions sulfate. Des quatre concentrations ioniques citées, seul le sodium n'est pas essentiel au développement des plantes. Si l'on accepte l'hypothèse selon laquelle les pertes de nutriments par les écosystèmes seraient contrôlées par l'absorption de ces derniers par la matière organique (Vitousek et Reiners 1975), on peut en conclure que les concentrations en ions calcium, magnésium, sulfate sont en excès par rapport aux besoins biologiques des écosystèmes. Nous devons toutefois préciser que si bien cette approche est valable dans les horizons des sols occupés par les racines, elle ne semble pas être applicable aux horizons dans lesquels l'absorption racinaire des éléments nutritifs n'a pas lieu. Il est ainsi concevable que dans de tels horizons il puisse se produire des pertes de nutriments provenant de certains horizons des sols alors que ces mêmes nutriments sont en défaut

aux niveaux d'autres horizons. La concentration en potassium se comporte, au vu de nos résultats, de façon différente aux espèces cationiques dont nous avons parlé jusqu'à présent. Cette espèce ionique semble être peu (figure 7-6) ou pas (figure 7-9) influencée par l'altitude et le ruissellement. En se fiant à l'hypothèse précédemment mentionnée (Vitousek et Reiners 1975), ceci suggère que les ions K^+ ne sont pas présents en excès par rapport aux besoins des écosystèmes et sont donc contrôlés par les prélèvements réalisés par les producteurs primaires. De tels résultats sont rapportés par d'autres auteurs, entre autre dans une étude menée sur des lacs du New Hampshire (Vitousek 1977). Dans cette étude, le nitrate était très positivement corrélé au potassium, suggérant des mécanismes de contrôle similaires. Nos résultats à échelle locale mettent également en relief la corrélation entre ces deux espèces ioniques, tout en les donnant comme étant indépendantes de la variation d'altitude. Alors que ces observations sont en accord avec les résultats de l'étude précédemment citée, les résultats que nous avons obtenus pour la base de données couvrant un plus vaste territoire sont divergents. L'observation de la figure 7-6 et du tableau VIII nous indique que les ions nitrate sont dans ces lacs très fortement corrélés aux ions sulfate et négativement corrélés au ruissellement et à l'altitude. Ces ions sont de ce fait moins fortement corrélés aux ions K^+ . On peut se questionner sur l'impact des dépôts atmosphériques anthropiques sur les concentrations en nitrate des eaux. La très forte corrélation avec le sulfate pourrait indiquer un apport excédentaire de nitrate à cette échelle. Ceci n'est toutefois qu'une conjecture, qui mérite peut-être d'être explorée.

L'influence de la géologie sur la chimie semble claire aux vues des figures 7-2, 7-4, 7-7 et 7-8. Le tableau VI, ainsi que les résultats des régressions multiples indiquent également quelles sont les géologies ayant un impact sur la chimie des eaux ainsi que la nature de celui-ci. L'effet de la géologie sur la chimie des eaux semble devoir être considéré distinctement pour chacune des espèces ioniques. Toutefois, pour tenter de généraliser, nous pouvons réaliser deux groupes de géologies :

- Géologies induisant les plus faibles apport minéraux à l'eau¹⁹ : mangérite, migmatites, gneiss charnockitiques, gneiss granitique;

¹⁹ Par ordre d'apport minéral croissant.

- Géologies induisant les plus fort apport minéraux à l'eau²⁰ : granitoïdes, anorthosite, les deux groupes de migmatites à trame de gneiss et paragneiss et le complexe gneissique.

Cette répartition des géologies étudiées en deux groupes est subjective et n'est proposée qu'à titre indicatif. Il ressort toutefois de nos résultats que la géologie a un impact important et non négligeable sur la chimie des eaux des lacs situés sur le Bouclier canadien. La dissociation des lacs selon leurs géologies sous jacentes observées à la figure 7-9 nous permet d'aller au-delà et de dire que, par exemple, l'effet de la géologie semble autant devoir être pris en considération pour ces lacs comme celui de l'altitude. De façon regrettable, cette dernière observation ne peut être confirmée par les résultats des analyses de la base de données du à l'impossibilité de dissocier les effets des géologies caractéristiques et non caractéristiques. Ainsi, le vecteur représentant l'anorthosite sur la figure 7-6, inversement corrélé aux variables de minéralisation, ne traduirait pas l'impact réel de cette géologie (figures 7-2 et 7-9), mais plutôt une corrélation avec le ruissellement et/ou l'altitude.

Outre les sources d'hétérogénéité considérées dans cette étude, d'autres sources dont l'impact est plus que probable doivent être mentionnées.

La variabilité de l'épaisseur des dépôts de surface sur le territoire du Bouclier canadien est un élément qui devrait être important. Les dépôts meubles sont la partie la plus altérable du sol et celle où le contact entre les matériaux solides et l'eau est le plus intime. L'augmentation de l'épaisseur des dépôts de surface induit probablement une minéralisation accrue des eaux (Vitousek 1977). La prise en compte de ce facteur à l'échelle du Québec semble peu probable étant donné la nature éparse et généralement peu précise des informations disponibles. Les indications qui ressortent de la littérature existante à ce sujet (en particulier Shilts 1981) indique que ces dépôts sont plus épais au sud et à l'ouest de la province du Québec et plus mince au nord-est et en altitude.

²⁰ Par ordre d'apport minéral décroissant.

Le ratio de drainage donné par l'aire du bassin versant sur l'aire du lac est un autre facteur non considéré dans notre étude pour le moment, et qui est susceptible d'avoir un impact important en particulier sur les résultats des 39 lacs que nous avons échantillonnés. L'augmentation du ratio de drainage engendre un contact plus important de l'eau avec les sols, ce qui doit inévitablement provoquer des échanges plus importants entre ces deux parties.

Les caractéristiques topographiques des bassins versants, tel que mis en lumière par certains auteurs (Wolock *et al.* 1989), peuvent avoir un important impact sur la chimie de l'eau des lacs. La pente des bassins versant des lacs peut avoir un impact en agissant sur le temps de contact entre l'eau et les dépôts meubles (Wolock *et al.* 1989), mais également en provoquant la formation de zones de saturation hydrique (D'Arcy *et al.* 1997). La formation de ces zones de saturation hydrique entraîne des changements dans le mode d'écoulement des eaux, favorisant l'écoulement de surface des eaux. Ce mode d'écoulement entraîne une minéralisation très réduite des eaux lorsque comparée à celle observée lorsque les eaux circulent dans les horizons superficiels des sols (Wolock *et al.* 1989).

Finalement et bien que cette étude se soit centrée sur l'étude des sources d'hétérogénéité de nature abiotique, l'effet de la végétation ne peut en aucun cas être négligé. L'absorption de nutriments par les plantes est proposé comme étant le plus important mécanisme de régulation des pertes de nutriments par les écosystèmes (Vitousek et Reiners 1975). Une variabilité dans le statut de la réserve de matière organique d'un écosystème donné (stagnante, en régression ou en augmentation) est donc à même d'apporter d'importants changements, en particulier pour les concentrations de potassium et nitrate.

9 BIBLIOGRAPHIE

Appelo, C.A.J. and Postma, D. 1996. Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema Publishers, Netherlands.

Avramtchev, L. & Lebel-Drolet, S. 1979. Cartes des gites minéraux du Québec : région de l'Abitibi. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service du potentiel minéral. Québec.

Avramtchev, L. & Piché, G. 1981. Carte des gîtes minéraux du Québec : Région des Laurentie-Saguenay. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service du potentiel minéral. Québec.

Avramtchev, L. 1982. Catalogue des gîtes minéraux du Québec : Région de la Baie d'Hudson. Ministère de l'énergie et des ressources , Service de la géoinformation. Québec.

Avramtchev, L. 1983a. Carte des gîtes minéraux du Québec : région de la Côte Nord., Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géoinformation. Québec.

Avramtchev, L. 1983b. Catalogue des gîtes miéraux du Québec : région de la Baie James. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géoinformation. Québec.

Bellehumeur, C., Marcotte, D., and Legendre, P. 1999a. Estimation of regionalized phenomena by geostatistical methods : lake acidity on the Canadian Shield. In press.

D'Arcy, P. & Carignan, R. 1997. Influence of Catchment Topography on Water Chemistry in Southeastern Québec Shield Lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci. **54** : 2215-2227.

Dupont, J. 1988. État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de l'Outaouais. Québec, Ministère de l'Environnement, Direction de la qualité du milieu aquatique,

rapport n° PA-29, 98 pages.

Dupont, J. 1989. État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de la Mauricie. Québec, Ministère de l'Environnement, Direction de la qualité du milieu aquatique, rapport QEN/PA-33'/1, 84 pages.

Dupont, J. 1990. État de l'acidité des lacs de la région hydrographique du Sanguenay - Lac-Saint-Jean. Québec, Ministère de l'Environnement, Direction de la qualité du milieu aquatique, rapport QEN/PA-38/1, 131 pages.

Dupont, J. 1991. État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de la Côte-Nord. Québec, Ministère de l'Environnement, Direction de la qualité des cours d'eau, rapport QEN/PA-41/1, 114 pages.

Dupont, J. 1992a. Québec Lake Survey : 1. Statistical assessment of surface water quality. *Water, Air, and Soil Pollution* **57** : 107-124.

Dupont, J. 1992b. Québec Lake Survey : 2. Origin and extent of acidification. *Water, Air, and Soil Pollution* **57**: 125-137.

Dupont, J. 1993a. État de l'acidité des lacs de la région de l'Abitibi. Québec, Ministère de l'Environnement, Direction de la qualité des cours d'eau, rapport QEN/PA-44/1, 93 pages + 4 annexes.

Dupont, J. 1993b. Bilan de l'acidité des lacs du Québec, meridional. Québec, Québec, Ministère de l'Environnement, Direction de la qualité des cours d'eau, rapport QEN/PA-47/1, 77 pages + 5 annexes.

- Fulton, R.J. 1996. Surficial materials of Canada. Natural Resources Canada. Ottawa.
- Hocq, M., Verpaelst, P., Chartrand, F., Clark, T., Lamothe, D., Brisebois, D., Brun, J., and Martineau, G. 1994. Géologie du Québec. Les Publications du Québec, Québec.
- Huang, W.T. 1962. Petrology. McGraw-Hill, Inc. United States.
- Landry, B. and Mercier, M. 1992. Notions de géologie. Modullo Éditeur, Québec.
- Langmuir, D. 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice-Hall, Inc., United States of America.
- Legendre, P. & Legendre, L. 1998. Numerical Ecology. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Prichonnet, G., Durant, M., Elson, J. A., Gagnon, P., and Schroeder, J. et Veillette J. 1987. Glaciations et Déglaciations du Wisconsinien Dans le Sud Du Québec (Région de Montréal). INQUA.
- Québec (Province). 1993. État de l'environnement au Québec 1992. Ministère de l'Environnement. Guérin.
- Shilts, W. W., Card, J. C., Poole, W. H., and Sandford, B. V. 1981. Commission géologique du Canada Étude N° 81-14.
- Stumm, W. and Wollast, R. 1990. Coordination Chemistry of Weathering. Review of Géophysics **28**: 53-69.
- Tyrrell, G.W. 1967. The Principles of Petrology. An introduction to the Science of Rocks. Methuen. Great Britain.
- Vitousek, P.M. & Reiners, W.A. 1975. Ecosystem Succession and Nutrient Retention : a Hypothesis. Biosci. **25** : 376-381.

Vitousek, P.M. 1977. The Regulation of Elements Concentrations in Mountain Streams in the Northeastern United States. *Ecological Monographs* **47**: 65-87.

Wilkinson, K.J., Jones, H.G., Campbell, P.G.C., and Lachance, M. 1992. Estimating Organic Acid Contribution to Surface Water Acidity in Quebec (Canada). *Water, Air, and Soil Pollution* **61**: 57-74.

Wolock, D.M.; Hornberger, G.M.; Beven, K.J. and Campbell, W.G. 1989. The Relationship of Catchment Topography and Soil Hydraulic Characteristics of Lake Alkalinity in the Northeastern United States. *Wat. Resour. Res.* **25**: 829-837.

10 ANNEXES

10.1 Annexe 1 : Carte géologique du Québec à l'échelle 1 :250000e

10.2 Annexe 2 : Brève présentation des géologies

(Réalisé d'après les informations obtenues de Huang, 1962 et Tyrrel, 1967)

Sigles	Roches	Types	Description	Composition
G1	Complexe gneissique	Métamorphique	Roches ignées métamorphisées	quartz, plagioclase (Ca^{2+} , Na^+), hornblende (Ca^{2+} , Mg^{2+}), biotite (K^+ , Mg^{2+})
G12	Mangérite	Ignée (intrusive)	Monzonite pyroxénique	Silicates (55%), pyroxènes (Fe). feldspars calciques et potassiques en faible quantité
G2	Gneiss granitique	Métamorphique	Granite métamorphisé	Quartz catégories très générale
G20	Migmatites	Métamorphique	Composées d'un mélange de granite et de roches métamorphisées. Roches entourant les intrusions granitiques	Quartz Précisions non disponible pour les autres roches
G20A	Migmatites (gneiss et paragneiss)	Métamorphique	Migmatites et roches ignées et sédimentaires métamorphisées	Quartz. Gneiss de la géologie G1
G20B	Migmatites (paragneiss)	Métamorphique	Migmatites et roches sédimentaires métamorphisées	Quartz Roches sédimentaires (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) généralement altérables.
G4	Gneiss charnockitiques	Métamorphique	Charnockites métamorphisées	Silicates (70%) quartz, feldspar potassique (K^+), plagioclases (Ca^{2+} , Na^+) et hypersthène (Mg^{2+})
G8	Anorthosite	Ignée (intrusive)	Gabbro totalement appauvri en minéraux mafiques et composé quasi uniquement de plagioclases (fels.)	plagioclases (Ca^{2+} et Na^+)
S9	Granitoïdes	Ignée (intrusive)	Roches allant des granites aux diorites.	Quartz. Augmentation des feldspaths alcalins (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) des granites vers les diorites.

11 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très spécialement mon Directeur de recherche, Richard Carignan, qui m'a aidé, conseillé et appuyé au cours des deux années de travail qui ont mené à la rédaction de ce document.

Un grand merci à Pierre D'Arcy pour son travail lors de la numérisation des cartes, son aide tout au long de cette maîtrise et l'amitié qu'il m'a témoignée.

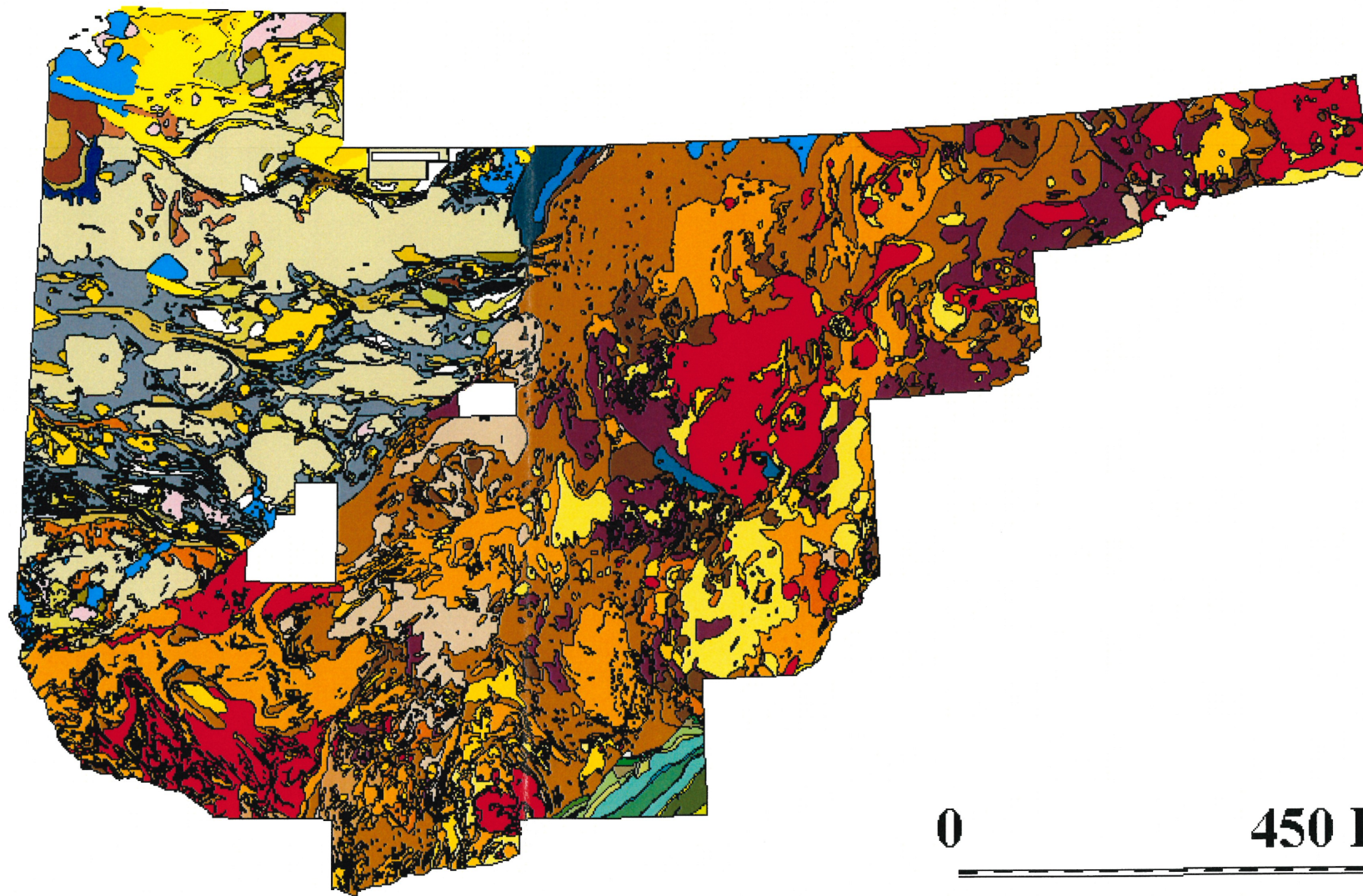
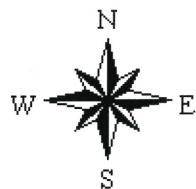
Merci à Pierre Legendre pour ses explications et ses efforts pour me conseiller en matière de statistique.

De nombreuses personnes par leurs conseils, leurs commentaires et les discussions que nous avons pu avoir ont activement participé à l'aboutissement de ce projet. Merci à vous...Michel Courcelles, Sébastien Lamontagne.

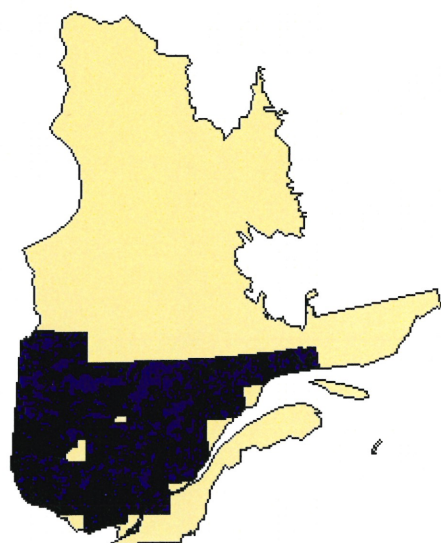
Merci à Caroline Lamothe pour les analyses de laboratoire et les conseils techniques.

Merci à toutes les personnes qui m'ont relu une et plusieurs fois...merci Boubou, merci pequeño saltamontes.

Géologie du Québec












































0 450 Km


























Légende


















Province du lac Supérieur

	Amphiboïte
	Basalte
	Complexe stratiformes: anorthosite, gabbro anorthositique, anorthosite gabbroïque, pyroxénite, gabbro
	Conglomerat, péro mûnant
	Coulée basaltique
	Diorite
	Filons-couches ultramafiques: mafiques
	Formation de la rivière Ekwanî: dolomite, calcaire
	Formation de la rivière Kenogami: dolomie, calcaire, siltstone, gres, gypse
	Formation de la rivière Severn: dolomie, calcaire
	Gabbro
	Gneiss a amphibole
	Gneiss a biotite
	Gneiss a biotite, par endroits avec grenats, infertite avec des amats concordants des roches granitoïdes
	Gneiss granitique
	Gneiss quartzofeldspathique
	Granite, granodiorite, monzonite quartzifere
	Granite, monzonite quartzifere, pegmatite
	Granodiorite, monzonite quartzifere, diorite quartzifere et syenite par endroits
	Granodioritem tonalite, diorite quartzifere, pegmatite
	Grauwacke, argillite, ardoise, siltstone, shale
	Intrusions mafiques différenciées
	Intrusions mafiques différenciées: gabbro, diorite
	Laves ultramafiques
	Laves ultramafiques intercalaires
	Migmatite indifférenciée
	Pendolite, pyroxénite, dunte, serpentinite
	Rhyolite, rhyodacite, dacite
	Roches granitoïdes a pyroxenes, schistes et gneiss a pyroxenes
	Roches granitoïdes et composition granitique a dioritique
	Roches intrusives mafiques
	Roches intrusives felsiques
	Roches pyroclastiques felsiques et mafiques
	Roches sédimentaires distiques indifférenciées
	Roches volcaniques felsiques indifférenciées
	Roches volcaniques intermédiaires et felsiques
	Roches volcaniques intermédiaires et mafiques indifférenciées
	Schiste et gneiss a biotite, grenat, andalousite
	Syenite, monzonite
	Séquence de coulées ultramafiques et mafiques
	Trondjémite, diorite quartzifere, diorite par endroits
	Volcanoclastiques intermédiaires et mafiques












Province de Grenville

	Amphiboïte, gneiss à hornblende et/ou biotite, schistes
	Anorthosite, anorthosite gabbroïque
	Charnockite
	Complexe gneissique
	Diorite, granodiorite
	Gabbro anorthosite, gabbro
	Gabbro, amphibolite
	Gneiss charnockitiques
	Gneiss granitiques
	Granite avec pegmatite, non déformé
	Marbrière
	Marbre et roches calco-silicees
	Migmatites
	Migmatites (trame de gneiss et paragneiss)
	Migmatites (trame de paragneiss)
	Monzonite
	Paragneiss mixte
	Quartzite, paragneiss quartzofeldspathique
	Roches ultramafiques
	Syenite
	Syenite a hypersthène
	Syenite a nephéline
	Trondjémite

Basses terres du Saint-Laurent

	Calcaire argileux, shale calcaireux et shale
	Calcaire cristallin et nodulaire
	Calcaires cristallins, argileux et nodulaires
	Formation de Beauharnois: dolomie
	Formation de Becancour: shale rouge, gres vert
	Formation de Covey Hill: conglomérat, gres
	Formation de Deschambault: calcaire cristallin et crinoïdal
	Formation de Laval: calcaire cristallin, gres, shale
	Formation de Nicolet: shale, gres
	Formation de Pontgrave: calcaire, shale
	Formation de Sainte-Sabrine et de Les Fonds: ardoise et dolomie
	Formation de Tétréauville: calcaire argileux et shale
	Gres impur vert, rouge et gris avec intertits de schistes
	Roches de l'Ordovicien moyen
	Roches volcaniques basiques (tholéitiques)
	Shale de l'Utica
	Unités non différenciées: dolomie, calcaire

Autres géologies

	Depôts fluviaux, marins et glaciaires
	Formation d'Albanel: membre inférieur: dolomie, shale
	Formation d'Albanel: membre supérieur: dolomie
	Formation de Chibougamau: conglomérat, arkose, grauwacke, argillite
	Formation de Goyganda: conglomérat, argillite, arkose
	Formation de Liskeard: calcaire, marnes, calcair entes
	Formation de Lorraine: quartzite, arkose
	Formation de Sextant: gres, arkose
	Formation de Témiscamie: formation ferrifere, quartzite, ardoise
	Formation ferrifere
	Roches non différenciées