

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

TAUX D'ALTÉRATION DES SOLS DE LA BORDURE SUD
DU BOUCLIER CANADIEN, QUÉBEC, CANADA : DESCRIPTION PHYSIQUE
DES SOLS ET MODÉLISATION DE L'ALTÉRATION
AVEC LE MODÈLE PROFILE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
PATRICK LAMOUREUX

Janvier 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Remerciements

C'est pour moi un agréable devoir de remercier ceux et celles qui ont contribué par leur savoir et leur soutien à la réalisation de cet ouvrage.

Je suis avant tout redevable à ma directrice de mémoire, Mireille Bouchard professeur au Département de géographie à l'UQAM, pour m'avoir guidé par son expérience dans les labyrinthes d'un ouvrage de cette ampleur et d'avoir eu la patience et les bons conseils qui donnent confiance en soi et accroissent le savoir ainsi que la réflexion scientifique. Merci énormément Mireille.

Également, je suis redevable à mes codirecteurs de maîtrise, Daniel Houle chercheur au ministère de l'Environnement du Canada et Nicolas Bélanger professeur au Département des Sciences du sol à l'Université de la Saskatchewan à Saskatoon. Le premier pour m'avoir soumis un sujet de mémoire qui représentait un vrai défi, un financement permettant d'effectuer des analyses coûteuses et des suggestions judicieuses sur l'orientation du mémoire. Le second pour son expérience en modélisation, ses suggestions et sa rigueur scientifique.

Il me faut aussi remercier de la façon la plus chaleureuse ma famille et mes amis pour leur patience, leur compréhension et leur soutien. Mes compatriotes de l'UQAM pour les discussions animées et les réflexions sur mon sujet de recherche, entre autres Olivier Caron et Jérôme Messier. Certains également pour leurs contributions dans cet ouvrage : Jean-François Dupuis pour son aide dans la modélisation hydroclimatique, Benoît Vigneault pour la minéralogie des sables et Olivier Caron pour la cartographie.

Enfin, je tiens à remercier le Département de Géographie de l'UQAM pour son soutien et une pensée amicale à Barry Goetz, d'Agriculture Canada à Saskatoon, pour nos échanges amicaux, son ouverture d'esprit et surtout pour son aide lors de certaines analyses en laboratoire.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xi
LISTE DES SYMBOLES	xii
RÉSUMÉ	xiii
INTRODUCTION	1
PARTIE I RÉGION À L'ÉTUDE ET ANALYSES EN LABORATOIRE	12
CHAPITRE I CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE LA RÉGION À L'ÉTUDE	13
1.1 Localisation des bassins versants	13
1.2 Climat	13
1.3 Description des bassins versants	17
1.3.1 Géologie et dépôt de surface	17
1.3.2 Topographie	20
1.3.3 Hydrographie	20
1.3.4 Végétation et sols	22
CHAPITRE II MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	25
2.1 Stratégie d'échantillonnage des sols	25
2.2 Analyse physique des sols: granulométrie et surface spécifique	27
2.2.1 Granulométrie	27
2.2.2 Surface spécifique	28
2.3 Analyse chimique des sols : Chimie totale	33
2.4 Minéralogie des sols	33
2.4.1 Minéralogie des argiles et des limons à partir de la diffraction aux rayons X	33

2.4.2	Minéralogie des sables	38
2.4.3	Minéralogie selon le modèle UPPSALA développé à partir de la norme CIPW	39
2.4.4	Synthèse minéralogique	40
CHAPITRE III		
	RÉSULTATS D'ANALYSE DES SOLS	45
3.1	Propriétés physiques et chimiques des sols	45
3.1.1	Texture	45
3.1.2	Surfaces spécifiques	47
3.1.3	Chimie totale	50
3.2	Minéralogie des horizons B	53
3.2.1	Minéralogie des argiles	53
3.2.2	Minéralogie des limons	59
3.2.3	Minéralogie des sables	67
3.2.4	Minéralogie UPPSALA développé à partir de la norme CIPW	69
3.2.5	Minéralogie finale	72
3.2.6	Comparaison des différentes minéralogies	80
PARTIE II		
	SIMULATION DE L'ALTÉRATION AVEC LE MODÈLE PROFILE	83
CHAPITRE IV		
	INTRODUCTION AU MODÈLE PROFILE	84
4.1	Modèle conceptuel	85
4.2	Modèle mathématique	87
4.2.1	Bilan massique	88
4.2.2	Réactions chimiques dans la solution du sol	89
4.2.3	Modèle d'altération des minéraux	90
4.2.4	Modèle de la dynamique de N et du prélèvement des nutriments par les arbres	91

CHAPITRE V	
MÉTHODOLOGIE DU MODÈLE PROFILE	93
5.1 Base de données du modèle	93
5.2 Les variables évaluées	96
5.3 Les variables hydroclimatiques	97
5.3.1 Résultats de la modélisation des conditions hydroclimatiques	100
5.4 Les variables constantes à l'ensemble des bassins versants	102
5.5 Test de sensibilité du modèle PROFILE	103
CHAPITRE VI	
RÉSULTATS DES TAUX D'ALTÉRATION ET DISCUSSION	108
6.1 Taux d'altération annuels de Ca+Mg+K+Na selon la surface spécifique estimée par l'algorithme textural	108
6.2 Taux d'altération annuels de Ca+Mg+K+Na selon la surface spécifique mesurée par la méthode BET sans l'extraction des oxyhydroxides	110
6.3 Taux d'altération annuels de Ca+Mg+K+Na selon la surface spécifique estimée avec la méthode BET avec extraction des oxyhydroxides	111
6.4 Discussion	112
6.4.1 Comparaison des résultats selon les différentes surfaces spécifiques	112
6.4.2 Gradient sud-ouest nord-est	113
6.4.3 Lien entre le taux d'altération et la minéralogie	115
6.4.4 Comparaison des résultats avec d'autres études	118
CONCLUSION	122
APPENDICE A	126
APPENDICE B	132
BIBLIOGRAPHIE	135

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1	Dépôts humides de sulfates pour la période de 1985 à 1988 pour le Québec méridional et localisation de la région à l'étude 14
1.2	Carte topographique du Québec méridional et localisation des 22 bassins versants à l'étude et leur sous-région respective 15
1.3	Carte géologique de la province de Grenville au Québec méridional et localisation des bassins versants à l'étude 19
2.1	Exemple de lac de tête de réseaux (Lac Des Papillons) et localisation des sites d'échantillonnage 26
2.2	Principe de diffraction et illustration de la Loi de Bragg 34
2.3	Soustraction des oxyhydroxides de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ de 6 échantillons sélectionnés pour l'extraction des oxyhydroxides 42
3.1	Distribution ternaire des analyses granulométriques des horizons B 46
3.2	Régression linéaire entre les résultats de surface spécifiques (As) pour les six échantillons sélectionnés selon la méthode BET avec des échantillons avec présence d'oxyhydroxides et avec extraction des oxyhydroxides 48
3.3.1	Diffractogramme aux rayons X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 113-3 55
3.3.2	Diffractogramme aux rayons X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 202-2 56
3.3.3	Diffractogramme aux rayons X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 412-2 57
3.3.4	Diffractogramme aux rayons X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 501-3 58
3.4.1	Diffractogramme aux rayons X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 113-1 60

3.4.2	Diffraction aux rayons X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 202-2	61
3.4.3	Diffraction aux rayons X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 411-2	62
3.4.4	Diffraction aux rayons X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 514-2	63
3.5	Proportion minéralogique pour les 22 bassins versant : moyenne des pédons par bassin versant	78
4.1	Processus de conceptualisation qui a amené à la formulation du modèle PROFILE	86
4.2	Modèle utilisé dans PROFILE pour simuler le prélèvement des nutriments	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Localisation et données climatiques des 22 bassins versants sélectionnés	16
1.2 Description géologique et géomorphologique	18
1.3 Description topographique et hydrographique des bassins versants	21
1.4 Description de la végétation et des sols	24
2.1 Exemple de pool pour 100 g: horizon B du lac MacLeod	27
2.2 Table de conversion des degrés Thêta en Angstrom de la première raie de certains minéraux secondaires et effets des traitements sur la position des diffractions	36
2.3 Table d'interprétation des diffractogrammes aux rayons X des limons et conversion des Thêta en Angstrom	37
2.4 Équation utilisée par le modèle UPPSALA pour la reconstruction des minéraux	40
2.5 Section <i>mineral stack</i> du modèle PROFILE	41
2.6 Synthèse minéralogique semi-quantitative (%) en 5 étapes	44
3.1 Résultats d'analyses texturales pour les 22 Bassins versants	46
3.2 Résultats de surface spécifique (As) selon méthode BET	47
3.3 Comparaison entre la surface spécifique (As) BET et la surface spécifique BET avec extraction des oxyhydroxides de six échantillons sélectionnés, résultats des taux d'oxyhydroxides de Fe et d'Al extraits ainsi que les résultats de surface spécifique BET avec extraction des oxydes en $m^2 m^{-3}$	49
3.4 Résultats de surface spécifique (As) selon l'algorithme textural élaboré par Sverdrup	50
3.5 Résultats de chimie totale	52

3.6	Résultats de diffractométrie aux rayons X des argiles	64
3.7	Résultats de diffractométrie aux rayons X des limons	64
3.8	Résultats de minéralogie optique des sables	68
3.9	Résultats de minéralogie selon le modèle UPPSALA-CIPW	71
3.10	Exemple de synthèse minéralogique semi-quantitative en 5 étapes avec l'échantillon 502-3	73
3.11	Minéralogie semi-quantitative pondérée des horizons B	75
3.12	Comparaison du modèle UPPSALA entre les échantillons présenté par Bélanger et al. (2002) pour Valcartier et les 62 pédons à l'étude	81
3.13	Comparaison de la minéralogie semi-quantitative de Ouimet et Duchesne (2005) vs la minéralogie semi-quantitative de chacune des sous-régions et de l'aire d'étude	82
5.1	Tables de données des intrants PROFILE pour les bassins versants	94
5.2	Tables de données des intrants PROFILE pour les pédons	95
5.3	Épaisseur de l'horizon minéral selon la base de données d'Environnement Canada	97
5.4	Résultats des simulations BioSIM, ForHYM et ForsTEM pour les variables hydroclimatiques et de température du sol	101
5.5	Données constantes utilisées pour les simulations	103
5.6	Base de données des sites sélectionnés pour le test de sensibilité	105
5.7	Test de sensibilité de certaines variables ayant des effets sur le taux d'altération des BC+Na	107
6.1	Moyenne par bassin versant du taux d'altération des sols simulé par PROFILE selon la surface spécifique établie avec l'algorithme textural	109
6.2	Moyenne par bassin versant du taux d'altération des sols simulé par PROFILE selon la surface spécifique établie avec l'équation BET avec présence d'oxyhydroxide	111

6.3	Taux d'altération simulés par PROFILE selon la surface spécifique établie avec l'équation BET avec extraction des oxyhydroxides pour les huit échantillons sélectionnés	112
6.4	Résultats de coefficient de corrélation (r) de l'analyse multivariée entre les taux d'altération des 22 bassins versants et certaines données physiques	114
6.5	Comparaison des résultats d'altération PROFILE avec ceux d'Environnement Canada établis selon la méthode de budget intrant-sortant	119
6.6	Moyenne des taux d'altération des sous-régions étudiées à des résultats de bilan élémentaire pédogénétique et de simulation	121

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADN	Acide désoxyribonucléique
As	Surface spécifique
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BC	Cations basiques (Ca+Mg+K)
CNA	Capacité de neutralisation des acides
COD ou R	Carbone organique dissous
DRX	Diffraction aux rayons X
$\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$	Kilomole de charge par hectare par année
LFH	Litière, fibre, humus
$\text{mmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$	Millimole de charge par hectare par année
NH_4^+	Ammoniaque
NO	Monoxyde d'azote
NO_2	Dioxyde d'azote
NO_3	Trioxyde d'azote
NO_x	Oxydes d'azote
OH^-	Oxyhydroxide
R ou R'	Carbone organique dissous (COD)
RCEPA	Réseau canadien d'échantillonnage des précipitations acides
TADPA	Transport à distance des polluants atmosphériques
SO_2	Dioxyde de soufre
SO_4^{2-}	Sulfates
SO_x	Oxydes de soufre
SR	Sous-région

LISTE DES SYMBOLES

Å	Ångstrom (1 Å équivaut à 0,1 nm selon les unités du système international)
Θ	Contenu en eau ($m^3 m^{-3}$)
ρ	Densité ($g cm^{-3}$)
d	Distance
λ	Longueur d'onde
μ	Micron
μm	Micromètre
>	Plus grand que
<	Plus petit que
θ	Thêta

RÉSUMÉ

L'altération des sols est essentielle pour l'évaluation des réservoirs de cations basiques dans la solution du sol et sa capacité de neutralisation des dépôts acides. Des taux d'altération des sols du Bouclier canadien ont été déterminés pour 22 bassins versants du réseau TADPA-Québec à l'aide du modèle de simulation biogéochimique PROFILE à partir de 62 échantillons. La recherche a surtout été concentrée sur la description physique des sols (granulométrie, minéralogie et surface spécifique) et la modélisation des variables hydroclimatiques dans le but d'effectuer une simulation des taux d'altération avec PROFILE. Le rééquilibrage chimique dans la qualité des eaux de surface du Bouclier canadien exige avant tout une recharge des réservoirs de cations basiques échangeables dans les sols qui est supportée par l'altération chimique des sols. Une minéralogie semi-quantitative des sols a été établie selon différentes analyses physiques et chimiques: la diffraction aux rayons X pour les fractions argileuses et limoneuses, le comptage minéralogique au binoculaire pour les fractions sableuses et l'utilisation du modèle stoechiométrique UPPSALA basé sur la chimie totale des horizons B. La surface spécifique a été établie selon deux méthodes: l'équation BET et l'algorithme textural de Sverdrup (1990). La texture des horizons B a été évaluée à partir d'un tamisage sec ($>63 \mu\text{m}$) et d'un sédimentomètre ($<63 \mu\text{m}$). La modélisation des variables hydroclimatiques a été faite à partir des modèles BioSIM, ForHYM et ForSTEM. Les simulations d'altération des sols par PROFILE ont été faites deux fois pour chaque pédon en fonction des différentes valeurs de surface spécifique. Les taux d'altération simulés avec une surface spécifique établie selon la méthode BET sont entre $0,47$ et $12,8 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, tandis que les taux d'altération simulés avec une surface spécifique établie selon l'algorithme textural sont entre $0,87$ et $5,5 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Des simulations PROFILE ont également été faites sur huit échantillons pour lesquels nous avons extraits les oxyhydroxides dans l'évaluation de la surface spécifique avec la méthode BET. Les résultats d'altération PROFILE suite aux extractions sont entre $0,88$ et $4,39 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Les taux d'altération simulés démontrent l'importance de la surface spécifique dans ces évaluations. De même, une minéralogie diversifiée permet de cerner la contribution de certains minéraux au taux d'altération, en particulier les amphiboles. Les comparaisons effectuées avec les bilans élémentaires suggèrent que les taux d'altération actuels sont supérieurs aux taux historiques.

Mots clés: taux d'altération des sols, modélisation (PROFILE, UPPSALA, BioSIM, ForHYM, ForSTEM), diffraction aux rayons X (DRX), surface spécifique, minéralogie, Bouclier canadien

INTRODUCTION

LES PRÉCIPITATIONS ACIDES: UN PROBLÈME?

Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, les scientifiques constatèrent que les émissions polluantes générées par les combustibles fossiles utilisés dans les industries lourdes, la production d'électricité et les moyens de transport engendraient des précipitations acides (pluie, neige, brouillard, etc.) en Amérique du Nord (Hidy 1994; Environnement Canada 1997), ce qui a également été relevé en Europe (ARIC 2003). En effet, le dioxyde de soufre (SO₂) et le monoxyde d'azote (NO) émis par les combustibles fossiles subissent, dès leurs premiers instants dans l'atmosphère, une seconde combustion au moment de leur contact avec l'oxygène et se transforment en trioxyde de soufre (SO₃) et dioxyde d'azote (NO₂). Ceux-ci peuvent être transportés sur de très grandes distances selon la direction des vents dominants, leurs vitesses, la stabilité de l'air et le brassage vertical de l'atmosphère (Hidy 1994). Durant le transport, le contact des oxydes avec l'humidité de l'air génère une réaction chimique produisant les acides: acide sulfurique (H₂SO₄), acide nitrique (HNO₃), acide nitreux (HNO₂) et d'autres composés acidifiants tels le sulfate d'ammonium ((NH₄)SO₄) et le nitrate d'ammonium ((NH₄)NO₃) (Hidy 1994).

Les recherches ont démontré que ces précipitations acides ont des effets nocifs sur tout le cycle biogéochimique d'un peuplement forestier (Likens et Bormann 1995). Ce sont les quatre grands vecteurs de ce cycle, c'est-à-dire la météorologie, la géologie, la biologie et le cycle des nutriments, qui permettent l'acquisition de la charge chimique des solutions dans le sol et donc, l'alimentation en nutriments de l'écosystème. Les dépôts acides modifient l'action de ces vecteurs par des apports trop importants d'oxydes de soufre (SO_x), d'oxydes d'azote (NO_x), d'ammonium (NH₄⁺) et surtout d'ions hydrogène (H⁺) (Galloway 1995). La surabondance de ces éléments chimiques a des conséquences négatives sur l'ensemble du cycle nutritionnel d'un écosystème à l'intérieur même de chacun des compartiments du milieu forestier: atmosphère, hydrosphère, biosphère et pédocénose.

La végétation est la première à recevoir les précipitations acides par l'entremise de l'interception foliaire. Le dépérissement de la forêt se définit comme étant un affaiblissement général de la vigueur des arbres qui amenuise leur tolérance au froid, aux maladies et surtout aux insectes (Environnement Canada 1997). Les symptômes caractéristiques les plus graves reportés sont le stress nutritif, la diminution de la croissance des arbres, les déséquilibres cationiques et les carences foliaires (Manion 1981). Lors d'une averse, les dépôts humides acides entrent en contact avec le feuillage et les dépôts secs accumulés. Ces apports en éléments acides augmentent le lessivage des cations basiques sur les feuilles et les branches, diminuant ainsi la concentration des nutriments foliaires (Parker 1990). La croissance des arbres en est directement affectée si ces derniers ne peuvent compenser ces pertes par une augmentation du prélèvement des nutriments au sol ou par une redistribution interne à même l'arbre (Tomlinson 1990; Environnement Québec 1997). La plupart du temps, un dépérissement naturel affecte une seule espèce d'arbre ou quelques-unes. Le dépérissement actuel des forêts de feuillus de l'est du Canada touche l'ensemble des espèces d'un écosystème. En 1992, seulement la moitié des peuplements feuillus du Québec avaient conservé une certaine santé chimique (Ministère de l'Environnement et de la Faune 1996).

Le lessivage des cations basiques se poursuit dans le compartiment du sol. Les deux principaux effets des dépôts acides sur le sol sont (1) la diminution des cations basiques adsorbés sur les sites d'échange (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), une conséquence directe des apports importants d'ions H^+ et d'anions forts (SO_4^{2-} et NO_3^-) ainsi que (2) la solubilisation sévère de l'aluminium (Al^{3+}), un cation acide (Ulrich 1983 et 1987). Ces deux phénomènes provoqueraient à moyen terme des carences minérales susceptibles d'être responsables du dépérissement des forêts. À plus long terme, c'est tout le cycle biogéochimique au sein de l'écosystème qui est déstabilisé et incapable de répondre aux besoins des arbres (Ulrich, 1983).

Les acides anioniques forts (H_2SO_4 , HNO_3 , HNO_2) créés dans les eaux de précipitations, une fois infiltrés dans le sol par les eaux de percolation, entraînent la solubilisation et un déplacement des cations basiques (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) des sites d'échange à la solution du sol.

Les ions monovalents (K^+ , H^+) paraissent moins affectés par ce lessivage. La perte des cations bivalents dans l'horizon du site d'échange est ainsi remplacée par les apports d'ions H^+ . Ainsi, la solubilisation préférentielle des cations basiques et la percolation de ces derniers vers les horizons inférieurs ainsi que l'ionisation de l'Al seraient à l'origine de la baisse du pH de la solution du sol (Reuss 1983; Tomlinson 1990; Hendershot et al. 1991). Par conséquent, le vecteur géologique perd ses éléments nutritifs et la recharge annuelle en cations des végétaux forestiers devient peu à peu interrompue. La libération de l'aluminium dans la solution du sol entraîne la formation de l'hexa-aqua-aluminium ($Al(Al(H_2O)_6^{3+})$), une forme toxique d'aluminium (Wolt 1990). Celle-ci peut avoir des effets phytotoxiques nombreux pouvant être à l'origine du désordre physiologique des arbres comme, par exemple la réduction de la réplication de l'ADN ou de la respiration racinaire, une interférence dans la division cellulaire ou dans le prélèvement, la translocation et l'utilisation des nutriments (Foy et al. 1978; Foy 1983). Un autre phénomène engendré par l'acidification des sols est une augmentation de l'azote disponible pour la croissance forestière qui pourrait perturber les mécanismes de compétitivité entre les espèces et modifier le fonctionnement de l'écosystème, car l'azote est un élément qui limite la croissance des arbres. S'il y a une saturation en azote dans le sol, les effets sont ceux mentionnés précédemment, soit le lessivage des cations et l'acidification (Abrahamsen 1983).

Lorsque les sols atteignent leur niveau de saturation en eau, le ruissellement se décharge dans les lacs et les rivières. Environ 90 % de l'eau acheminée à un lac ou une rivière circule à travers les profils du sol, quoique la plus grande proportion circule aussi dans la nappe phréatique avant d'atteindre un lac ou une rivière. La chimie des eaux de surface est déterminée en grande partie par le type de substrat rocheux ou de la formation meuble d'un bassin versant ainsi que par le type de sol qui s'est développé à sa surface (Cosandey et Robinson 2000). Si le sol est très alcalin, les pluies acides pourront être partiellement, voire entièrement, neutralisées avant leur arrivée dans les lacs et la capacité naturelle du lac à neutraliser l'acidité par ses bicarbonates permettra au lac de conserver un pH équilibré. Par contre, dans un environnement au sol acide, comme une géologie granitique, ce qui est le cas des sols du Bouclier canadien, les eaux de surface sont susceptibles à l'acidification. La capacité naturelle du lac à neutraliser l'acidité peut s'épuiser et le pH du lac diminuer très

rapidement. En réponse à un apport important d'eau acidifié et à une perte de sa capacité naturelle de neutralisation des acides le lac ne conserve qu'un nombre restreint d'espèces de flore et de faune aquatique (Jeffries et al. 2000). De plus, certains lacs subissent au printemps des chocs acides annuels lors de la fonte des neiges, ayant pour conséquence une réduction considérablement de la population ichthyenne et entraîner un stress chez certaines espèces dont l'éclosion des œufs se produit durant cette période (Ministère de l'Environnement et de la Faune 1996).

Il est possible avec les technologies actuelles de réduire les émissions industrielles de SO_2 . Ces techniques de contrôle peuvent être appliquées avant, pendant et après la combustion fossile, par exemple la précombustion du soufre, la désulfuration des fumées ou la combustion à lit fluidisé pressurisé des émissions d'oxydes de soufre. Mais les teneurs de NO sont plus difficiles à réduire, car l'azote est directement combiné à la matière organique. Il est donc impossible de réduire les émissions de NO avant la combustion. Ces teneurs peuvent toutefois être atténuées pendant la combustion et, tout comme le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote peuvent être réduits en traitant les fumées (ARIC 2003).

D'ailleurs, en 1991 est signé un Protocole sur la qualité de l'air (ou *Clean Air Act Amendment*, CAAA) entre les États-Unis et le Canada. Les accords de 1991 visent à gérer la pollution transfrontalière entre les deux pays. Le Canada émettait un plafond de 2,3 M de tonnes pour les émissions de SO_2 dans l'est du pays pour la période de 1994-1999 et les États-Unis s'engageaient à réduire de 40 % leurs émissions nationales de SO_2 pour l'an 2010 par rapport au niveau de 1980 (Ministres fédéraux, provinciaux et territoriaux de l'Énergie et de l'Environnement 1998). Aussi, au cours des récentes décennies, la réduction des émissions de soufre a entraîné une diminution des teneurs en sulfates (SO_4^{2-}). En revanche, un déclin des BC atmosphériques a également été quantitativement relié à la diminution des SO_4^{2-} dans les précipitations (Hedin et al. 1994; Houle et al. 2004). En 1996-1997, les émissions de SO_2 pour l'Est du Canada étaient inférieures de 54 % au niveau de 1980 et les émissions de NO_x étaient stabilisées au niveau de cette même année (Fenech 1998; Ministres fédéraux, provinciaux et territoriaux de l'Énergie et de l'Environnement 1998).

C'est le ministère de l'Environnement du Canada qui est responsable du réseau canadien d'échantillonnage des précipitations acides (RCEPA) et du programme national du réseau de surveillance des transports à distance des polluants atmosphériques (Réseau-TADPA). Lors de l'évaluation de 1985 à 1994, Bouchard (1995) constate que, malgré les améliorations de la qualité de l'air, la moitié des lacs du Réseau TADPA-Québec n'ont subi aucune modification de leurs caractéristiques chimiques acides depuis 1985. En 1997, Houle et al. (2004) observent un déclin généralisé des concentrations en SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux de surface de tout le réseau TADPA-Québec. Les écosystèmes aquatiques des lacs situés dans la partie ouest du réseau manifestent une augmentation de l'alcalinité et paraissent récupérer, tandis que les lacs situés à l'est du réseau ont des réponses différentes: certains paraissent récupérer, d'autres sont stables et un certain nombre continuent de s'acidifier (Houle et al. 2004).

Des explications sont proposées pour expliquer la non récupération de nombreux lacs du réseau TADPA-Québec. Avant tout, certains modèles et études de terrain ont démontré que la réduction des émissions polluantes de S et N n'équivaut toujours pas aux taux de charges critiques prescrits. Le taux de charge critique se définit comme le seuil de dépôt polluant à ne pas dépasser afin d'éviter des perturbations chimiques dans le sol pouvant générer des effets nocifs à long terme dans la structure des fonctions d'un écosystème (Ouimet et al. 2001). Ainsi, il faudrait réduire encore de 75 % les émissions de SO_2 de 1996 pour atteindre les niveaux de charges critiques prescrits pour le S dans la région de l'est du Canada (Fenech 1998). De plus, les taux de charge critique pour N ne sont toujours pas connus, étant donné la complexité de cet élément chimique qui par l'entremise de la nitrification peut avoir des effets bénéfiques sur l'écosystème ou nocifs comme le S lorsqu'il y a une saturation de celui-ci dans la solution du sol (Bouchard 1995). À cela, il faut ajouter les réductions importantes de cations basiques atmosphériques corrélées avec celles des SO_2 ces 20 dernières années, privant l'écosystème d'une préneutralisation des dépôts acides et même de nutriments aériens (Hedin et al. 1994; Houle et al. 2004).

Il semble que la récupération chimique des lacs ne soit pas seulement contrôlé par la baisse des émissions de SO_4^{2-} , mais plutôt par la différence entre les taux de réduction des SO_4^{2-} et des cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+). Selon Houle et al. (2004), la diminution des dépôts de cations basiques est relativement lente et insuffisante pour expliquer la réduction de leurs concentrations dans les eaux de surface. En revanche, c'est certainement un facteur de ralentissement de la récupération des lacs, surtout dans les régions où les réserves en cations basiques sont actuellement basses. Une hausse des NO_x pour expliquer la non récupération de certains lacs est également à rejeter étant donné qu'il n'y a eu aucune augmentation de cet élément dans les précipitations de 1985 à 1996 (Houle et al. 2004).

Lors des épisodes d'acidification dans le sol, une attraction est exercée sur les cations basiques (BC) par l'apport de H^+ dans les acides anioniques forts augmentant la concentration des BC dans la solution du sol. La mobilisation de H^+ dans le sol provoque ainsi le lessivage des BC. Si leur perte n'est pas remplacée par les processus d'altération des minéraux, il s'ensuit une baisse des BC dans les réservoirs échangeables, remplacé par H^+ , donc une baisse du pH dans la solution du sol (Reuss 1983; Tomlinson 1990; Hendershot et al. 1991). Cette situation a été observée par Ouimet et al. (2001) au bassin versant du Lac Clair (Québec), et par Likens et al. (1996) au *Hubbard Brook Ecological Forest* (New Hampshire), où malgré des changements positifs du pH dans les eaux de surfaces, une large quantité de Ca et de Mg continuait d'être exportée par le sol dans les eaux de drainage. Cette exportation des cations basiques serait corrélée aux excès de H^+ accumulé dans les sols apporté par les acides anioniques de l'atmosphère (Likens et al. 1996). Ainsi, suite à l'acidification continue que connaît l'est du Canada depuis la révolution industrielle nord-américaine, il semble que la réserve en cations basiques échangeables des sols forestiers se soit épuisée et la fertilité des sols appauvries. La réduction des émissions polluantes au cours des dernières décennies a créé une nouvelle situation dans les rapports chimiques des écosystèmes forestiers. Les délais dans la récupération des lacs sont peut être dus à une baisse de la réserve échangeable des sols: les eaux qui transitent des sols vers les lacs étant appauvries en bases. La capacité des processus d'altération des minéraux à recharger le réservoir cationique échangeable des sols forestiers devient cruciale dans la récupération des forêts et des lacs.

Dès lors, on s'inquiète de la réduction des cations basiques échangeables dans les sols des bassins versants et, par conséquent, de son effet sur l'acidification des eaux de surface. Selon Houle et al. (1997), la nutrition des arbres et la croissance des forêts sont très affectées par l'acidification des sols et les pertes en éléments basiques. Il est de plus en plus évident que la fertilité des sols peut continuer à se dégrader malgré des améliorations au niveau de la réduction d'agents acidifiants atmosphériques.

La réduction des émissions polluantes et la capacité des sols à générer des éléments chimiques semblent être les seules issues pour un certain rétablissement des écosystèmes forestiers. Les signes d'améliorations de la qualité des eaux de surface des écosystèmes forestiers demeurent très faibles et localisés comparés aux réductions des polluants atmosphériques (Bouchard 1995; Houle 1997). C'est pourquoi, l'étude du taux d'altération des sols forestiers devient une source d'information non négligeable afin de comprendre et caractériser la capacité des sols à neutraliser les acides (CNA) et/ou à générer des éléments nutritifs pour l'écosystème forestier.

Le concept d'altération des sols se définit comme un processus de désintégration des roches et des minéraux en une forme plus stable sous des conditions variables d'humidité, de température et d'activité biologique qui prévalent à la surface de la Terre (Birkeland 1999). Ainsi, l'altération chimique se définit comme un changement chimique et/ou une transformation de la composition minéralogique des matériaux d'origine. Ils se produisent surtout sur les minéraux, car ces derniers sont rarement en situation de stabilité avec l'eau, la température et la pression près de la surface du sol. Les évidences de changement dans les matériaux dues à l'altération chimique sont perceptibles sur le terrain par des traces d'oxydation, la formation d'argile, la différence chimique et minéralogique du matériel d'altération relatif à celle du matériel parental ou bien par la chimie de l'eau qui circule à travers un pédon (Duchaufour 1991). Plusieurs réactions chimiques entre les minéraux et un constituant liquide (H_2O) contribuent à la libération des cations basiques des minéraux silicatés. De façon expérimentale, les chercheurs ont identifié quatre différentes réactions pour une majorité de minéraux dans les écosystèmes nordiques; (1) les réactions avec H^+ , (2)

les réactions avec H_2O , (3) les réactions avec CO_2 et (4) les réactions avec différents complexes ligands organiques polyvalents (COD (R^-)) (Warfvinge et Sverdrup, 1995).

La réaction d'ionisation (H^+) consiste en un échange ionique entre une solution et un minéral. Dans bien des situations, cet élément a la capacité de s'insérer dans la structure cristalline des minéraux et permet une accélération des processus de décomposition du minéral en augmentant la surface spécifique de ce dernier. En milieu acide ($pH < 5$) les cations basiques bivalents sont facilement lessivés et remplacés par H^+ , tandis que le même échange se produit avec OH^- en milieu alcalin ($pH > 8$) (Birkeland 1999).

L'hydrolyse (H_2O) est le plus important processus d'altération chimique pour la plupart des minéraux silicatés et des aluminosilicates. La réaction usuelle est celle de l'eau et d'un acide sur la surface d'un minéral. Celle-ci consomme un ion hydrogène et produit un hydroxyde, rendant la solution plus alcaline. Les sous-produits les plus communs de l'hydrolyse sont H_4SiO_4 , HCO_3^- , OH^- auxquels s'ajoutent des minéraux secondaires argileux s'il y a présence d'Al pour former un précipité. En général, les cations restent dans le sol, soit dans la solution du sol intégré au réseau cristallin des minéraux argileux ou sous la forme d'ions adsorbés à la surface des minéraux ou de la matière organique. D'autres ions sont intégrés au cycle de la biosphère (biota) à partir du sol et retournés dans le sol sous la forme de litière. Certains cations seront retirés du système pédogénétique avec HCO_3^- dans les eaux de percolation (Birkeland 1999).

La carbonatation (CO_2) est un processus d'altération en lien direct avec la pression partielle en CO_2 . La formation d'acide carbonique, causée au contact entre l'eau et le dioxyde de carbone, est importante pour la dissolution des carbonates et la décomposition de certaines surfaces minérales puisque les roches et minéraux carbonatés sont très solubles en surface. Cette solubilité de $CaCO_3$ varie essentiellement en fonction des différences entre la pression partielle en CO_2 et la concentration des ions H^+ (Birkeland 1999). La relation est donc très forte entre la solubilité du Ca^{2+} , le pH d'une solution et la température ambiante.

Les agents chélateurs ou les différents complexes ligands organiques polyvalents (R⁻) sont formés par des processus biologiques à l'intérieur du sol ou à la surface des roches. Les organismes du sol produisent des substances organiques qui ont la capacité de décomposer les minéraux en retirant de la structure cristalline des minéraux les cations métalliques. Ces acides organiques peuvent également participer aux réactions d'hydrolyse. Ainsi, les chélates intégrés dans la solution du sol entraînent un taux supérieur de libération de cations et ils sont stables à un pH sous lequel normalement les cations seraient précipités à l'extérieur des sites d'échanges (Birkeland 1999).

Les écosystèmes forestiers du sud du Bouclier canadien continueront de s'acidifier ou l'acidification sera stabilisée, malgré les améliorations de la qualité de l'air en ce qui concerne les émissions de SO₂. Contrairement au substrat rocheux appalachien plus alcalin, celui du Bouclier canadien est d'origine granitique, plutôt acide. Une récupération au niveau du pH des écosystèmes est peu probable dans cette région étant donné les dépôts continus de charge d'azote et d'ammoniaque qui ne diminuent pas (Adams et al. 2000). Le temps de récupération des écosystèmes est lié à la capacité de recharge des réservoirs de cations basiques échangeables dans les sols. Ces réservoirs ont été sans doute épuisés ou durement éprouvés au fil du temps par les apports continus des dépôts acides depuis de nombreuses décennies. Il n'est pas certain que les éléments inorganiques du sol aient conservé cette capacité de renouvellement des cations basiques dans le complexe échangeable. Avant qu'une amélioration chimique soit perceptible dans la qualité des eaux de surface, les réservoirs de cations basiques échangeables se doivent d'être rechargés.

Cette recherche tente d'établir un taux d'altération annuel des sols forestiers de la bordure sud du Bouclier canadien au Québec. L'objectif principal est de modéliser quantitativement la production de cations basiques libérés par l'altération chimique des minéraux dans les sols du Bouclier canadien. Nous utiliserons le modèle de simulation PROFILE, un modèle biogéochimique qui intègre des variables pédologiques, climatiques, hydrologiques et biologiques. C'est le modèle le plus utilisé en Europe pour évaluer l'apport annuel en cations basiques aux réservoirs échangeables des sols et la CNA (Hodson et al. 1997).

Certaines variables de PROFILE sont estimées par d'autres modèles. Pour les variables minéralogiques, le modèle UPPSALA reconstruit la minéralogie à l'aide d'algorithmes développés à partir de la chimie totale des sols, tandis que la variable de surface spécifique est estimée par une équation basée sur la distribution granulométrique de chaque échantillon: les proportions respectives d'argile, limon et sable étant multipliées par un coefficient propre à chaque classe texturale et ajusté à la densité du sol.

Le premier sous-objectif est d'évaluer si le modèle UPPSALA estime adéquatement la minéralogie. L'identification des minéraux argileux et limoneux sera fait par diffractométrie aux rayons X et les minéraux de la taille des sables seront identifiés et comptés à l'aide d'un microscope binoculaire. Ensuite, si les résultats d'identification empirique corroborent ceux de UPPSALA, nous procéderons au jumelage des données quantitatives (modèle et minéralogie des sables) avec celles qualitatives (DRX) afin d'obtenir une minéralogie semi-quantitative qui exploitera au maximum les possibilités minéralogiques offertes par PROFILE.

Le deuxième sous-objectif est d'examiner si l'équation basée sur la distribution granulométrique pour évaluer la surface spécifique peut remplacer adéquatement les mesures empiriques. Cela nécessite l'utilisation d'un appareil spécialisé d'adsorption des gaz. La surface spécifique des sols sera mesurée selon la méthode BET, une méthode courante et fiable pour évaluer la surface spécifique et suggérée par les critiques du modèle PROFILE (Hodson et al. 1998a). Nous allons donc tester les différents résultats de surface spécifique par l'intermédiaire du modèle PROFILE et vérifier l'efficacité de chacune dans l'évaluation du taux d'altération des sols.

Le troisième sous-objectif est d'identifier si certaines variables fixes ou constantes régionalement ont plus ou moins d'incidences sur les résultats d'altération. Les intrants du modèle PROFILE requiert plusieurs variables. En plus des variables mesurées en laboratoire, certaines variables du modèle seront des constantes régionales, d'autres fixes pour chaque bassin versant. Des tests de sensibilité seront effectués sur diverses variables fixes et

mesurées introduites dans le modèle afin de vérifier leurs impacts sur les résultats d'altération. De plus, les résultats d'altération de cette étude seront comparés à d'autres évaluations de l'altération établies selon le même modèle (PROFILE) ou selon d'autres méthodes comme la méthode des bilans élémentaires ou de budget intrant-extrant.

PARTIE I

RÉGION À L'ÉTUDE ET ANALYSES EN LABORATOIRE

CHAPITRE I

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE LA RÉGION À L'ÉTUDE

1.1 Localisation des bassins versants

La région à l'étude se trouve à l'intérieur du Bouclier canadien dans la partie méridionale québécoise de la province géologique de Grenville. Le terrain est délimité par les rivières des Outaouais à l'ouest et du Saguenay à l'est et s'étend sur une largeur d'environ 150 Km en direction nord à partir de la rive du fleuve Saint-Laurent. La région couvre cinq sous-régions du réseau TADPA section Québec représentative de la variabilité spatiale des dépôts humides de sulfates enregistrée entre 1985 et 1988 (Figure 1.1). La délimitation des cinq sous-régions a été basée sur l'homogénéité des concentrations de Ca et de Mg dans les eaux de surface des bassins versants (Bouchard 1995). À l'intérieur de ces sous-régions, 22 lacs de tête de réseau hydrographique ont été sélectionnés et échantillonnés (Figure 1.2). Ces lacs se situent le plus souvent dans des territoires protégés afin de les préserver des activités humaines. On retrouve neuf lacs dans des réserves fauniques (112, 113, 114, 202, 213, 311, 411, 413, 414), cinq lacs dans des comtés, cantons ou MRC (respectivement 313, 412, 501, 515, 502), quatre lacs dans des zones d'exploitation contrôlé (ZEC) (212, 214, 301, 302), deux lacs dans des parcs nationaux (201, 514), un seul dans un parc provincial (314) et un dernier dans la réserve amérindienne Doncaster (203) (Tableau. 1.1).

1.2 Climat

Le terrain d'étude se situe dans la zone climatique tempérée froide sans saison sèche du nord-est de l'Amérique du Nord. La moyenne des précipitations annuelles et de température pour les 22 lacs est de 1160 mm/an et 2°C. La sous région 1 (N.B. sous région sera abrégé en SR

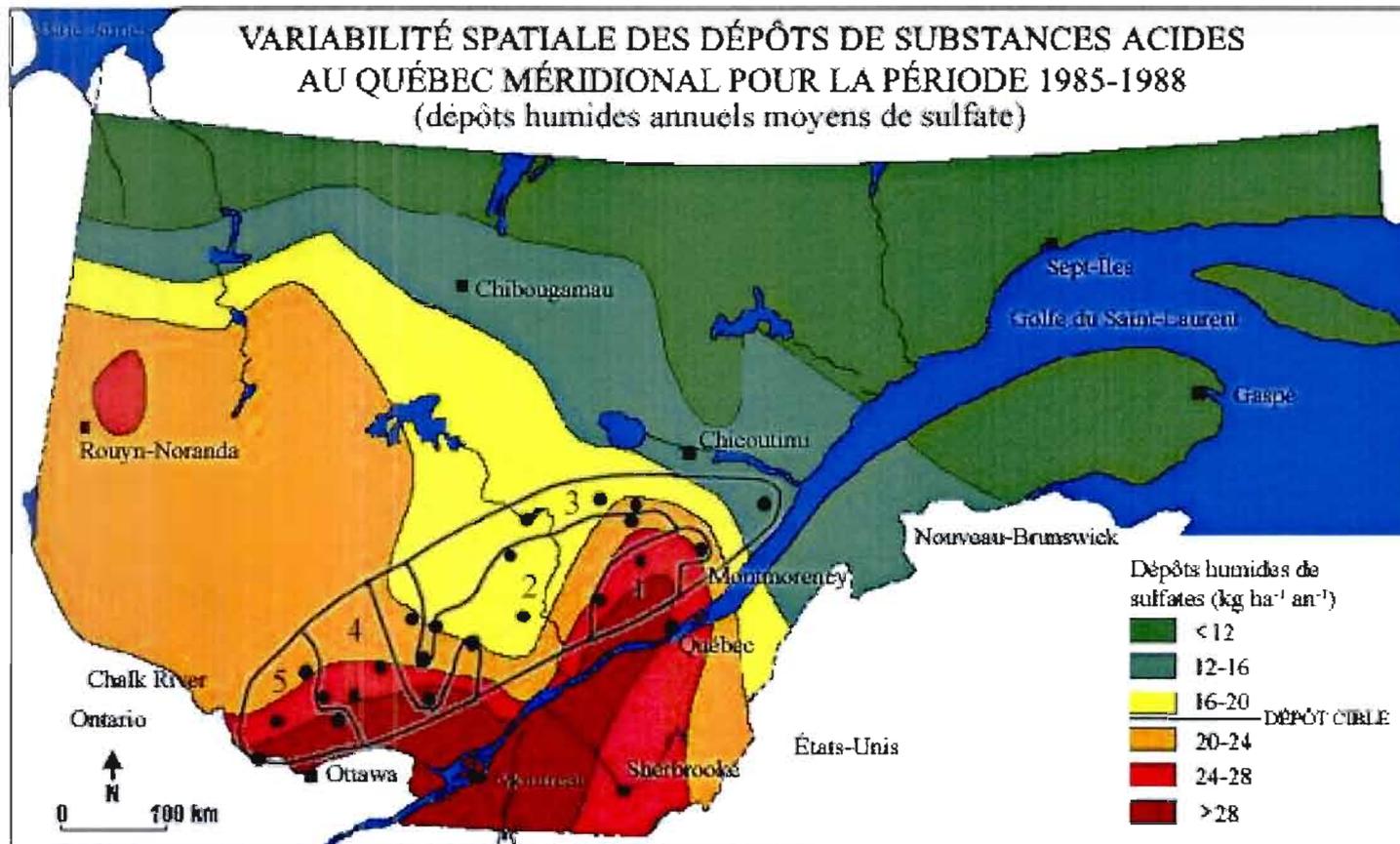


Figure 1.1 Dépôts humides de sulfates pour la période de 1985 à 1988 pour le Québec méridional et localisation de la région à l'étude.
 Source : Ministère de l'environnement du Québec, 2006; www.mddep.gouv.qc.ca/air/brochure/textel.htm#qualite et Environnement Canada, Base de données du réseau TADPA, 2001-2002.
 Adapté par Patrick Lamoureux, Département de géographie, UQAM, 2006.

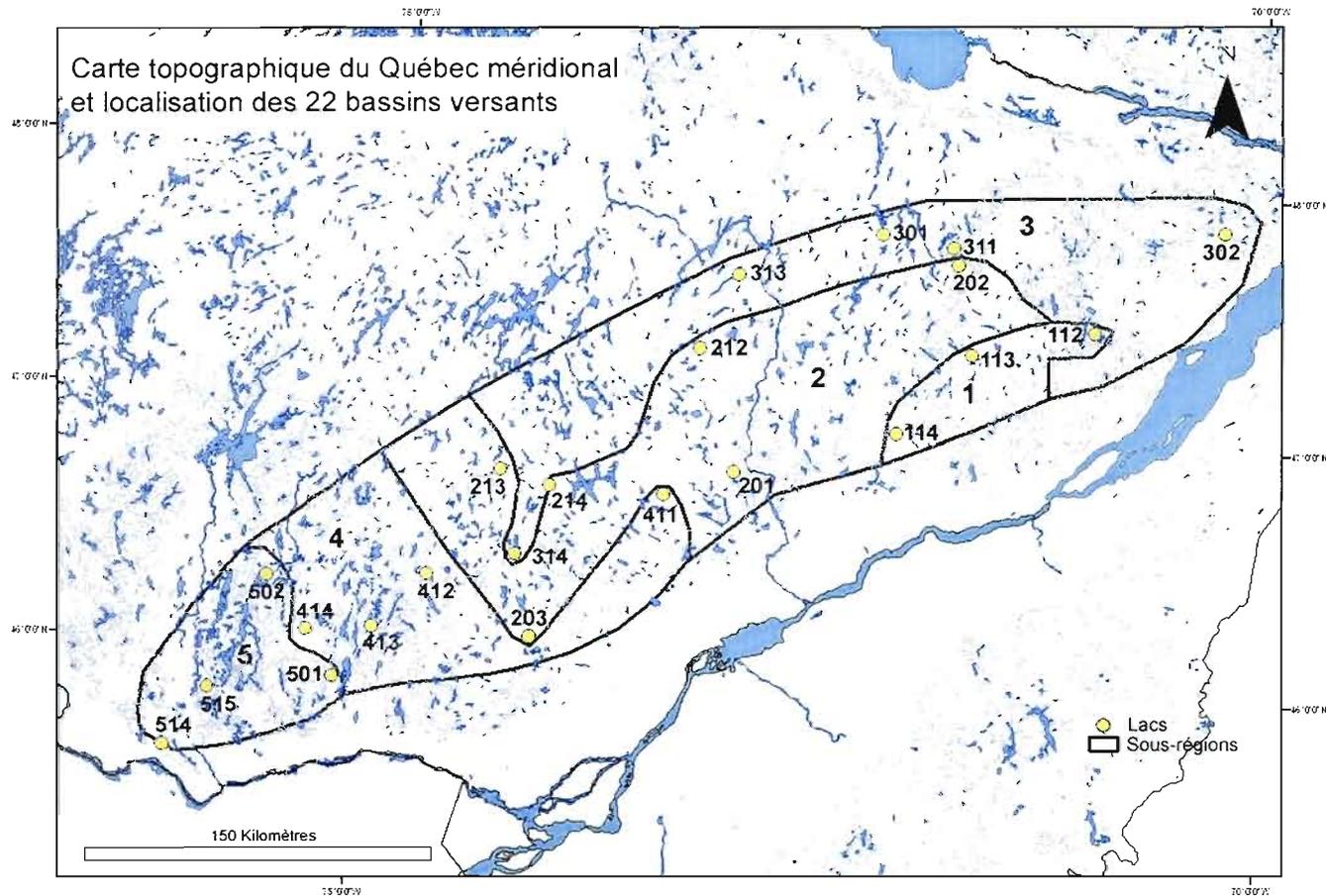


Figure 1.2 Carte topographique du Québec méridional et localisation des 22 bassins versants à l'étude et leur sous-région respective (Équidistance des courbes de niveau 250 m).
 Source : Ressources naturelles et faune, Photocartotheque québécoise, carte 21-22-31-32, échelle 1 :250 000
 Environnement Canada, Base de données du réseau TADPA, 2001-2002
 Réalisé et adapté par Olivier Caron, Département de géographie, UQAM, 2006.

Tableau 1.1 Localisation et données climatiques des 22 bassins versants sélectionnés

Toponymie	Numéro	Coordonnées Géo. (NAD 83)		Réf. Carto.	Précipitation	T° moyenne
Lac	Site	Latitude	Longitude	1:50 000	mm/an	°C
MacLeod	112	47,46667	-70,97778	21M/07	1434	-1,98
Josselin	113	47,36667	-71,66667	21M/05	1602	-0,05
Najoua (Bob)	114	47,04167	-72,08333	31P/01	1327	1,91
Éclair	201	46,85556	-73,00278	31J/15	1074	2,33
Lemaine	202	47,71944	-71,76944	21M/12	1356	1,04
Truite-Rouge	203	46,15000	-74,08333	31J/01	1299	2,06
Fauvette	212	47,33889	-73,23333	31P/06	1058	1,85
Adanys	213	46,80556	-74,32500	31J/16	962	0,82
Boisvert	214	46,75833	-74,04444	31J/16	964	2,00
Chômeur	301	47,83333	-72,21667	31P/16	1135	1,59
Thomas	302	47,88333	-70,24167	21M/16	1165	-0,03
Daniel	311	47,78889	-71,80556	21M/13	1202	1,85
Pothier	313	47,64167	-73,04167	31P/11	1187	1,41
Laurent	314	46,47500	-74,20000	31J/08	1124	2,46
Des Jones	411	46,75000	-73,38330	31J/11	1119	2,79
Gén.-White	412	46,36667	-74,68333	31J/07	1064	2,96
Grégoire	413	46,14167	-74,96667	31J/02	1057	3,14
Papillons	414	46,10833	-75,33333	31J/03	1072	2,79
Blais	501	45,93333	-75,16667	31G/14	1073	3,83
David	502	46,30833	-75,58333	31J/05	988	3,86
Clair	514	45,60000	-76,06667	31F/09	994	3,74
Duck (McArthur)	515	45,84170	-75,85080	31G/13	1221	3,84

Source: Environnement Canada, Base de données du réseau TADPA, 2001-2002

mm/an = millimètre par année

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

°C = degré Celsius

m = mètre

tout au long du mémoire) reçoit les plus importantes quantités de précipitation annuelle (1455 mm/an en moyenne) et elle possède la plus basse moyenne de température (0°C), tandis que pour les SR4 et SR5 les moyennes de précipitation annuelle sont les plus faibles (respectivement 1078 mm/an et 1070 mm/an) et les moyennes de température sont les plus élevées (dans l'ordre 2,92°C et 3,82°C). Les précipitations et la température dans les SR2 et SR3 sont près de la moyenne, soit 1120 mm/an et 1,7°C pour la SR2 et 1160 mm/an et 1,5°C pour la SR3 (Environnement Canada, Base de données du réseau TADPA, 2001-2002) (Tableau 1.1).

1.3 Description des bassins versants

1.3.1 Géologie et dépôt de surface

Les bassins versants sont localisés dans la province géologique de Grenville, d'âge Précambrien. Elle est composée d'un socle rocheux métamorphique et de roches ignées intrusives de haute température (Figure 1.3) (Caty et al. 1994). Selon Bouchard et Jolicoeur (2000), la planéité du relief dans la province de Grenville était déjà acquise avant même le Cambrien. Les épisodes climatiques chauds et humides du Tertiaire sont plutôt responsables de l'énergie du relief actuel suite au défoncement de la paléosurface infra-cambrienne. Quant aux glaciations du Quaternaire, elles n'ont que perfectionné le récurage des altérites, déjà amorcé par l'érosion fluviale normale (Bouchard et Jolicoeur 2000).

Les gneiss et paragneiss représentent un peu plus de 55 % de la géologie des bassins versants sélectionnés et caractérisent l'ensemble du territoire couvert. On recense les gneiss charnockitiques (201, 212, 213, 214, 302, 414), les gneiss gris à quartz (311, 411) et les paragneiss (313, 413, 501, 515). Les bassins versants de la SR1 et de l'est des SR3 et SR2 se trouvent dans une région d'intrusion plutonique. Le socle rocheux de la SR1 est constitué de granite (114) et de mangérite (112, 113). Cette intrusion de mangérite est également observée aux lacs Lemaine (202) et Chômeur (301). Une seconde intrusion plutonique caractérise l'aire d'étude. Elle se situe dans la terrane de Morin à l'intérieur des limites des SR2, SR3 et SR4. On retrouve un socle rocheux hétérogène avec de l'anorthosite au lac Truite-Rouge (203), de la mangérite au lac General-White (412) et de la syénite au lac Laurent (314). À l'extérieur de la terrane de Morin plus à l'ouest du terrain d'étude au lac Clair (514), la syénite a aussi été observée et des roches calcosilicatées comprenant des marbres ainsi que de la dolomie constituent le socle rocheux du lac David (502) (Tableau 1.2) (Environnement Canada, Base de données de réseau TADPA, 2001-2002; Caty et al. 1994)

Tableau 1.2 Description géologique et géomorphologique

Toponymie	Numéro	Pétrologie du socle rocheux	Dépôt de surface
Lac	Site		
MacLeod	112	Mangérite, granitoïde à orthopyroxène, charnockite, syénite à hypersthène	Tills
Josselin	113	Mangérite, granitoïde à orthopyroxène, charnockite, syénite à hypersthène	Tills mince sur sable
Najoua	114	Granite avec pegmatite	Tills
Éclair	201	Gneiss charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	Tills
Lemaine	202	Mangérite, granitoïde à orthopyroxène, charnockite, syénite à hypersthène	Tills
Truite-Rouge	203	Anorthosite et gabbronorite	Tills
Fauvette	212	Gneiss charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	Till et tills mince sur roc
Adanys	213	Gneiss charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	Tills
Boisvert	214	Gneiss charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	Till et tills mince sur roc
Chômeur	301	Mangérite, granitoïde à orthopyroxène charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	Tills et till mince sur roc
Thomas	302	Gneiss charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	n.d.
Daniel	311	Gneiss gris à quartz, plagioclase, biotite, hornblende, gneiss mafique et roches ultramafiques	Tills
Pothier	313	Paragneiss, quartzite, amphibolite	Tills et till mince sur roc
Laurent	314	Syénite, monzonite, granodiorite, diorite	Tills et till mince sur roc
Des Jones	411	Gneiss gris à quartz, plagioclase, biotite, hornblende, gneiss mafique et roches ultramafiques	Tills
Gén.-White	412	Mangérite, granitoïde à orthopyroxène, charnockite, syénite à hypersthène	Tills
Grégoire	413	Paragneiss, quartzite, amphibolite	Till mince et till
Papillons	414	Gneiss charnockitique, granitoïde à orthopyroxène	Tills et till mince
Blais	501	Paragneiss, quartzite, amphibolite	Tills
David	502	Roches calcosilicatées, marbre, dolomie, schiste, quartzite	Tills
Clair	514	Syénite, monzonite, granodiorite, diorite	Till sableux et n.d.
Duck	515	Paragneiss, quartzite, amphibolite	Till sableux et till

Source: Environnement Canada, Base de données du réseau TADPA, 2001-2002

n.d. = non disponible

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

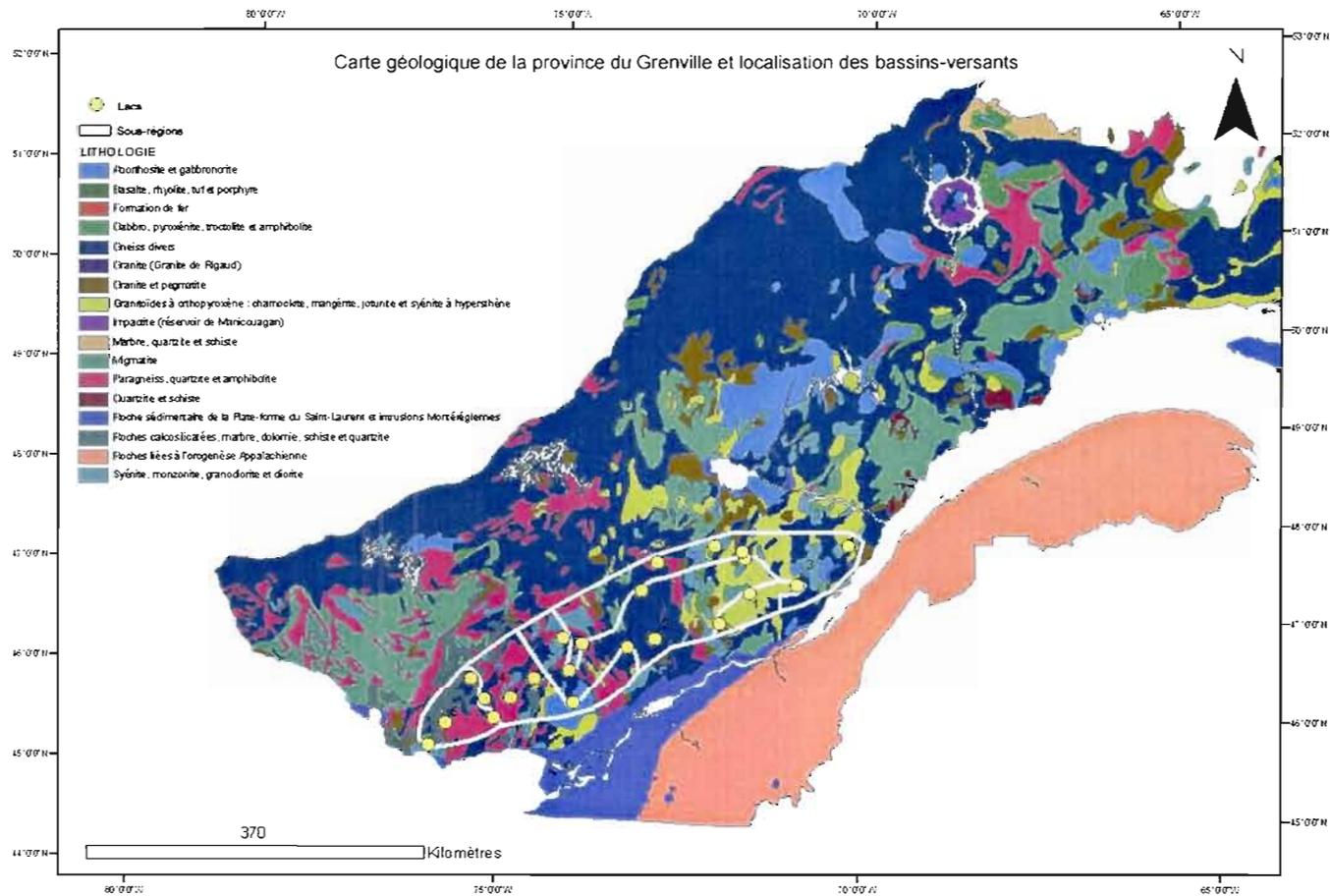


Figure 1.3 Carte géologique de la province de Grenville au Québec méridional et localisation des bassins versants à l'étude. (Les petits chiffres en noir désignent le numéro des sous-régions)

Source : Ressources naturelles et faune, carte géologique du Québec
 Réalisé et adapté par Olivier Caron, Département de géographie, UQAM, 2006.

Les dépôts sédimentaires à la surface du paysage actuel sont dus au passage du dernier Inlandis sur le Bouclier canadien au Wisconsinien supérieur et son retrait de la région à l'étude qui s'est effectué il y a 9 à 10 Ka (Simard 2003). La situation altitudinale des lacs sélectionnés apparaît être au-dessus des niveaux d'inondation glaciolacustres ou des écoulements fluvioglaciaires. Les dépôts de surface répertoriés sont tous des tills de fond ou d'ablation (Tableau 1.2). Les épaisseurs des dépôts varient peu, environ 60 % des sites d'échantillonnage ont 1m et plus de dépôts et 20 % ont une épaisseur entre 70 cm et 1 m. Les taux de pierrosité dans les dépôts varient entre 5 % et 50 % selon les différents pédon (Environnement Canada, Base de données de réseau TADPA, 2001-2002)

1.3.2 Topographie

Le terrain d'étude se situe essentiellement dans le plateau disséqué des Laurentides. L'altitude des lacs de la région selon la base de données du réseau TADPA (Environnement Canada 2001-2002) se situe entre 200 m et 1000 m (Tableau 1.3). La section nord-est de la région à l'étude se trouve dans un relief de hautes collines à des altitudes variant entre 533 m et 975 m (112, 113, 114, 202, 302, 311). La partie centrale du territoire en direction sud-ouest est caractérisée par un relief de hautes collines ceinturées par un relief de collines plus basses (Robitaille et al. 1998). L'altitude des lacs dans le relief de hautes collines augmente vers le sud-ouest avec des altitudes entre 244 m et 594 m (203, 213, 214, 314, 412, 411, 414, 501, 515). Les collines au nord ont des altitudes qui varie entre 213 m et 412 m (212, 301, 313, 502). L'altitude des lacs de la mince bande au sud de la région varie entre 244 m et 366 m (114, 201, 413, 514).

1.3.3 Hydrographie

Les lacs sélectionnés sont des têtes de réseau hydrographique. Ce sont des micros bassins versants représentant les multiples sources et les premières ramifications des grands réseaux hydrographiques de la région à l'étude. La plupart des lacs sont petits et peu profonds

Tableau 1.3 Description topographique et hydrographique des bassins versants

Toponymie	Numéro	Elevation	Périmètre	Profondeur (max.)	Superficie lac		Superficie bassin	
Lac	Site	m	m	m	ha	km ²	ha	km ²
MacLeod	112	975	4460	8,5	11,2	0,11	88,2	0,88
Josselin	113	671	5230	10,5	25,2	0,25	100,2	1,00
Najoua	114	366	4110	11	9,2	0,09	80,2	0,80
Éclair	201	320	2540	20	17,2	0,17	42,2	0,42
Lemaine	202	549	5380	9	8,2	0,08	81,2	0,81
Truite-Rouge	203	533	4000	13,5	8,2	0,08	78,2	0,78
Fauvette	212	396	6920	48	48,2	0,48	249,2	2,49
Adanys	213	594	5460	10	15,2	0,15	112,2	1,12
Boisvert	214	472	5800	9	21,2	0,21	168,2	1,68
Chômeur	301	412	3150	5	9,2	0,09	51,2	0,51
Thomas	302	625	4240	8	9,2	0,09	93,2	0,93
Daniel	311	533	5230	3	11,2	0,11	120,2	1,20
Pothier	313	305	4310	11,5	8,2	0,08	90,2	0,90
Laurent	314	457	4380	24,5	14,2	0,14	59,2	0,59
Des Jones	411	366	3690	6,5	12	0,12	79	0,79
Gén.-White	412	366	8940	19,5	30,2	0,30	218,2	2,18
Grégoire	413	320	4760	16	18,2	0,18	84,2	0,84
Papillons	414	412	3220	14	6,2	0,06	38,2	0,38
Blais	501	244	6150	46	46,2	0,46	129,2	1,29
David	502	213	5340	35	34,2	0,34	172,2	1,72
Clair	514	244	3460	20,5	11,2	0,11	61,2	0,61
Duck	515	335	5380	6,5	7	0,07	68	0,68

Source: Environnement Canada. Base de données du réseau l'ADPA. 2001-2002

m = mètre

Révisé par Patrick Lamoureux. UQAM. 2006

ha = hectare

km² = kilomètre carré

(Tableau 1.3). Le périmètre moyen des lacs est de 4,8 km. Le lac où l'on retrouve le plus petit périmètre est le lac Éclair (201) avec 2,5 km et le plus grand est le lac General White (412) avec 8,9 km. On retrouve 14 lacs dont le périmètre se situe entre 4 km et 6 km. La profondeur des lacs est très variable. On recense huit lacs avec une profondeur de moins de 10 m (112, 202, 214, 301, 302, 411, 515), dont le lac Daniel (311) le moins profond de tous les lacs sélectionnés avec seulement 3 m de profondeur. Les lacs les plus profonds sont moins nombreux. Il s'agit des lacs Fauvette (212), Blais (501) et David (502) avec des profondeurs respectives de 48 m, 46 m et 35 m. La profondeur des autres lacs se situe entre 10 m et 25 m.

La superficie moyenne des bassins versants est de 1 km² et celle des étendues lacustres est quelque peu inférieure à 0,2 km². La valeur la plus faible est observée au lac Des Papillons

(414) avec une superficie du bassin de 0,4 km² et de 0,06 km² pour le lac. Tandis que les valeurs de superficie les plus importantes ont été observées au lac Fauvette (212) avec une superficie de 2,5 km² pour le bassin et de 0,5 km² pour la superficie du lac. Notons que 16 bassins versants sur 22 ont une superficie de lac inférieure à 0,2 km² et que 14 lacs sur 22 ont une superficie de leur bassin inférieure à 1 km² (Environnement Canada, Base de données de réseau TADPA, 2001-2002).

1.3.4 Végétation et sols

Les peuplements forestiers de la région à l'étude font partie de la région forestière canadienne des Grands Lacs et du Saint-Laurent ainsi que de la région forestière boréale (Lauriault 1988). On y retrouve des forêts de résineux au nord et au nord-est, des forêts mélangées dans le relief des hautes collines et des forêts de feuillues sur la bande sud. La répartition géographique des bassins versants permet d'intégrer à l'étude les cinq domaines bioclimatiques de la section méridionale du Bouclier canadien au Québec (Tableau 1.4). Le domaine de l'érablière à tilleul est représenté au sud-ouest (502, 514, 515). Certaines espèces comme le frêne (*fraxinus nigra Marsh.*), l'hêtre (*fagus grandifolia Ehrh.*) et la pruche (*tsuga canadensis (L.) Carr.*) sont également présentes. Le domaine bioclimatique avec le plus grand nombre de lacs sélectionnés est celui de l'érablière à bouleau jaune (114, 203, 314, 411, 412, 413, 414, 501). Il faut noter que certains sites sont caractérisés par la présence de sapinière sur quelques versants même s'ils se trouvent dans le domaine de l'érablière. Le second domaine en importance est la sapinière à bouleau jaune et la bétulaie jaune à sapin (201, 202, 212, 214, 301, 313). Ce dernier domaine bioclimatique effectue la transition vers le domaine de la sapinière à bouleau blanc et de la sapinière à épinette blanche constituant la limite nord et est du terrain d'étude (112, 213, 302, 311). Le lac Josselin (113) est le seul bassin versant situé dans le domaine de la sapinière à épinette noire et de la pessière à mousse (Robitaille et al. 1998).

Les processus pédologiques dans la région sont relativement jeunes. Ils ont débuté au moment du retrait de l'Inlandsis Laurentien, dans un environnement climatique périglaciaire

qui a évolué vers le climat d'aujourd'hui (≈ 10 Ka) (Simard 2003). En général, le podzol est le type de pédon le plus régulièrement identifié (Tableau 1.4). Le lac General-White (412) est le seul site sélectionné avec une prédominance de brunisol. Plusieurs autres pédons n'ont pas été identifiés dans les relevés effectués par le Ministère. Il est vrai que certains de ces sols présentent les caractéristiques morphologiques des podzols, comme un horizon B d'au moins 10 cm et une couleur spécifique du matériau à l'état humide. Cependant, selon *Le système canadien de classification des sols* (1978), le diagnostic d'un podzol est également basé sur certains critères chimiques que doivent rencontrer les horizons B des pédons. Ceux-ci reposent sur le contenu en carbone organique ($>1\%$) et les quantités d'oxydes de fer extractibles au pyrophosphate ($<0,3\%$) dans un rapport (C organique/Fe extractible) de 20 ou plus dans l'horizon B. Force est d'admettre que ces analyses n'ont pas été effectuées par les chercheurs d'Environnement Canada.

La profondeur des sols incluant tous les horizons (A, B, C) est très souvent comparable à l'épaisseur des dépôts de surface. Ainsi, environ 60 % des sols ont une profondeur entre 70 cm et 1 m. Un seul pédon fait exception par sa minceur. Il s'agit du site 2 du lac Lemaine avec un pédon de 20 cm de profondeur.

Tableau 1.4 Description de la végétation et des sols

Toponymie	Numéro	Groupement végétal (dans les environs des sites visités)	Pédologie
Lac	Site	Peuplements	Type de sols
MacLeod	112	Sapinière à bouleau blanc	n.d.
Josselin	113	Pessière à mousse et sphaigne et bétulacée blanche à sapin	Podzol et n.d.
Najoua	114	Bétulacée, érablière, sapinière	Podzols
Éclair	201	Bétulacée à sapin	Podzol et n.d.
Lemaine	202	Bétulacée à sapin et sapinière à bouleau blanc	n.d.
Truite-Rouge	203	Bétulacée et érablière	Podzols
Fauvette	212	Bétulacée à sapin	n.d.
Adansy	213	Sapinière à bouleau blanc et érablière à bouleau jaune	Podzol et n.d.
Boisvert	214	Bétulacée jaune à sapin	Podzols
Chômeur	301	Bétulacée à sapin	n.d.
Thoinas	302	Sapinière, feuillus en régénération (10 à 15 ans), bétulacée	n.d.
Daniel	311	Sapinière à bouleau blanc	n.d.
Pothier	313	Bétulacée à sapin	n.d.
Laurent	314	Sapinière et érablières	n.d.
Des Joncs	411	Sapinière à bouleau blanc	Podzol et n.d.
Gén.-White	412	Érablière à bouleau jaune et bétulacée jaune à sapin	Brunisols et podzol
Grégoire	413	Érablière	Podzols
Papillons	414	Érablière à bouleau jaune et érablière à hêtre	Podzols
Blais	501	Sapinière à érable et érablière à bouleau jaune	Podzols
David	502	Érablière à frêne, érablière et érablière à hêtre en régénération	Podzols
Clair	514	Mélangé feuillus, érablière et prucheraie	Podzols
Duck	515	Bétulacée à érable et hêtre, hêtre et érable et érablière	Podzols

Source: Environnement Canada. Base de données du réseau TADPA. 2001-2002

n.d. = non disponible

Réalise par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 Stratégie d'échantillonnage des sols

La sélection des pédons et l'échantillonnage de ceux-ci ont été faits au cours des saisons estivales 2001 et 2002 par les chercheurs d'Environnement Canada dans le cadre du programme canadien de surveillance du réseau TADPA. La stratégie adoptée par les chercheurs fut de diviser les bassins versants en deux ou trois sections opposées à l'exutoire des lacs et d'échantillonner les pédons à environ 50 m de la rive des lacs (Figure 2.1). Un total de 62 pédons a été sélectionné. Tous les horizons des pédons ont été échantillonnés (LFH, A, B, C) et des subdivisions ont été faites dans les horizons B (B1, B2, etc.) sur la base d'un changement de couleur et/ou de texture. Sur le terrain, les horizons ont été décrits selon les critères du ministère de l'Environnement: profondeur, épaisseur incluant les variations de celle-ci dans le pédon, limite des horizons, couleur de ceux-ci selon la charte Munsell, texture, structure, consistance, cimentation et moucheture (Environnement Canada, Base de données du réseau TADPA 2001-2002). Cependant, la désignation des suffixes des horizons selon les critères du *Système canadien de classification des sols* (1978) n'a pas été faite par les techniciens du Ministère.

Nous nous sommes fixés comme mandat d'obtenir les taux d'altération de ces 62 pédons, avec analyses minéralogiques et simulation de l'altération avec le modèle PROFILE pour chacun des pédons. La très grande quantité d'échantillons et la somme de travail requise pour les analyses granulométriques, de surface spécifique et minéralogiques nous ont obligé à concentrer nos efforts seulement sur les horizons B pour ces analyses. Nous considérons l'horizon B comme étant l'horizon moyen entre celui très altéré de l'horizon A et celui peu ou pas altéré de l'horizon C. Comme il était impossible de faire les analyses sur toutes les subdivisions des horizons B (B1, B2, B3, etc.), les proportions de chaque sous-horizons B ont

Lac Des Papillons, localisation des sites d'échantillonnages (414)

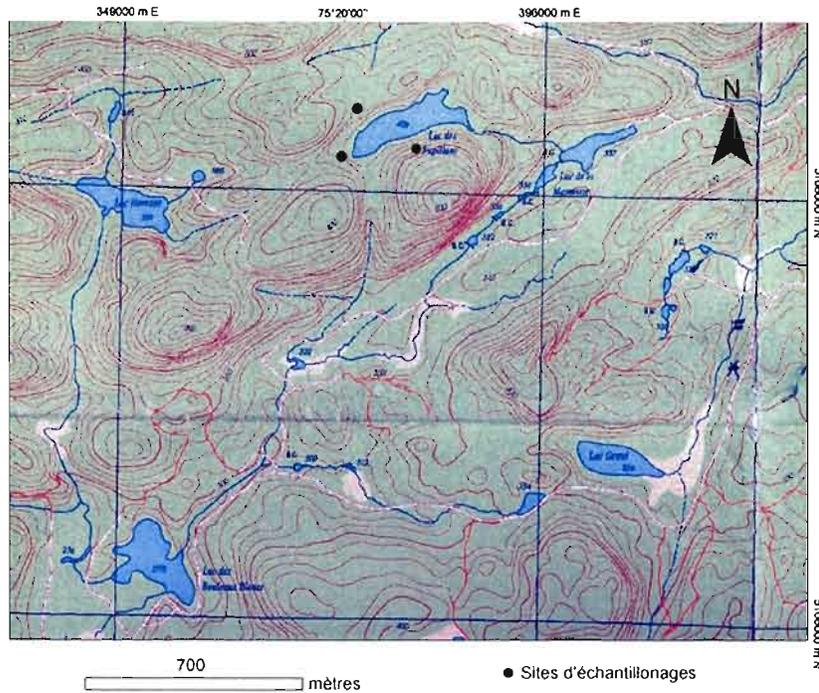


Figure 2.1
Exemple de lac de
tête de réseaux
(Lac Des
Papillons) et
localisation des
sites
d'échantillonnage.
Source:
Ressources
naturelles et de la
Faune, carte
31J03-200-0101,
1 : 20000
Réalisé et adapté par
Olivier Caron,
département de
Géographie,
UQAM, 2006

été mélangées afin d'obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble de l'horizon B de chacun des 62 pédons. Les mélanges ont eu lieu au laboratoire du milieu naturel du Département de géographie de l'UQAM. Pour ce faire, les proportions de sol à prélever dans chacun des sous-horizons B étaient basées sur l'épaisseur des sous-horizons (cm) et la densité (g cm^{-3}). La proportion à prélever dans chaque sous-horizon se calcule ainsi:

$$a = \frac{\text{épaisseur en cm du sous-horizon} * \text{densité en g cm}^{-3} \text{ du sous-horizon}}{\sum (\text{épaisseur} * \text{densité des sous-horizons de l'horizon B})}$$

Le tableau 2.1 illustre un exemple de ce calcul pour le lac MacLeod et l'annexe 1 présente le résultats pour tous les pédons.

Tableau 2.1 Exemple de pool pour 100 g : horizons B du lac MacLeod

Lac	Site	Sous-horizons	Épaisseur (cm)	Densité <2 mm (g cm ⁻³)	Ép.*De.	Proportion (1 g) (Ép.*De./Total)	Proportion (100 g)
MacLeod	112-1	B1	20	1,004	20,07	0,58	58
		B2	20	0,739	14,79	0,42	42
Total					34,86	1	100
MacLeod	112-2	B1	24	0,837	20,09	0,41	41
		B2	24	1,184	28,41	0,59	59
Total					48,51	1	100
MacLeod	112-3	B1	4	0,919	3,67	0,06	6
		B2	16	0,766	12,26	0,21	21
		B3	20	0,915	18,30	0,32	32
		B4	26	0,900	23,40	0,41	41
Total					57,64	1	100

Source: Environnement Canada, base de données du réseau TADPA 2001.

Réalisation : Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

2.2 Analyse physique des sols: granulométrie et surface spécifique

2.2.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique a été faite sur la fraction <2mm au laboratoire du milieu naturel du Département de géographie de l'UQAM. Un traitement préalable au peroxyde (H₂O₂ (30 % de volume)) a permis de détruire la matière organique. Les sables (2000-63 µm) ont été séparés des limons et argiles par tamisage humide à 63 µm, puis séchés à l'étuve et tamisés à sec à l'aide d'une colonne à tamis. Les particules de <63 µm ont été analysées à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser (Sedigraph 2100, Analysette 22). L'analyse était précédée d'une dispersion des particules dans une solution aqueuse avec du pyrophosphate de sodium. Afin de s'assurer que la variabilité des lectures obtenues ne dépassait pas une limite acceptable de 15 %, les mesures ont été effectuées deux fois pour chacun des échantillons. L'écart a été observé et la moyenne des lectures conservées. Cette moyenne des particules de <63 µm a été jumelée aux résultats des tamisages secs à partir du logiciel Fritsch (Analysette 22). Au final, nous obtenons la distribution granulométrique complète des échantillons. Les sédiments de >63 µm ont été conservés pour la minéralogie des sables. Les sédiments de <63 µm ont été maintenus en suspension afin de procéder à la minéralogie des limons et des argiles.

2.2.2 Surface spécifique

Le taux d'altération des minéraux est proportionnel à la surface spécifique des minéraux (A_s). La surface spécifique ou aire massique de certains matériaux représente la surface totale par unité de masse du produit accessible de chaque particule. Dans les systèmes non floculés (ou dispersés), on estime que les caractéristiques du système sont indépendantes des phénomènes qui se manifestent à la surface, par exemple le contact avec l'air ou l'eau. Ceci est exact dans la mesure où les énergies résultant de ces interactions sont inférieures à celles qui assurent la cohésion du système, donc :

$$A_s = E_{sl} - (E_s + E_l)$$

où A_s réfère à l'aire massique ou surface spécifique, E_s réfère à la phase solide, E_l réfère à la phase liquide et E_{sl} réfère à l'énergie de leurs interactions.

2.2.2.1 Théorie de l'équation BET

Il existe plusieurs façons d'évaluer la surface spécifique d'un échantillon de sol. La méthode la plus utilisée est celle de Brunauer – Emmett – Teller (1938) appelée communément méthode BET. Cette façon de déterminer la surface spécifique est basée sur un principe physique d'adsorption d'un gaz à basse température. La substance adsorbée forme une mince couche mono-moléculaire. Les dimensions des molécules de cette couche et leurs possibilités d'arrangement sont connues, ce qui permet ainsi d'évaluer la surface qui leur sert de support. Cette méthode permet une mesure directe de la texture géométrique des échantillons et tient compte également de la porosité à la surface des solides étudiés. Le phénomène d'adsorption est possible grâce à des forces faibles à la surface des solides qui agissent vers l'extérieur, en particulier sur des molécules de gaz entourant les échantillons (Caillère et al. 1982).

Ainsi, la surface spécifique se conceptualise comme étant la capacité de recouvrement moléculaire (V_m) par rapport à la quantité de gaz nécessaire pour couvrir une surface solide

avec une couche mono-moléculaire définie selon la surface, la température et la pression du gaz (Caillère et al. 1982). L'équation mathématique de ce concept est:

$$A_s = \frac{V_m * a * N}{V_o * W} = \left(a \frac{N}{V_o} \right) * \frac{V_m}{W}$$

où A_s réfère à la surface spécifique ($m^2 m^{-3}$ ou $m^2 g^{-1}$), V_m réfère à la capacité de recouvrement moléculaire, $[a]$ réfère à la section de la molécule adsorbée, $[N]$ réfère à la constante d'Avogadro ($6,0247 * 10^{23}$), V_o réfère au volume moléculaire ($22\,420 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$) et $[W]$ est le poids de l'échantillon (g).

La formule $a \frac{N}{V_o}$ dépend de la nature du corps adsorbé. L'azote par exemple, le gaz le plus utilisé dans ce procédé, possède un $[a]$ de $16,2 \text{ \AA}^2$.

Donc, $[A_s]$ est égale à $4,355 * \frac{V_m}{W}$ basée sur l'équation:

$$\frac{1}{V((P_o/P) - 1)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \left(\frac{P}{P_o} \right)$$

où V réfère au volume de gaz adsorbé à une pression relative (P_o), V_m réfère au poids d'un adsorbant constituant un unique feuillet d'une surface couverte ou ce qu'on a déjà nommé la capacité de recouvrement moléculaire, $[C]$ réfère à la constante BET liée à l'énergie d'adsorption de la première couche adsorbée (par conséquent, sa valeur est une indication de la magnitude des interactions entre l'adsorbant et le produit d'adsorption), $[P]$ réfère à une pression d'équilibre de la substance adsorbée et P_o réfère à une pression relative de saturation à la température de l'adsorption.

Une fois les points P et P_o rapportés sur un graphique, on obtient une droite avec laquelle on peut calculer V_m et C . La variation P/P_o est linéaire dans l'équation BET et elle est restreinte à $0,3 P/P_o$ (Brantley et Mellott 2000).

2.2.2.2 Surface spécifique selon la méthode BET

Dans cette étude, l'analyse de la surface spécifique par la méthode BET a été faite au Département des Sciences du sol de l'Université de la Saskatchewan, Saskatoon (Canada) à l'aide de l'instrument de mesure *Quantachrome Autosorb-1 gas sorption system* (Quantachrome Corporation, Syosset, NY). L'autosorb-1 permet de mesurer la quantité de gaz adsorbée ou désorbée à la surface d'un solide à un certain équilibre de vapeur pressurisée selon la méthode volumétrique statique. Pendant que l'adsorption ou la désorption se crée, la pression dans la cellule change jusqu'à ce qu'un équilibre soit établi dans la cellule. La quantité de gaz adsorbée ou désorbée à la pression d'équilibre est la différence entre la quantité de gaz admis ou rejeté et la quantité de gaz nécessaire pour remplir les cavités autour de l'adsorbant. L'Autosorb-1 possède la capacité de mesurer l'adsorption ou la désorption de volume d'azote à différentes pressions (P/P_0). Un programme informatique calcule la surface spécifique selon la méthode BET à partir des données de pression/volume (Quantachrome Corporation Autosorb-1 Gas Sorption system manual, Syosset, NY).

Nous avons fait l'analyse des surfaces spécifiques sur tous les échantillons des horizons B des 62 pédonns à l'étude. Les résidus grossiers (par exemple les radicelles et les racines) et les fibres ont été retirés à l'aide d'une pince et la matière organique à l'aide de peroxyde (30 % volume). Dans le but de faciliter et d'accélérer le processus de dégazage, nous avons séché les échantillons au four à 25°C et brisé les agrégats à l'aide d'une spatule en plastique au lieu d'un mortier afin de ne pas créer de nouvelles surfaces. De même, nous nous sommes assuré que la petite quantité de matériel déposée dans la cellule d'analyse (0,1 g à 0,9 g) soit homogène et représentative de l'échantillon. Les cellules d'échantillons ont été dégazées à l'aide de l'appareil *Autosorb-1* pendant une période de 4 à 12 heures. Une différence de poids en moyenne de 0,0145 g a été observée sur l'ensemble des échantillons après le dégazage, qui permet de faire le vide d'air dans la cellule d'analyse et de le remplacer par de l'hélium. Une fois l'échantillon dégazé, nous avons initié le processus d'adsorption de l'azote sur les échantillons. La faible température énoncée dans la théorie a été maintenue à l'aide d'un bassin d'azote liquide (N_2) contrôlé par un bras mécanique et la température mesurée par une sonde thermique.

Pour chaque échantillon, l'analyse BET s'est faite en développant des régressions multipoints (c'est-à-dire 5 points: 0,1-0,15-0,2-0,25-0,3). Une fois l'analyse terminée, le programme de contrôle de l'appareil établit la droite P/P_0 permettant d'obtenir la surface spécifique. Les résultats obtenus en $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ont été ajustés à la densité du sol et transformés en $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ comme l'exige PROFILE. Afin de s'assurer de la qualité des résultats tout au long des analyses, nous avons intercalé un échantillon standard (AlO_2 alpha dont la surface spécifique est entre 10 et $16 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$) à tous les dix échantillons de sol analysés et des duplicatas d'échantillons ont été faits à tous les quatre échantillons.

2.2.2.3 Surface spécifique selon la méthode BET avec extraction des oxydes

Les résultats obtenus par l'analyse BET nous ont semblé surestimer la surface spécifique des échantillons, compte tenu du jeune âge des pédons ($\sim 10 \text{ Ka}$) et de la texture des sols (Hodson et al. 1998a). Ces résultats semblent s'expliquer par la présence d'un revêtement d'oxyhydroxides sur la surface des minéraux, communément retrouvés dans les sols podzoliques du Québec (Courchesne et al. 1996). Ces revêtements ont pour effet d'augmenter la surface spécifique ou bien la réduire s'ils favorisent la formation d'agrégats (Hodson et al. 1998a; 1998b).

De ce fait, afin d'évaluer la différence maximale qu'il peut y avoir entre l'analyse BET sur les échantillons à l'état naturel et une analyse BET où les revêtements d'oxyhydroxides seraient enlevés, nous avons sélectionné les échantillons qui présentaient les valeurs les plus élevées pour chaque sous-région, à l'exception de la SR4 étant donné une insuffisance de matériel dans l'échantillon. Nous avons donc extrait les oxyhydroxides sur 6 échantillons (114-3, 201-1, 214-3, 301-3, 502-3, 514-3) présentant une gamme de surfaces spécifiques représentatives de l'ensemble des échantillons analysés, en utilisant l'oxalate d'ammonium selon la méthode de McKeague et Day (1966). La méthode de McKeague et Day (1966) consiste à mélanger dans une éprouvette 250 mg de sol ($< 2 \text{ mm}$) à 10 ml d'une solution à l'acide d'oxalate d'ammonium concentrée à $0,2 \text{ mol L}^{-1}$. Les éprouvettes ont été scellées et enrobées d'un sac plastique noir afin de les conserver dans l'obscurité et mélangées de façons

orbitales pendant 4 heures. Une aliquote de la solution a servi à la détermination de Fe et d'Al par colorimétrie et une analyse de la surface spécifique a été faite avec l'*Autosorb-1* sur les échantillons débarrassés de leurs revêtements d'oxydes.

2.2.2.4 Surface spécifique selon l'équation texturale

Les concepteurs du modèle PROFILE proposent d'estimer la surface spécifique à partir de la courbe granulométrique standard par le calcul suivant:

$$A_s = (x_{\text{sable}} * 8.0 + x_{\text{limon}} * 2.2 + x_{\text{argile}} * 0.3) * \frac{\rho_{\text{sol}}}{1000}$$

où A_s réfère à la surface spécifique totale, $x_{\text{argile, limon, sable}}$ réfèrent aux proportions de chaque classe texturale et ρ_{sol} réfère à la densité de l'échantillon.

Cette formule est basée sur les travaux de Sverdrup (1990) qui a analysé la fraction <2 mm d'une centaine (92) d'échantillons de sols recueillis sur le Bouclier précambrien suédois. Le développement d'un indice s'est fait en établissant une relation entre la granulométrie et la surface spécifique obtenue par la méthode BET sur des échantillons débarrassés de leurs oxyhydroxides. Cet indice de surface spécifique est ensuite ajusté selon sa position dans le profil en le multipliant par sa densité apparente.

Cette équation est très employée par les utilisateurs du modèle PROFILE (par exemple Koptsik et al. 1999; Van Der Salm 2001; Stutter et al. 2003), car les concepteurs du modèle PROFILE suggèrent fortement d'utiliser la surface spécifique estimée selon l'équation texturale compte tenu des problèmes d'analyse liés, tels que susmentionné, aux interférences que peuvent générer la présence d'oxyhydroxides et la matière organique (Sandén et Warfvinge 1992). De toute évidence, nous avons préféré être prudent et suivre la suggestion de Hodson (1998b) d'utiliser la méthode BET afin de valider les surfaces spécifiques estimées avec l'algorithme développé par Sverdrup (1990).

2.3 Analyse chimique des sols: Chimie totale

Les analyses de chimie totale ont été réalisées au Département de Géologie de l'Université McGill (Montréal, Québec) sur les échantillons tamisés à 2 mm, puis réduits en poudre (<100 mesh) dans un mortier en agate. Une aliquote des échantillons a par la suite subi une fusion au métaborate de lithium (LiBO_2) à 1000°C et la perle produite a été dissoute dans l'acide nitrique (HNO_3), puis analysée par fluorescence des rayons X (XRF). Les éléments chimiques suivants ont été dosés: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 et les métaux traces.

2.4 Minéralogie des sols

2.4.1 Minéralogie des argiles et des limons à partir de la diffraction au rayon X

Les minéraux présents dans les particules $<63 \mu\text{m}$ ont été identifiés par diffractométrie aux rayons X (DRX). C'est la principale méthode de caractérisation de la minéralogie des argiles et des limons, d'ailleurs éprouvée depuis les années 1950 (Brindley 1951; Siever 1952; Klug et Alexander 1954). Pratiquement inchangée depuis, elle demeure à ce jour une méthode fiable et reconnue par plusieurs chercheurs (Griffin 1971; Brindley et Brown 1980; Agriculture Canada 1984; Olsson et Melkerud 1989; Fichter et al. 1998; Kahle et al. 2002).

Les cristaux des minéraux sont des réseaux naturels dont les intervalles entre les plans réticulaires s'insèrent dans un même ordre de grandeur que la longueur d'onde d'un rayon X, qui est très courte (0,1 à 10 \AA). Les rayons X sont ainsi diffractés par les cristaux et donnent des phénomènes d'interférences identiques. Ce concept théorique, appelé Loi de Bragg, définit les conditions de diffraction d'un rayonnement X par une famille de plans réticulaires (Figure 2.2). Pour chaque espèce cristalline, un diagramme de diffraction caractéristique est donné dans un ensemble de raies de diffraction (pics) dont la position et l'intensité correspond à la structure cristalline des espèces (Voïnovitch 1971). L'angle mesuré (en θ) doit être converti en unité angstrom (Å) basé sur l'équation de Bragg ($n\lambda=2d\sin\theta$). Cette équation permet de transformer l'angle de diffraction (θ) en une distance moléculaire plane

(d) répété sur tous les pics (n) des longueurs d'ondes (λ) de tous les rayons X (Griffin 1971). Pour la pratique, une table de conversion a été élaborée afin de faciliter la transformation des données (Brindley et Brown 1980). Une fois la position des raies enregistrée, on les compare à des données de référence.

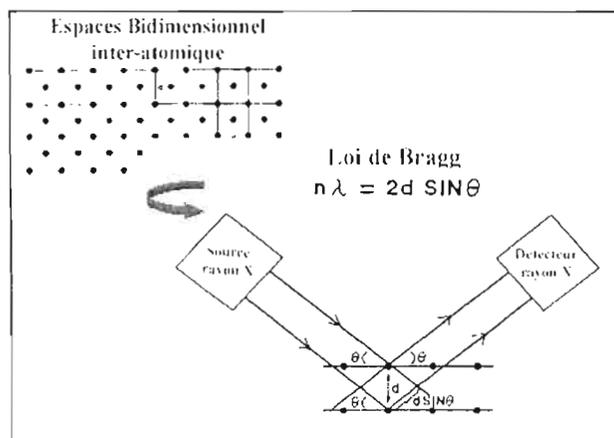


Figure 2.2 Principe de diffraction et illustration de la Loi de Bragg (Adapté et traduit de Eslinger et Peaver, 1988)

La méthode DRX est très précise en ce qui concerne l'identification des minéraux, mais déterminer les proportions de chacun demeure semi-quantitatif et peu fiable (Voïnovitch 1971; Griffin 1971; Kahle et al. 2002). Les méthodes d'analyse ne sont pas les mêmes pour les limons et les argiles, qui ont été séparés les uns des autres par sédimentation et siphonage selon la loi de Stokes. On utilise la méthode

des poudres de Debye-Scherrer (orientation au hasard) pour les limons, qui sont constitués presque essentiellement de minéraux primaires détritiques. Il suffit d'un seul diagramme pour identifier les raies primaires des minéraux. Les raies secondaires et tertiaires permettent de confirmer la présence de ces minéraux par rapport à un autre dont la raie primaire est similaire. Il est à noter qu'aucun prétraitement à l'oxalate n'a été fait sur les échantillons pour les analyses de DRX afin d'éviter la transformation ou l'altération des phyllosilicates ou d'autres minéraux sensibles.

Dans la fraction $<2 \mu\text{m}$, on retrouve des minéraux secondaires, à structure en feuillets, et des minéraux primaires finement divisés (Caillère et al. 1982). La méthode des agrégats orientés est utilisée pour l'identification des minéraux secondaires, car les feuillets s'orientent alors parallèlement à la surface de la lame, et la réflexion basale (raies primaires 001) mesure l'épaisseur du feuillet, qui varie selon les espèces minérales. Cette méthode a l'avantage de simplifier les diagrammes, mais également de rendre la tâche plus difficile dans la

différenciation des minéraux argileux qui ont des structures similaires. Un pic peut correspondre à deux minéraux différents, par exemple la réflexion (001) de la kaolinite à 7 Å coïncide avec la réflexion (002) de la chlorite. Conséquemment, différents traitements sur un même échantillon sont nécessaires afin de faire une identification par discrimination des minéraux présents (Voïnovitch 1971).

Deux sous-échantillons par échantillon de la fraction argileuse ont respectivement été saturés en magnésium (Mg) et en potassium (K) selon le protocole de Brindley et Brown (1980) au laboratoire du milieu naturel du Département de géographie de l'UQAM. Chaque aliquote saturé a été déposé sur une lame de verre et séché à température ambiante. L'argile débarrassée de son excédent d'eau adhère à la lame en une surface homogène. L'analyse s'est poursuivie au Département des sciences des ressources naturelles de l'Université McGill (Montréal, Québec), sur un diffractomètre Rigaku Miniflex CN 2005 avec filtre-Ni et radiation au Cu K- α . Les lames saturées en K ont été passées à la température de la pièce. Elles ont ensuite été chauffées à 300°C, puis à 550°C : trois diffractogrammes K sont ainsi obtenus. Les lames saturées en Mg ont été passées à température de la pièce, puis elles ont été saturées à l'éthylène glycol: deux diffractogrammes Mg sont obtenus.

Nous avons par la suite interprété chacun des 310 diagrammes (5 diffractogrammes aux rayons X \times 62 échantillons). Les pics sont alors identifiées sur chacun des diffractogrammes et les pics en $[2\theta]$ sont transformés en $[\text{Å}]$, à l'aide de table de conversion établie par l'équation de Bragg (Brindley et Brown 1980). L'identification de la présence de certains minéraux doit se faire par discrimination. On débute l'interprétation par le diffractogramme de Mg à température ambiante, suivi de celui-ci au Mg saturé au glycérol pour terminer avec l'interprétation des diffractogrammes de K dans l'ordre des traitements subis : température de la pièce, chauffé à 300°C et chauffé à 550°C (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Table de conversion des degrés Thêta (θ) en Angstrom (\AA) de la première raie de certains minéraux secondaires et effets des traitements sur la position des diffractions [2 θ]

Minéraux	MgCl ₂		KCl			Remarques
	Sécher à l'air	Éthylène Glycol	Sécher à l'air	300 °C	550 °C	
Gibbsite	4,85 [18,4]	4,85 [18,4]	4,85 [18,4]	4,85 [18,4]	4,85 [18,4]	aucun changement
Kaolinite	7-7,15 [12,6-12,4]	7-7,15 [12,6-12,4]	7-7,15 [12,6-12,4]	7-7,15 [12,6-12,4]	disparaît	devient amorphe à 550 °C, 2e raie à 3,57 \AA
Métahalloysite	7,2-7,5 [12,4-11,8]	7,2-7,5 [12,4-11,8]	7,2-7,5 [12,4-11,8]	7,2-7,5 [12,4-11,8]	disparaît	devient amorphe à 550 °C
Halloysite	9,9-10,1 [8,9-8,7]	10,8 [8,2]	9,9-10,1 [8,9-8,7]	9,9-10,1 [8,9-8,7]	disparaît	devient amorphe à 550 °C, prend de l'expansion lorsque saturée à l'éthylène glycol et le raie sont plus large dans KCl
Illite	10 [8,8]	10 [8,8]	10 [8,8]	10 [8,8]	10 [8,8]	aucun changement, mais raie plus intense lorsque chauffée
Montmorillonite	12,4-15 [7,1-5,9]	17-18 [5,2-4,9]	12,4-15 [7,1-5,9]	10 [8,8]	10 [8,8]	expansion à 17 \AA lorsque saturée à l'éthylène glycol, une fois chauffée descend à 10 \AA à >300 °C
Vermiculite	14-15 [6,3-5,9]	14-15 [6,3-5,9]	10-12 [8,8-7,3]	10 [8,8]	10 [8,8]	déshydrate en étape
Vermiculite-Al	14-15 [6,3-5,9]	14-15 [6,3-5,9]	14-15 [6,3-5,9]	10 [8,8]	10 [8,8]	déshydrate lorsque chauffée à 300 °C
Chlorite	14-15 [6,3-5,9]	14-15 [6,3-5,9]	14-15 [6,3-5,9]	14 [6,3]	14 [6,3]	aucun changement, mais raie plus intense lorsque chauffée à >550 °C

Adapté de Brindley et Brown 1980, Eslinger et Peaver 1988 et Tucker 1991

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Tableau 2.3 Table d'interprétation des diffractogrammes aux rayons X des limons et conversion des Thêta [2θ] en angstrom (Å)

Minéraux	1 ^{ère} raie	2 ^e raie	3 ^e raie
Albite	3,176 [28,1]	3,211 [27,8]	3,752 [23,7]
Apatite	2,814 [31,8]	2,72 [32,95]	2,778 [32,2]
Amphiboles	8,2 à 8,5 [10,8-10,4]	8,40 à 8,5 [10,5-10,4]	n.d.
Anatase	3,51 [25,4]	1,891 [48,1]	2,379 [37,8]
Anorthite	3,2 [27,9]	3,18 [28,05]	4,04 [22]
Biotite-Muscovite	10,1 [8,7]	4,98 [17,8]	3,32 [26,85]
Calcite	3,04 [29,35]	2,1 [42,85]	2,29 [39,3]
Dolomite	2,89 [30,95]	1,785 [51,2]	2,191 [41,2]
Épidote	2,68 [33,45]	2,9 [30,85]	2,69 [33,3]
Feldspath plagioclase	3,17 à 3,21 forte [28,15-27,8]	6,4 à 6,5 faible [13,8-13,6]	4,03 [22] forte
Feldspath potassique	3,25 à 3,29 faible [27,45-27,1]	6,4 à 6,5 faible [13,8-13,6]	4,22 [21,05] forte
Goethite	4,18 [21,25]	2,69 [33,3]	2,452 [36,65]
Grenats	2,569 [34,9]	1,54 [60,1]	2,873 [31,1]
Halite	2,821 [31,7]	1,994 [45,5]	1,628 [56,5]
Hématite	2,69 [33,3]	1,69 [54,3]	2,51 [35,75]
Pyroxènes	2,87 à 3,16 (3,25) [31,25-28,25 (27,45)]	2,53 à 2,6 [35,45-34,35]	n.d.
Ilménite	2,754 [32,5]	2,544 [32,25]	1,726 [53,1]
Magnétite	2,53 [35,45]	1,48 [62,75]	1,614 [57,2]
Olivines	2,46 à 2,49 [36,55-36,05]	2,458 [36,6] ou 2,512 [35,7]	3,883 [22,9]
Pyrite	1,633 [56,3]	2,709 [33,05]	2,423 [37,15]
Quartz	3,342 [26,65] faible ou 3,4 [26,2] forte	4,26 [20,85]	1,82 [50,1]
Sanidine	3,31 [26,9]	3,78 [23,55]	n.d.
Talc	9,35 [9,45]	1,53 [60,5]	4,59 [19,35]
Zircon	3,3 [27]	2,518 [35,7]	4,43 [20,05]

Source Bringley et Brown 1980. De Kimpe 1984 et site WEB webmineral.com/X-Ray.shtml

Réalisation Patnck Lamoureux, UQAM, 2006

Les limons séchés ont été insérés dans un support, les minéraux étant orientés au hasard, et le même diffractomètre a été utilisé: un seul diffractogramme par échantillon est ainsi obtenu. Les pics en [2θ] sont alors convertis en [Å] (Brindley et Brown 1980; De Kimpe 1984; Web mineral.com 2003). On tente d'identifier si les pics les plus distincts correspondent à un ou plusieurs minéraux ou bien si la raie observée est secondaire ou tertiaire (Tableau 2.3).

2.4.2 Minéralogie des sables

L'objectif visé par l'analyse minéralogique des sables est de quantifier les minéraux présents dans un échantillon et de comparer ces résultats à la minéralogie qualitative des argiles et des limons ainsi qu'aux résultats obtenus à partir du modèle mathématiques UPPSALA. Un échantillon par bassin versant a été sélectionné pour un total de 22 échantillons analysés. Nous avons utilisé la fraction des sables moyens (250 à 500 μm) des horizons B pour faire l'analyse minéralogique des sables. Celle-ci a été faite au laboratoire du milieu naturel du Département de géographie de l'UQAM.

Les sables ont été identifiés par examen au microscope binoculaire en combinant deux méthodes: celle suggérée par Agriculture Canada (1984) traitant de l'analyse des minéraux légers et celle adaptée de chercheurs états-uniens (Laniz et al. 1964; Jersak et al. 1994). Les échantillons ont été préalablement traités au peroxyde (15 %) et les grains ont été nettoyés dans une solution d'acide oxalique ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) (2 %) afin d'enlever les traces d'oxydes de fer. Une cinquantaine de grains par échantillon, représentatifs de l'ensemble, ont été fixés à une lame à l'aide de colle époxy. La surface exposée a été attaquée par des vapeurs d'acide fluorhydrique (HF) afin d'altérer la surface des minéraux et permettre aux solutions subséquentes d'avoir une emprise sur les silicates. Le HF est un acide très nocif et cette étape doit se faire à l'intérieur d'une hotte chimique de laboratoire, ce que nous avons fait au laboratoire d'Agriculture Canada au Département des Sciences du sol de l'Université de Saskatchewan, Saskatoon. Par la suite, les lames ont été trempées dans une solution saturée de cobaltinitrite de sodium ($\text{CoN}_6\text{Na}_3\text{O}_{12}$) et séchées: les feldspaths potassiques sont alors colorés en jaune. Ensuite, on trempe les lames dans une solution de rouge Amarante (1%) ($\text{C}_{20}\text{H}_{11}\text{N}_2\text{Na}_3\text{O}_9\text{S}_3$): les feldspaths plagioclases sont alors colorés en rouge. L'identification et les comptages des minéraux se fait par la suite au microscope binoculaire: les feldspaths potassiques sont jaunes, les feldspaths plagioclases sont rouges, les quartz restent incolores, les calcites sont poudreuses et les autres minéraux sont identifiés par leur couleur et leur structures cristallines (muscovite, biotite, ferromagnésiens et grenats) (Agriculture Canada 1984).

2.4.3 Minéralogie selon le modèle UPPSALA développé à partir de la norme CIPW

L'analyse minéralogique des argiles et des limons par DRX est qualitative. Elle permet de confirmer la présence de minéraux dans un échantillon de sol, mais ne les quantifie pas (Griffin 1971; Kahle et al. 2002). Par contre, nous avons pu calculer les pourcentages des différents minéraux présents dans les sables. Toutefois, les particules au-dessus de 50 μm se dissolvent trop lentement pour être significatives dans une analyse d'altération chimique d'un sol (Sandén et Warfvinge 1992). Dans ce mémoire, une nouvelle méthode pour quantifier les minéraux présents dans les fractions $<63 \mu\text{m}$ est proposée, en comparant les résultats DRX des limons et argiles, les comptages des sables et l'estimation avec le modèle UPPSALA.

UPPSALA est un modèle de calcul normatif qui reconstitue la minéralogie à partir d'une analyse chimique totale et la formule chimique des minéraux (Tableau 2.4). Des modèles plus connus, telle la norme CIPW, répartissent les éléments chimiques dans différents minéraux, mais CIPW a été élaborée pour des matériaux d'origine volcanique ou métamorphique. Comme les roches et dépôts de notre région d'étude sont de nature granitique et plutonique, il est préférable d'utiliser le modèle UPPSALA développé à partir de la norme CIPW, mais a été conçu pour des sols dérivés de ce type de matériel, soit des roches ignées ou métamorphiques, des grès et des dépôts de surface d'origine granitique (Sverdrup 1990).

Dans UPPSALA, les minéraux sont regroupés en différents ensembles ayant une composition chimique et un taux de dissolution similaires (Sandén et Warfvinge 1992; Bélanger et al. 2004), par exemple ce que UPPSALA considère comme «épidote» comprend en fait la plupart des minéraux de la famille des épidotes et des pyroxènes. La «hornblende» d'UPPSALA regroupe toutes les amphiboles comme la glaucophane, les amphiboles ainsi que la trémolite; alors que la «chlorite» comprend la chlorite trioctaédrique, l'illite dans sa forme primaire, la vermiculite trioctaédrique dans sa forme primaire ainsi que la biotite si le résultat de chlorite est très élevé (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 Équation utilisée par le modèle UPPSALA pour la reconstruction des minéraux

Minéraux	Abr.	Formules dans UPPSALA
Feldspath-K	FK	$5,88 * K_2O - 0,588 * Na_2O$
Plagioclase	PL	$11,1 * Na_2O - 0,22 * FK$
Apatite	AP	$2,24 * P_2O_5$
Hornblende	HO	$6,67 * CaO - 3,67 * AP - 0,2 * PL$
Muscovite	MU	$2,08 * K_2O - 0,208 * Na_2O$
Chlorite	CL	$3,85 * MgO - 0,39 * HO - 0,39 * MU$
Epidote	EP	$0,1 * HO + 0,03 * PL - 0,3$
Calcite	CA	$1,79 * CaO - 3,67 * AP - 0,2 * PL$
Quartz	QZ	$SiO_2 - 0,63 * PL - 0,68 * FK - 0,38 * MU - 0,33 * CL - 0,45 * HO - 0,42 * EP$

Source: Adapté de Sandén et Warfvinge. 1992

Réalisé par Patrick Lamoureux. UQAM. 2006

Le modèle PROFILE nous permet d'incorporer dans sa base de données une plus grande variété de minéraux que ce qui est généré par UPPSALA, par exemple PROFILE divise les feldspaths plagioclases entre le plagioclase sodique et le plagioclase calcique, soit l'albite et l'anorthite, deux minéraux dont la résistance à l'altération est fort différente et qu'UPPSALA ne distingue pas. Aussi, nous avons utilisé la norme CIPW afin d'évaluer les proportions d'albite et d'anorthite qui se trouvent dans les feldspaths plagioclases des échantillons (www.union.edu/PUBLIC/GEODEPT/COURSES/petrology/norms.htm). Nous avons constaté que le total des pourcentages d'albite et d'anorthite correspondent à ceux calculés avec UPPSALA pour les feldspaths plagioclases. Le modèle PROFILE distingue également les micas entre muscovite et biotite et il inclut des groupes de minéraux primaires et des minéraux secondaires comme la vermiculite et la kaolinite (Tableau 2.5).

2.4.4 Synthèse minéralogique

Les minéraux identifiés et quantifiés sont ceux requis par PROFILE (Tableau 2.5). Les deux méthodes quantitatives (UPPSALA, minéralogie des sables) ont servi de base à la pondération, tandis que la méthode qualitative (DRX) a permis de confirmer la présence de minéraux et/ou d'inclure des minéraux que UPPSALA et la minéralogie des sables n'ont pu observer.

Tableau 2.5 Section *mineral stack* du modèle PROFILE

Mineralogie (%)

Feldspath-K
Anorthite
Albite
Amphiboles
Pyroxenes
Épidotes
Grenats
Biotite
Muscovite
Chlorite
Vermiculite
Apatite
Kaolinite
Calcite
Quartz
Total

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

En effet, UPPSALA développé à partir de la norme CIPW nous donne seulement 10 minéraux, tandis que la minéralogie de PROFILE laisse place à 15 minéraux. PROFILE intègre des minéraux secondaires (vermiculite et kaolinite) et d'autres groupes de minéraux (pyroxènes et grenats) afin d'optimiser la représentation réelle de la minéralogie des échantillons.

Il s'agit dans un premier temps, d'identifier les minéraux présents et, dans un deuxième temps, de quantifier chacun de ces minéraux. Le tableau 2.6 présente les minéraux identifiés par les différentes techniques et les étapes suivies pour les quantifier.

Une fois tous les minéraux de la fraction <2 mm identifiés, il s'agit de compléter et bonifier UPPSALA selon la procédure suivante:

- (1) partager les proportions d'épidote données par UPPSALA entre pyroxènes et épidotes. Ainsi, si les DRX des limons nous indique la présence d'épidote et de pyroxène, nous attribuons la moitié des proportions d'épidote d'UPPSALA aux pyroxènes, étant donné que les DRX ne permettent pas d'établir de proportion pour aucun des deux minéraux.
- (2) partager les proportions des micas d'UPPSALA entre biotite et muscovite selon leurs proportions respectives que nous avons comptabilisées dans la minéralogie des sables. Toutefois, il faut noter que la biotite est plus sensible à l'altération et de ce fait elle risque de se retrouver en proportion inférieure à la muscovite dans les argiles et les limons.
- (3) attribuer une proportion aux grenats en fonction de leur proportion dans les sables et/ou de leur présence dans les limons. Ce minéral, dont la composition chimique ressemble aux groupes des ferromagnésiens, n'est pas considéré par UPPSALA mais requis dans la

minéralogie de PROFILE. L'évaluation du taux des grenats dans les échantillons a été faite selon la minéralogie des sables et les DRX des limons. Si les grenats sont absents de la minéralogie des sables d'un pédon, mais qu'il y a une présence significative de ces minéraux dans les DRX des limons, les pourcentages des grenats dans les pédons voisins ont été utilisés.

- (4) insérer les proportions de minéraux secondaires (vermiculite, kaolinite), qui ont été identifiés dans les DRX des argiles. Rappelons que les DRX ne permettent pas de quantifier les minéraux mais indiquent seulement leur présence. Plusieurs précautions sont nécessaires à cette étape. Il faut évidemment faire en sorte de ne pas dépasser les taux d'argiles calculés dans l'analyse granulométrique, qui sont d'ailleurs très faibles (en moyenne 1,83 %). D'autre part, les

particules de $<2 \mu\text{m}$ ne sont pas constituées exclusivement de minéraux secondaires, mais incluent des minéraux primaires micro-fragmentés, tels le quartz, et des oxyhydroxydes (Birkeland 1999). Nous avons extrait ces oxyhydroxydes à l'oxalate sur six échantillons pour la surface spécifique et calculé les taux d'oxyhydroxydes de Fe et d'Al de ces derniers. Les taux de Fe et d'al

obtenus ont été corrélés aux proportions d'argile de leur échantillon respectif ($r^2=0,876$, $P<0,000$). Ainsi, à partir de la formule de régression nous avons soustrait ces taux d'oxyhydroxydes aux taux d'argiles de tous les échantillons pour ainsi calculer la proportion globale de minéraux présents dans la fraction argileuse des échantillons, que nous avons divisée en fonction de la présence des minéraux secondaires dans les DRX des argiles (Figure 2.3). Comme PROFILE ne permet l'inclusion que de quelques minéraux secondaires (kaolinite, vermiculite), nous avons considéré la métahalloysite et l'halloysite

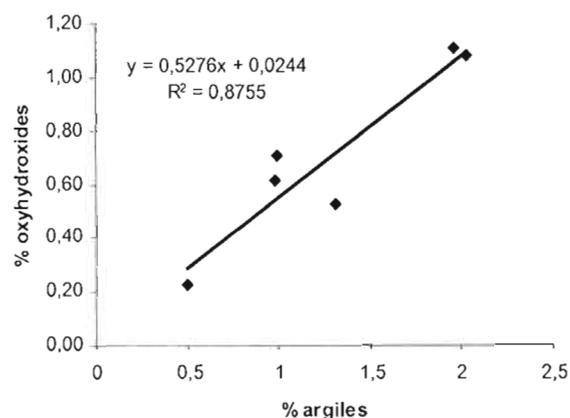


Figure 2.3 Soustraction des oxyhydroxydes de la fraction $<2 \mu\text{m}$ (Section 2.2.1) de 6 échantillons sélectionnés pour l'extraction des oxyhydroxydes.

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

comme une kaolinite, car ces argiles font partie de ce groupe de minéral secondaire, et la montmorillonite comme une vermiculite, étant donné leur formule chimique similaire. Le taux de vermiculite a été soustrait de la muscovite. Étant donné qu'aucun minéral dans UPPSALA ne possède une formule chimique comparable au groupe de la kaolinite, nous avons ajouté les taux de kaolinite à la pondération totale, ce qui donne un résultat final de proportion quelque peu supérieur à 100 %. En dernière étape (5), il s'agit donc de repondérer les résultats afin d'en arriver à un total de 100 %.

Tableau 2.6 Synthèse minéralogique semi-quantitative (%) en 5 étapes

Étapes	Minéralogie Uppsala	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite/Biotite	Chlorite	Epidotes	Calcite	Quartz	Total		
	Minéralogie des Sables	Feldspath-K	Plagioclase	Grenats	Muscovite	Biotite	Ferromagnésiens	Quartz	Total					
	Minéralogie des Argiles	Illite	Gibbsite	Kaolinite	Métahalloysite	Halloysite	Montmorillonite	Vermiculite	Chlorite					
	Minéralogie des Limons	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Micas	Chlorite	Epidotes	Calcite	Dolomite	Anatase		
		Goethite	Grenats	Halite	Hématite	Pyroxènes	Ilménite	Magnéite	Olivines	Pyrite	Quartz	Talc	Zircon	
	Présence Minéralogique	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite	Biotite	Epidotes	Pyroxènes	Grenats	Calcite	Chlorite	
		Vermiculite	Kaolinite	Quartz										
1	Proportion préliminaire	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Micas	Chlorite	Epidotes	Pyroxènes	Calcite	Quartz		
2	Proportion préliminaire	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite	Biotite	Chlorite	Epidotes	Pyroxènes	Calcite	Quartz	
3	Proportion préliminaire	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite	Biotite	Chlorite	Epidotes	Pyroxènes	Grenats	Calcite	Quartz
4	Minéraux secondaires (%)						5 Minéralogie finale (%)							
	Feldspath-K						Feldspath-K							
	Anorthite						Anorthite							
	Albite						Albite							
	Amphiboles						Amphiboles							
	Pyroxènes						Pyroxènes							
	Epidotes						Epidotes							
	Grenats						Grenats							
	Biotite						Biotite							
	Muscovite						Muscovite							
	Chlorite						Chlorite							
	Vermiculite						Vermiculite							
	Apatite	% Minéraux dans fraction <2µm						Apatite						
	Kaolinite	Formule: 0,5276*(2,63) + 0,0244 =						Kaolinite						
	Calcite						Calcite							
	Quartz						Quartz							
	Total						Total							

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

CHAPITRE III

RÉSULTATS D'ANALYSE DES SOLS

3.1 Propriétés physiques et chimiques des sols

3.1.1 Texture

La distribution granulométrique des échantillons se caractérise de façon générale par de faibles proportions d'argile et des proportions de sable de plus de 50 % dans 85 % des échantillons (Tableau 3.1). Seulement, un tiers des échantillons possèdent des proportions d'argiles >2 %, le maximum étant 5,26 % dans la SR5 (515-3). À partir d'un diagramme ternaire, nous pouvons qualifier la texture des 62 horizons B de loam sableux à 68 % et les autres de sable loameux ou de loam limoneux (Figure 3.1). Ce sont surtout les proportions de limon qui font varier la classification texturale des échantillons. Environ la moitié des pédons ont des proportions de limons entre 15 % et 35 % et l'autre moitié >35 %. Aucune tendance régionale n'est perceptible dans les distributions granulométriques. Les différences texturales observées paraissent être liées à la position du pédon sur le versant. Par exemple, un pédon situé à mi-pente est plus susceptible à l'érosion comparé à un pédon au pied d'une pente, plus susceptible au dépôt des sédiments (Birkeland 1999).

Tableau 3.1 Résultats d'analyses texturales pour les 22 Bassins versants (%)

Lacs	MacLeod			Josselin			Najoua			Éclair			Lemaine			Truite Rouge	
Sites	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3
Argiles	0,8	0,5	0,2	0,7	1,5	1,3	1,3	1,1	1,3	1,0	1,0	2,3	2,6	1,6	2,3	1,5	0,5
Limons	39,6	19,8	24,2	27,2	50,1	30,3	32,2	32,6	29,3	47,5	40,8	61,2	34,5	51,6	42,1	33,6	33,2
Sables	59,6	79,7	75,6	72,2	48,4	68,4	66,4	66,3	69,4	51,6	58,3	36,5	62,8	46,8	55,6	65,0	66,3
Lacs	Fauvette			Adanys			Boisvert			Chômeur			Thomas			Daniel	
Sites	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2
Argiles	3,6	3,8	1,1	1,3	1,3	2,5	2,0	0,5	1,6	2,0	2,1	0,5	0,2	1,0	1,3	3,3	2,6
Limons	37,0	42,9	28,8	28,0	26,4	30,0	31,8	24,9	52,5	39,1	46,0	25,5	15,2	25,2	26,0	31,1	31,6
Sables	59,4	53,4	70,0	70,7	72,3	67,6	66,3	74,6	45,8	58,9	51,9	74,0	84,6	73,8	72,7	65,6	65,8
Lacs	Pothier			Laurent			Des Jones			General-White			Grégoire			Des Papillons	
Sites	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3
Argiles	2,8	1,5	2,1	3,3	1,1	1,3	1,3	0,7	2,1	4,1	4,9	1,6	3,3	1,0	1,5	2,6	1,6
Limons	40,6	39,9	39,3	52,4	42,2	33,6	40,3	41,7	38,4	32,7	35,1	33,3	54,0	40,1	29,2	44,2	36,1
Sables	56,6	58,6	58,6	44,4	56,6	65,1	58,4	57,6	59,4	63,2	59,9	65,0	42,7	58,9	69,3	53,2	62,2
Lacs	Blais			David			Clair			Duck			Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006				
Sites	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3						
Argiles	1,1	2,0	1,1	1,0	2,6	1,1	4,4	0,5	1,8	3,4	5,3						
Limons	26,4	40,4	43,8	37,8	53,7	20,5	62,1	32,5	49,9	42,2	47,3						
Sables	72,4	57,6	55,0	61,2	43,7	78,3	33,5	67,0	48,3	54,4	47,5						

Distribution Ternaire Texturale des horizons B

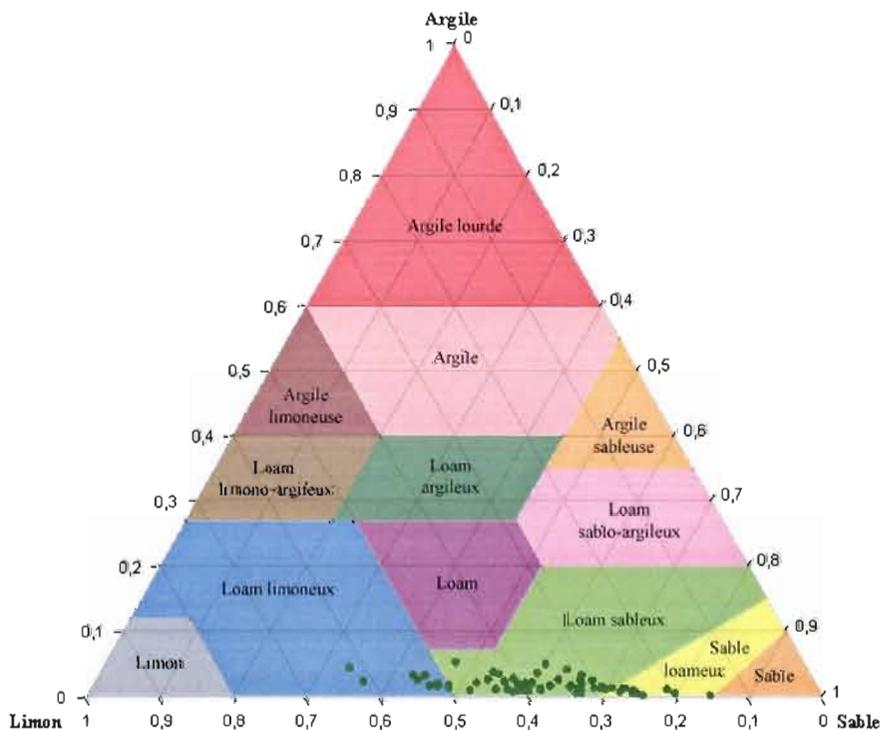


Figure 3.1 Distribution ternaire des analyses granulométriques des horizons B. Adapté du *Système canadien de classification des sols*, 1978 Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

3.1.2 Surfaces spécifiques

Les résultats de surface spécifique selon la méthode BET varient de façon considérable. La moyenne pour l'ensemble de la région à l'étude est de $2,75 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ (Tableau 3.2). Les résultats se situent entre $0,32 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ (113-1) et $6,82 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ (301-3). À l'exception de la SR1 où on retrouve tous les résultats dans le premier quartile, toutes les sous-régions sont représentées dans les autres quartiles. Il faut également noter que les valeurs entre $2 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ et $3 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ sont dominées à 80 % par des pédons des SR2 et SR3. Le troisième quartile se situe quant à lui dans les environs de $3,6 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$.

Tableau 3.2 Résultats de surface spécifique (As) selon la méthode BET ($\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$)

Lac	MacLeod			Josselin			Najoua		
Site	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3
As	$0,88 \times 10^6$	$1,05 \times 10^6$	$0,92 \times 10^6$	$0,32 \times 10^6$	$0,44 \times 10^6$	$0,82 \times 10^6$	$0,75 \times 10^6$	$1,34 \times 10^6$	$1,80 \times 10^6$
Lac	Éclair			Lemaine			Truite-Rouge		
Site	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	
As	$4,48 \times 10^6$	$2,33 \times 10^6$	$3,46 \times 10^6$	$2,25 \times 10^6$	$1,12 \times 10^6$	$2,21 \times 10^6$	$2,10 \times 10^6$	$1,85 \times 10^6$	
Lac	Fauvette			Adanys			Boisvert		
Site	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3
As	$2,48 \times 10^6$	$2,18 \times 10^6$	$3,66 \times 10^6$	$2,31 \times 10^6$	$2,81 \times 10^6$	$1,47 \times 10^6$	$1,83 \times 10^6$	$3,86 \times 10^6$	$3,95 \times 10^6$
Lac	Chômeur			Thomas			Daniel		
Site	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	
As	$1,44 \times 10^6$	$2,11 \times 10^6$	$6,82 \times 10^6$	$2,16 \times 10^6$	$2,96 \times 10^6$	$2,62 \times 10^6$	$2,75 \times 10^6$	$4,32 \times 10^6$	
Lac	Pothier			Laurent			Des Jons		
Site	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3	411-1	411-2	411-3
As	$5,11 \times 10^6$	$2,90 \times 10^6$	$4,21 \times 10^6$	$2,99 \times 10^6$	$1,78 \times 10^6$	$2,34 \times 10^6$	$4,38 \times 10^6$	$2,73 \times 10^6$	$3,17 \times 10^6$
Lac	General-White			Grégoire			Des Papillons		
Site	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	
As	$3,23 \times 10^6$	$2,60 \times 10^6$	$1,85 \times 10^6$	$3,97 \times 10^6$	$2,17 \times 10^6$	$3,52 \times 10^6$	$1,79 \times 10^6$	$3,86 \times 10^6$	
Lac	Blais			David			Clair		
Site	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	
As	$1,58 \times 10^6$	$2,70 \times 10^6$	$3,10 \times 10^6$	$1,81 \times 10^6$	$3,73 \times 10^6$	$3,14 \times 10^6$	$5,89 \times 10^6$	$5,74 \times 10^6$	
Lac	Duck			Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006					
Site	515-1	515-2	515-3						
As	$5,53 \times 10^6$	$3,73 \times 10^6$	$3,26 \times 10^6$						

Les quantités d'oxyhydroxides de Fe et d'Al extraits avec l'oxalate d'ammonium dans les six échantillons sont également très variables et la corrélation entre ces oxyhydroxides et la surface spécifique n'apparaît pas très forte. Les quantités d'oxyhydroxides varient entre 0,22 % et 1,11 %. L'échantillon possédant la surface spécifique la plus élevée avec la méthode BET (301-3) présente la quantité d'oxyhydroxides la plus faible de tous les échantillons et une texture sableuse. Il est possible que la matière organique dans cet échantillon n'ait pas été entièrement oxydée lors du traitement au peroxyde d'hydrogène, introduisant un biais dans la mesure de la surface spécifique. Si cette valeur aberrante est omise de la base de données, nous observons une relation logarithmique relativement marginale ($R^2=0,574$ pour $n=5$ et $P=0,125$) entre la quantité d'oxyhydroxides et le delta BET déterminé par la différence entre les résultats BET avant et après l'extraction sur les résultats de surface spécifique non ajustés à la densité du sol. Les taux d'oxyhydroxides ont également servi à l'estimation des taux d'oxyhydroxides dans les fractions argileuses des échantillons lors des calculs pour la minéralogie finale (Tableau 3.11).

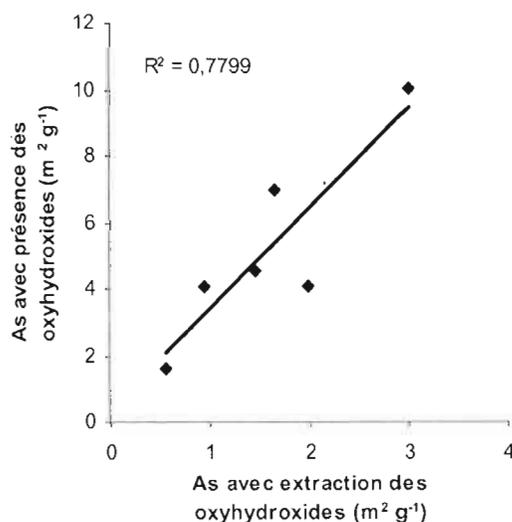


Figure 3.2 Régression linéaire entre les résultats de surface spécifiques (As) pour les six échantillons sélectionnés selon la méthode BET avec des échantillons avec présence d'oxyhydroxides et avec extraction des oxyhydroxides.

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les surfaces spécifiques obtenues après l'extraction des oxyhydroxides sont en moyenne 2 à 3 fois inférieures aux surfaces spécifiques mesurées avec la méthode BET avec présence d'oxyhydroxides (Tableau 3.3). Nous avons établi une régression linéaire entre les résultats BET avant et après extraction des oxyhydroxides (Figure 3.2). Cette régression s'est avérée forte avec un coefficient de détermination de 0,78 ($P=0,012$).

Tableau 3.3 Comparaison entre la surface spécifique (As) BET et la surface spécifique BET avec extraction des oxyhydroxides de six échantillons sélectionnés, résultats des taux d'oxyhydroxides de Fe et d'Al extraits ainsi que les résultats de surface spécifique BET avec extraction des oxydes en $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$

Lac	Site	Taux oxydes Fe et Al (%)	As BET avec extraction ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	As BET avant extraction ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	Delta As BET ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	As BET avec extraction ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$)
Najoua	114-3	0,52	0,548	1,638	1,09	$0,603 \times 10^6$
Éclair	201-1	0,61	1,454	4,550	3,10	$1,432 \times 10^6$
Boisvert	214-3	1,11	0,947	4,041	3,09	$0,924 \times 10^6$
Chômeur	301-3	0,22	2,997	10,05	7,05	$2,034 \times 10^6$
David	502-3	0,70	1,985	4,041	2,06	$1,831 \times 10^6$
Claire	514-3	1,08	1,640	6,964	5,32	$1,351 \times 10^6$

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les valeurs de surfaces spécifiques estimées avec l'algorithme de texture varient entre $0,44 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ et $1,92 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ (Tableau 3.4). Les surfaces spécifiques estimées avec l'algorithme varient beaucoup plus entre les sites que celles mesurées selon la méthode BET et de ce fait, il n'y a pas de relation significative entre les deux. Tel que prévu, des valeurs contradictoires peuvent être observées pour l'échantillon du pédon 301-3 (Chômeur): l'échantillon présentant la valeur la plus élevée avec la méthode BET (avec ou sans oxyhydroxides) est l'un de ceux présentant la plus faible surface spécifique estimée avec l'algorithme ($0,56 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$). Ce résultat confirme que la surface spécifique mesurée avec la méthode BET pour cet échantillon est une valeur aberrante qui reflète un biais introduit lors de la préparation de l'échantillon dû au fait qu'aucun échantillon n'a subi de prétraitement à l'oxalate. Toutefois, les surfaces spécifiques obtenues avec l'algorithme se rapprochent beaucoup de celles obtenues avec la méthode BET après correction pour les oxyhydroxides: un test de t par paire avec SPSS 12.0 n'a révélé aucune différence significative pour les six échantillons ($P=0.208$) et ce, même lorsque la valeur aberrante de l'échantillon 301-3 est omise ($P=0.417$). Les sites des SR1 et SR5 présentent respectivement les valeurs les plus faibles et les plus fortes, tel qu'observé avec la méthode BET. La moyenne pour l'ensemble de la région est de $1,15 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Le premier quartile est un peu plus élevé que celui avec la méthode BET sans oxyhydroxides avec un résultat de $0,94 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ et deux échantillons de la SR1 ne s'y trouvent pas. Le troisième quartile est quand à lui de $1,36 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$.

Tableau 3.4 Résultats de surface spécifique (As) selon l'algorithme textural
élaboré par Sverdrup (m²/m³)

Lac	MacLeod			Josselin			Najoua		
Site	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3
As	0,97×10 ⁶	0,72×10 ⁶	0,68×10 ⁶	0,60×10 ⁶	1,45×10 ⁶	0,93×10 ⁶	0,75×10 ⁶	0,97×10 ⁶	1,06×10 ⁶
Lac	Éclair			Lemaine			Truite-Rouge		
Site	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	
As	1,26×10 ⁶	1,16×10 ⁶	1,57×10 ⁶	1,11×10 ⁶	1,28×10 ⁶	0,81×10 ⁶	1,06×10 ⁶	0,84×10 ⁶	
Lac	Fauvette			Adanys			Boisvert		
Site	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3
As	1,35×10 ⁶	1,91×10 ⁶	1,17×10 ⁶	1,12×10 ⁶	0,82×10 ⁶	0,94×10 ⁶	1,04×10 ⁶	0,83×10 ⁶	1,39×10 ⁶
Lac	Chômeur			Thomas			Daniel		
Site	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	
As	1,19×10 ⁶	1,36×10 ⁶	0,56×10 ⁶	0,44×10 ⁶	0,91×10 ⁶	0,74×10 ⁶	1,13×10 ⁶	1,08×10 ⁶	
Lac	Pothier			Laurent			Des Jones		
Site	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3	411-1	411-2	411-3
As	1,38×10 ⁶	1,24×10 ⁶	1,27×10 ⁶	1,73×10 ⁶	0,98×10 ⁶	0,97×10 ⁶	1,28×10 ⁶	1,19×10 ⁶	1,38×10 ⁶
Lac	General-White			Grégoire			Des Papillons		
Site	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	
As	1,23×10 ⁶	1,50×10 ⁶	0,88×10 ⁶	1,37×10 ⁶	1,66×10 ⁶	0,92×10 ⁶	1,24×10 ⁶	1,10×10 ⁶	
Lac	Blais			David			Clair		
Site	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	
As	1,03×10 ⁶	1,51×10 ⁶	1,17×10 ⁶	1,12×10 ⁶	1,41×10 ⁶	1,20×10 ⁶	1,87×10 ⁶	0,79×10 ⁶	
Lac	Duck								
Site	515-1	515-2	515-3						
As	1,65×10 ⁶	1,36×10 ⁶	1,92×10 ⁶						

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

3.1.3 Chimie totale

Les résultats d'analyse chimique totale faite sur la fraction <2 mm démontrent une relative hétérogénéité dans les proportions d'éléments chimiques entre les bassins versants et les sous-régions (Tableau 3.5). Certes, des valeurs extrêmes ont été observées pour chaque élément chimique dans l'ensemble des horizons B.

Par ordre d'importance pondérale, c'est la silice (SiO₂) qui domine pour l'ensemble des échantillons avec des valeurs minimales de 59,3 % et maximales de 72,4 %. La forte proportion de SiO₂ va de soi avec l'origine géologique des dépôts de surface, car cette valeur n'inclut pas seulement la présence de quartz, mais également celle de tous les silicates, en

feuilletés ou non. Al_2O_3 suit le SiO_2 avec des concentrations pondérales moyennes de 15,5 %. Des valeurs extrêmes ont été observées dans les pédons 301-3 (22,3 %), 213-1 (19 %) et 302-1 (18,7 %). La majorité des taux de Fe_2O_3 se situe entre 5 et 8 %, la moyenne étant de 6,6 %. Des valeurs extrêmes au-dessus de 8 % ont été observées dans six horizons et sept valeurs se trouvent sous les 5 %. On observe ces dernières surtout dans la SR1, dans le bassin versant du lac Lemaine et dans les pédons 301-3, 302-1, 501-1 et 514-3. La variation des taux de Fe_2O_3 semble corollaire à la variation des taux de SiO_2 . Les valeurs extrêmes minimales de Fe_2O_3 coïncident avec les valeurs maximales de SiO_2 , par exemple les pédons 114-1 et 501-1, tandis que les proportions jumelées les plus élevées de Fe_2O_3 et d' Al_2O_3 correspondent aux proportions de SiO_2 les plus faibles.

Les éléments basiques de la chimie totale représentent en moyenne 10,2 % des éléments chimiques totaux retrouvés dans les échantillons. Les proportions de K_2O , de Na_2O , de CaO et de MgO ne sont pas divisées de façon égale. Le MgO est presque toujours le moins abondant, à l'exception des lacs de la SR5 ainsi que des lacs Grégoire, des Papillons et Truite-Rouge où la valeur la plus faible est le Na_2O . En moyenne, la présence du MgO est de 1,5 %. Les valeurs les plus faibles sont dans la SR1 et elles augmentent progressivement vers le sud-ouest, donc en direction de la SR5 qui possèdent les valeurs de MgO les plus élevées. Le Na_2O varie aussi d'est en ouest avec des valeurs plus fortes dans la SR1 (en moyenne de 3,2 %), et plus faibles dans la SR5 (en une moyenne de 1,3 %). La variabilité entre les bassins versants est moindre pour le CaO qui présente une moyenne de 3,09 %. Certes, il y a des valeurs plus fortes dans certains pédons 212-2 (4,7 %), 413-2 (5,2 %) et 514-2 (4,8 %). La proportion minimale observée est de 2,2 % et celle maximale, si on ne tient pas compte des pédons susmentionnés, est de 3,95 %. Enfin, les teneurs en K_2O sont en moyenne quelque peu inférieures à 3 %. Celles-ci varient peu entre les sous-régions, mais on peut observer des valeurs plus élevées dans les bassins versants situés au nord de la région à l'étude, comme ceux de la SR1 et de la SR3. La valeur médiane des proportions de P_2O_5 est inférieure à 0,27 % et la présence de MnO est très faible avec une moyenne de 0,09 %. Le TiO_2 est également présent dans une proportion moyenne inférieure à 1 %.

Tableau 3.5 Résultats de chimie totale

Lacs Oxydes/Sites	MacLeod			Josselin			Najoua			Eclair			Lemaine			Truite-Rouge		Fauvette			Adanys							
	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3					
SiO ₂	61,4	65,8	64,3	67,6	67,3	62,4	70,8	69,7	71,1	63,9	64,6	64,0	68,8	68,6	61,3	71,0	69,6	62,7	62,9	63,4	66,4	62,7	66,8					
TiO ₂	1,58	1,29	1,31	1,09	1,53	1,78	0,56	0,84	0,57	1,11	1,03	0,94	0,72	1,27	0,95	0,97	1,01	1,24	1,22	1,25	0,90	0,90	0,95					
Al ₂ O ₃	15,8	15,4	16,2	16,1	15,8	14,6	14,2	14,1	14,6	16,1	15,7	16,6	15,6	14,2	17,3	13,5	15,5	17,0	14,2	15,7	16,2	19,0	15,5					
Fe ₂ O ₃	9,02	6,43	6,85	4,52	3,98	10,90	3,85	5,50	4,16	7,43	6,84	6,68	4,38	4,39	9,38	5,98	5,77	6,88	7,18	7,81	6,49	7,02	6,42					
MnO	0,11	0,07	0,09	0,07	0,10	0,11	0,07	0,08	0,06	0,10	0,10	0,09	0,07	0,09	0,07	0,08	0,22	0,10	0,13	0,11	0,08	0,08	0,08					
MgO	1,34	0,80	0,92	0,86	0,96	0,90	0,82	0,90	0,65	1,56	1,54	1,44	0,77	1,14	1,10	1,65	1,40	1,85	2,67	1,85	1,16	1,35	1,14					
CaO	3,49	2,76	3,09	2,44	2,83	2,56	2,61	2,65	2,17	3,18	3,28	3,16	2,50	3,18	2,98	2,82	2,48	3,41	4,73	3,37	2,34	2,57	2,44					
Na ₂ O	3,22	3,06	3,14	3,19	3,33	3,00	3,34	3,14	3,15	3,51	3,71	3,77	3,33	3,53	3,22	1,18	1,12	3,57	3,51	3,50	3,20	3,29	3,24					
K ₂ O	3,43	3,90	3,58	3,70	3,55	3,31	3,53	2,90	3,36	2,81	2,90	3,01	3,51	3,37	2,83	2,53	2,51	2,90	2,74	2,76	2,95	2,75	3,10					
P ₂ O ₅	0,67	0,40	0,55	0,37	0,50	0,38	0,20	0,21	0,13	0,22	0,23	0,25	0,27	0,27	0,80	0,17	0,30	0,21	0,59	0,18	0,22	0,23	0,25					
Σ Métaux Traces	0,02	0,01	0,01	0,09	0,14	0,11	0,01	0,01	0,01	0,07	0,07	0,07	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,08	0,09	0,07	0,06	0,07	0,07					
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					
Lacs Oxydes/Sites	Boisvert			Chômeur			Thomas			Daniel		Pothier			Laurent			Des Jongs			General-White							
	214-1	214-2	214-3	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3					
SiO ₂	69,9	70,5	66,2	68,8	68,1	59,3	60,5	64,2	63,1	66,5	66,2	63,8	62,2	63,6	67,6	66,8	68,2	65,0	67,6	66,9	64,3	65,3	65,9					
TiO ₂	0,78	0,80	0,90	0,83	0,83	0,93	1,14	1,13	1,19	1,00	0,93	1,08	1,20	1,10	0,94	1,03	1,13	1,24	1,02	0,82	1,08	0,99	0,83					
Al ₂ O ₃	13,9	13,9	15,9	14,8	15,2	22,3	18,7	16,0	16,8	16,0	16,3	16,5	16,4	16,5	15,1	13,9	12,8	15,3	14,3	15,3	15,9	15,8	16,2					
Fe ₂ O ₃	5,05	5,32	6,52	5,02	5,19	8,42	9,31	7,55	7,73	5,76	5,87	6,92	7,69	7,06	6,14	7,46	7,11	7,63	6,30	6,06	7,50	7,16	6,55					
MnO	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,09	0,10	0,07	0,07	0,10	0,10	0,10	0,08	0,07	0,10	0,11	0,12	0,09	0,11	0,12	0,08					
MgO	1,62	1,38	1,38	0,98	0,99	0,96	1,34	1,38	1,39	1,14	1,03	1,46	1,83	1,49	1,24	1,30	1,68	1,33	1,19	1,24	2,09	1,88	1,91					
CaO	2,76	2,24	2,77	2,75	2,67	2,15	2,75	2,87	2,97	2,65	2,63	3,31	3,79	3,42	2,52	2,37	2,96	3,06	3,08	3,03	2,82	2,80	2,70					
Na ₂ O	2,83	2,64	3,12	3,44	3,38	2,79	3,08	3,27	3,28	3,33	3,43	3,58	3,61	3,62	3,07	2,63	2,75	3,30	3,28	3,42	2,59	2,81	2,82					
K ₂ O	2,92	2,93	2,88	3,11	3,30	2,74	2,79	3,17	3,01	3,19	3,32	2,84	2,70	2,73	3,05	4,16	3,04	2,73	2,72	2,83	3,15	2,83	2,76					
P ₂ O ₅	0,20	0,18	0,30	0,26	0,25	0,34	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,31	0,40	0,31	0,18	0,19	0,14	0,21	0,35	0,25	0,38	0,30	0,18					
Σ Métaux Traces	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,10	0,01	0,01	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,08	0,10	0,09	0,07	0,07	0,07	0,05					
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					
Lacs Oxydes/Sites	Grégoire		Des Papillons			Blais		David			Clair			Duck			Résultats exprimés en pourcentage de poids											
	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3	Métaux traces: Cr, O ₂ , Cu, Ni, Zn, Zr											
SiO ₂	66,5	63,6	67,6	68,4	65,4	72,4	70,3	66,3	66,8	70,6	68,4	64,3	63,0	67,7	68,4	68,4	(Zr non disponible pour 112, 114, 202, 214, 301 et 311)											
TiO ₂	0,96	0,98	0,86	0,99	1,13	0,67	0,89	0,87	0,88	0,81	0,84	0,93	0,99	0,86	0,75	0,80	Analyse effectuée à l'Université McGill, Dpt geology											
Al ₂ O ₃	15,8	16,2	15,1	14,6	15,9	13,7	13,5	15,4	14,7	13,3	15,0	16,0	16,6	14,5	15,2	14,5	Réalisé par Patrick Lamoureux											
Fe ₂ O ₃	7,01	7,08	6,56	6,30	7,78	4,40	5,59	7,29	7,15	5,89	5,77	6,50	9,23	6,27	5,35	5,72												
MnO	0,12	0,15	0,08	0,09	0,10	0,07	0,16	0,09	0,09	0,10	0,09	0,14	0,09	0,10	0,09	0,10												
MgO	1,91	2,58	1,93	1,66	2,20	1,49	1,71	2,09	2,32	2,60	1,78	2,48	1,73	2,16	2,54	2,30												
CaO	3,32	5,20	3,55	3,19	3,27	3,17	3,47	3,67	3,95	3,20	3,71	4,84	3,75	3,83	3,48	3,69												
Na ₂ O	1,34	1,46	1,43	1,33	1,31	1,28	1,28	1,41	1,35	1,13	1,52	1,28	1,43	1,21	1,27	1,30												
K ₂ O	2,64	2,41	2,66	3,06	2,62	2,62	2,68	2,57	2,49	2,18	2,65	3,05	2,77	2,67	2,66	2,76												
P ₂ O ₅	0,34	0,25	0,20	0,31	0,20	0,12	0,32	0,31	0,27	0,17	0,18	0,33	0,31	0,60	0,24	0,34												
Σ Métaux Traces	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,10	0,07	0,08	0,07	0,07												
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												

3.2 Minéralogie des horizons B

3.2.1 Minéralogie des argiles

L'identification qualitative des minéraux dans les argiles et les limons est basée sur l'interprétation des diffractogrammes de rayons X (DRX) (Figures 3.3 et tableau 3.6). La section granulométrique nous a indiqué de faibles teneurs en argiles dans l'ensemble de la région. Cette fraction granulométrique est constituée de minéraux primaires détritiques, de revêtements d'oxyhydroxides de Fe et d'Al et de minéraux secondaires. En général, les DRX révèlent une faible présence des minéraux secondaires, ce qui peut s'expliquer par l'origine granitique des sols qui entraîne une lente réduction de la grosseur des grains générée par l'altération physique et chimique de la roche.

Tous les diffractogrammes au rayon X présentent une raie de quartz très intense à 3,34 Å. La plupart ont présenté les raies des feldspaths potassiques et plagioclases (respectivement 3,25 et 3,17 Å) et certains DRX ont présenté la raie des amphiboles (8,5 Å), ce qui selon Griffin (1971) confirme la réussite des analyses. Environ 15 % des échantillons n'ont aucun pic dans leurs diffractogrammes (SR2, 114-3, 301-3, 314-2, 502-2), à l'exception de celui du quartz. Seulement une analyse n'a pas fonctionné dû au fait qu'une lame saturée en K a été brisée et que le duplicata n'a pu être conservé (302-1) (Tableau 3.6).

Le diffractogramme-type, le plus fréquemment observé, présente (Figures 3.3):

a) un pic à 14,3 Å (sur les lames saturées en Mg), qui demeure à 14 Å après traitement à l'éthylène glycol, mais qui se déplace entre 10 et 12 Å après saturation au K, et qui demeure à 10 Å lorsque chauffé à 300°C et 550°C. Il s'agit, selon Brindley et Brown (1980), de la vermiculite. En revanche, si le pic demeure à 14 Å après saturation au K et se déplace à 10 Å lorsque chauffé, il s'agit de la vermiculite-Al (Tableau 2.2). Celle-ci est un minéral secondaire du groupe des phyllites trioctaédriques (2/1) à écartement variable des feuillets dont l'espace entre les feuillets varie entre 10 Å et 14 Å selon la nature des cations fixés entre les feuillets, le plus souvent Mg ou Ca (Lozet et Mathieu 2002). La vermiculite est présente dans 80 % des diffractogrammes.

b) un pic à 7,2 Å (lames saturées en Mg et saturées en K), non affecté par le traitement à l'éthylène glycol, mais qui disparaît complètement après chauffage à 550°C. Selon Brindley et Brown (1980), il s'agit de la métahalloysite, un minéral argileux du groupe de la kaolinite qui présente un désordre dans l'emplacement des feuillets. Ce minéral secondaire est présent dans 55 % des échantillons et dans toutes les sous-régions, à l'exception des lacs Najoua, Éclair, Pothier et Des Joncs.

Certains minéraux argileux ont été observés sporadiquement dans l'ensemble des DRX. Il s'agit:

a) de la montmorillonite, identifiée par un pic dans la région 14,5 Å et 15,2 Å des diffractogrammes, qui se déplace entre 17,5 Å et 18 Å après saturation à l'éthylène glycol. Un chauffage à 550°C entraîne un autre déplacement du pic à 10 Å. La montmorillonite est une phyllite de type 2/1 dioctaédrique à équidistance variable entre les feuillets. On la retrouve dans seulement 12 % des échantillons, soit dans les SR1, SR4 et SR5.

b) de l'halloysite identifiée par un pic à 10 Å (lames saturées au Mg et saturées en K), qui gonfle à 10,8 Å après saturation à l'éthylène glycol et qui disparaît après chauffage à 550°C. L'halloysite est un minéral secondaire de type 1/1, constituée de feuillets identiques à ceux de la kaolinite, mais ceux-ci sont séparés par des molécules d'eau, ce qui lui donne une distance réticulaire supérieure à la kaolinite. On la retrouve dans 8 % des échantillons de façon très faible, soit dans les SR2, SR3 et SR5.

c) de la gibbsite, un hydroxyde d'aluminium, qui présente un pic à 4,85 Å. Elle est présente dans 8 % des analyses, soit dans les SR2, SR3 et SR5.

La présence de la kaolinite et de la chlorite n'a pas été observée dans les DRX des argiles et seul les échantillons 113-3 et 502-3 ont présenté une raie pour l'illite (Mica) (10 Å) (Figure 3.3.1). La SR5, conforme à ses taux d'argile élevés, possède une plus grande variété de minéraux secondaires, tandis que les SR1 et SR3, les plus au nord de la région à l'étude, présentent une faible diversité de minéraux argileux.

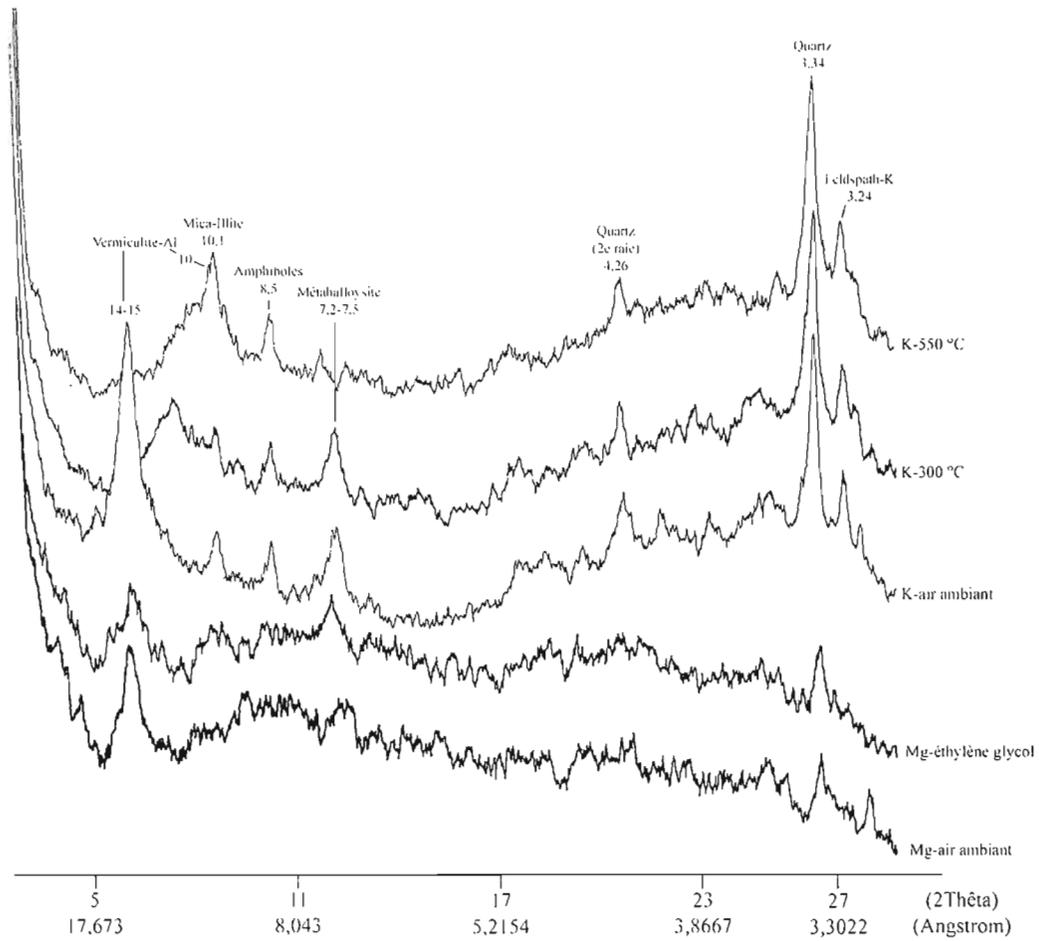


Figure 3.3.1 Diffractogramme au rayon X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 113-3.
 (Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom)
 Figure et analyse réalisée par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

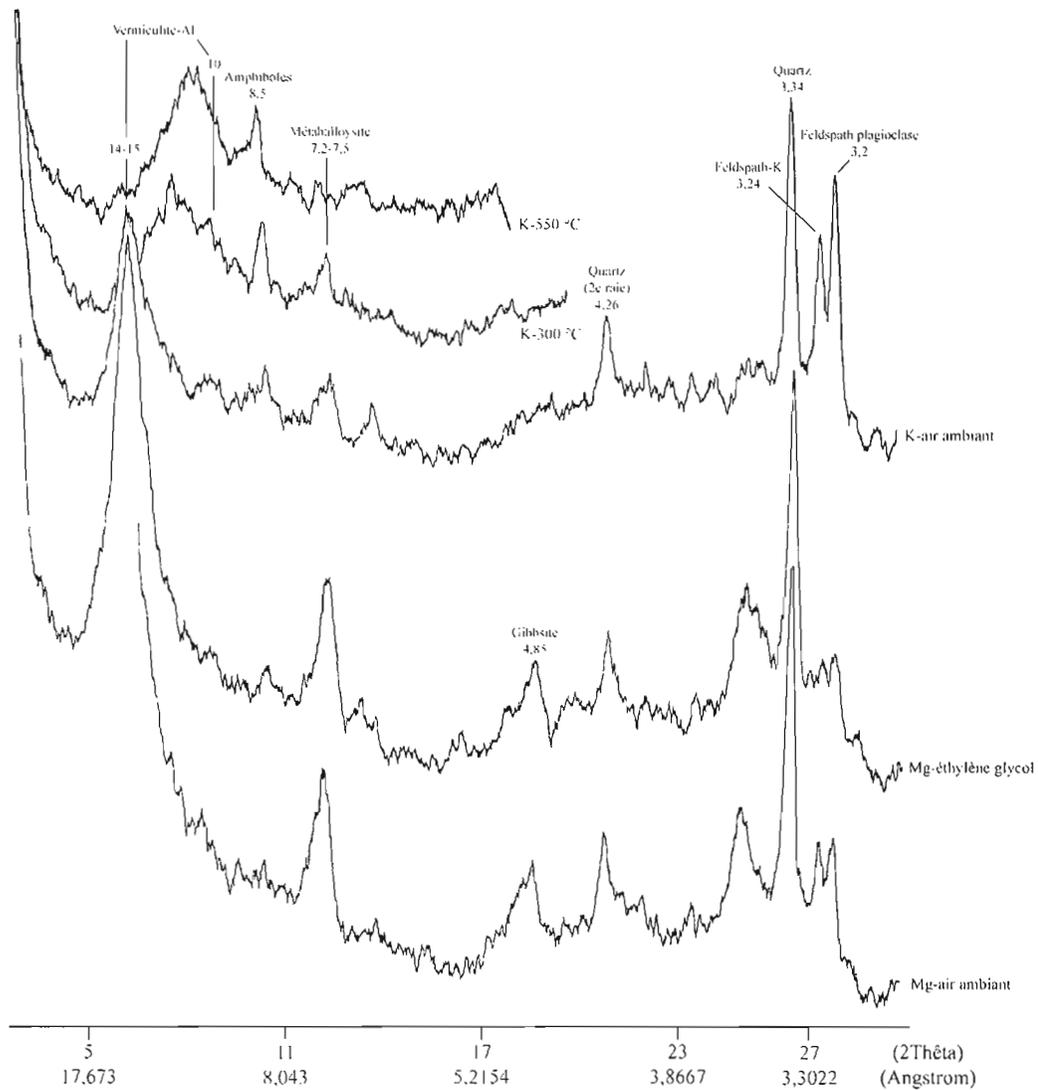


Figure 3.3.2 Diffractogramme au rayon X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 202-2.
 (Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom)
 Figure et analyse réalisée par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

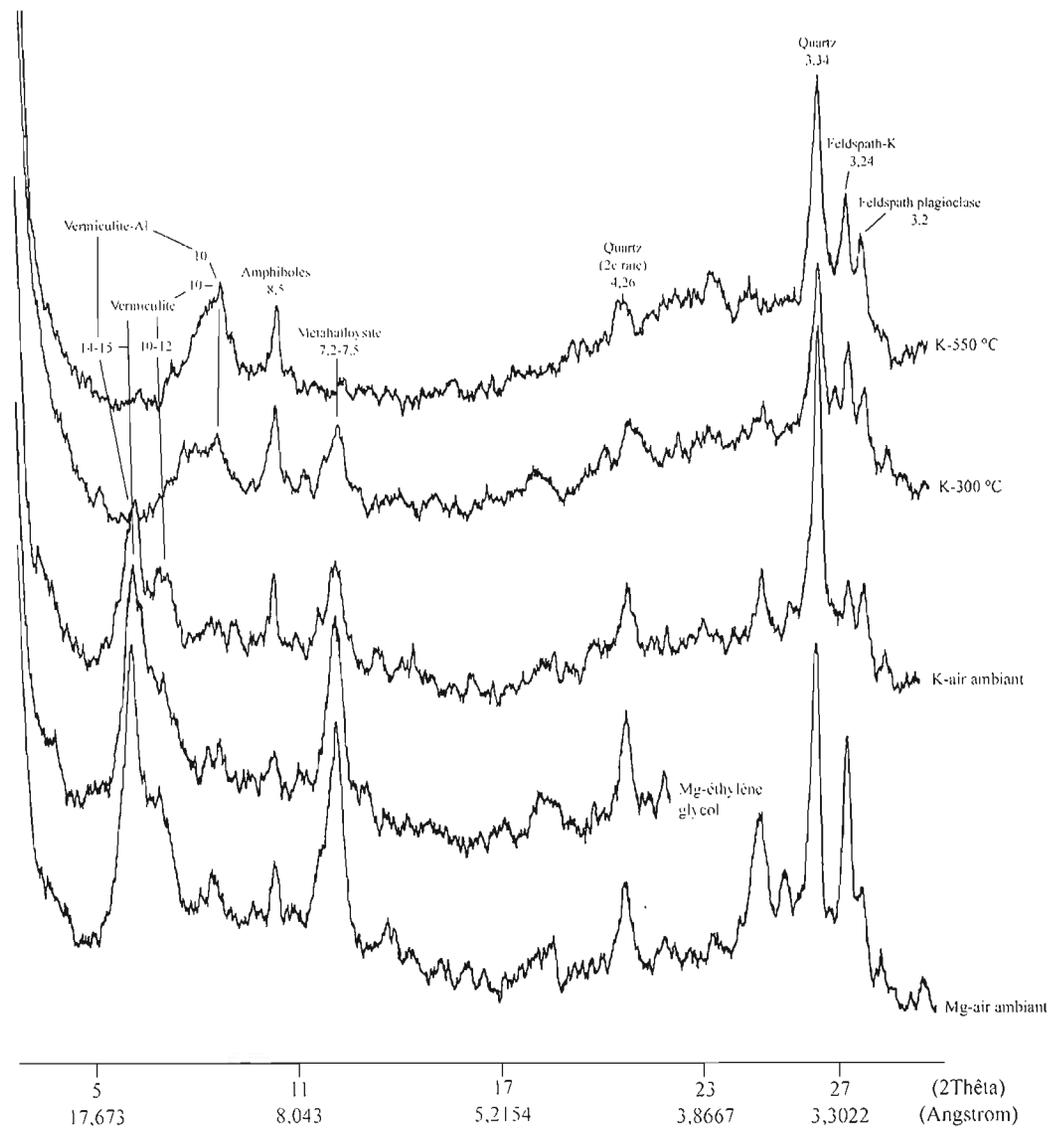


Figure 3.3.3 Diffractogramme au rayon X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 412-2.

(Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom)

Figure et analyse réalisée par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

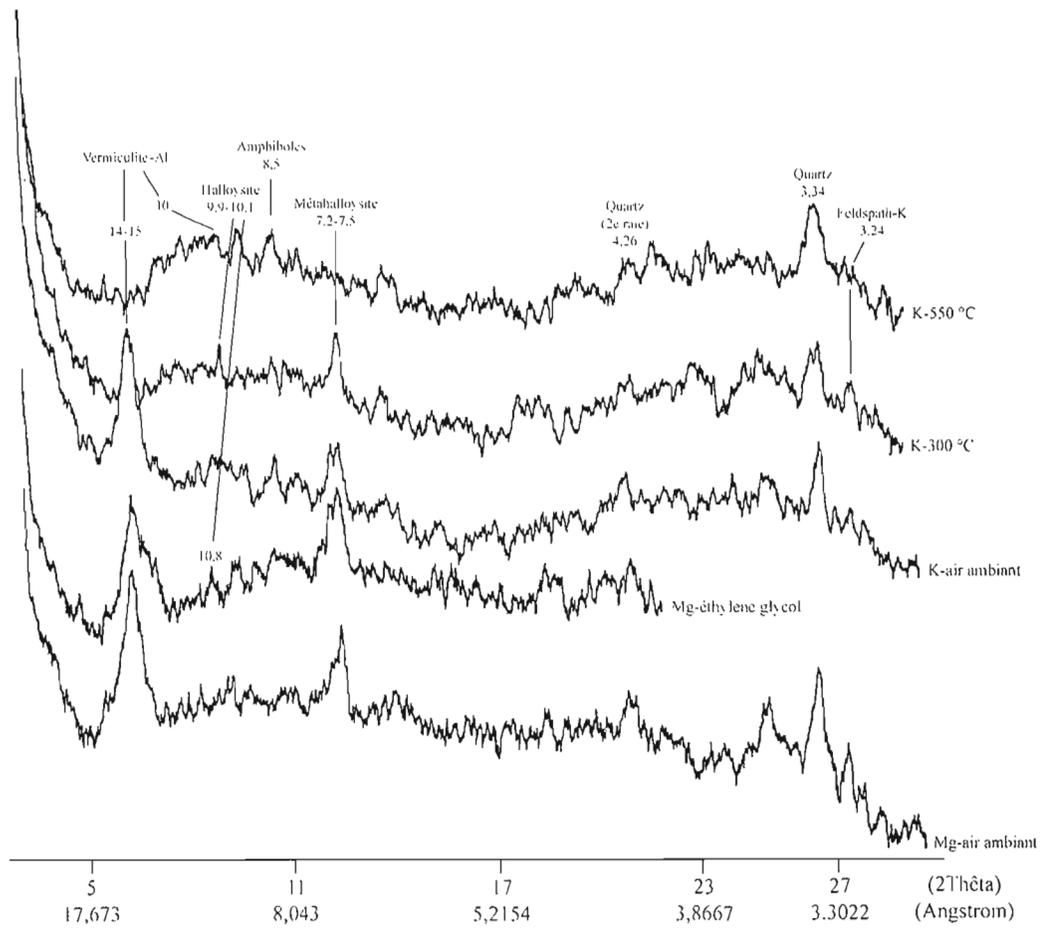


Figure 3.3.4 Diffractogramme au rayon X de la fraction argileuse de l'horizon B du pédon 501-3.

(Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom)

Figure et analyse réalisée par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

3.2.2 Minéralogie des limons

En ce qui concerne la minéralogie des limons, certains minéraux ont été observés dans l'ensemble des diffractogrammes de poudre (Figures 3.4 et tableau 3.7). Il s'agit: du quartz (3,34 Å), du zircon (3,3 Å), des feldspaths plagioclases en occurrence de l'albite (3,17 Å) et de l'anorthite (3,2 Å), des feldspaths potassiques (3,25 Å), de la pyroxène (3,02 Å), de l'anatase (3,51 Å), des amphiboles (8,35 Å) à l'exception des pédons 302-2 et 302-3 ainsi que de l'olivine (2,47 Å) à l'exception des pédons 302-2 et 314-2. D'autres minéraux primaires ne sont jamais apparus sur les DRX des limons. Ces minéraux qui se trouvent de façon générale en faible quantité dans la géologie de la région sont: l'épidote (2,68 Å), la goéthite (4,18 Å), l'hématite (2,69 Å), la magnétite (2,53 Å), la pyrite (1,633 Å) et le talc (9,35 Å).

Également, des minéraux ont été observés dans les DRX de façon discontinue dans l'ensemble des sous-régions. Les plus importants sont les grenats (2,57 Å) et l'ilménite (2,75 Å). L'apatite (2,81 Å) fait quelque apparition dans les DRX. Celle-ci devrait être présente dans l'ensemble de la région. Cependant, elle se trouve toujours en faible quantité dans la géologie de la région et l'intensité de sa raie de diffraction est très faible (Brindley et Brown 1980). La présence de certains minéraux est spécifique à la localisation des sous-régions. La chlorite (14-15 Å) est présente dans les SR3, SR4 et SR5. La calcite, la dolomite et les micas (biotite-muscovite) apparaissent seulement dans les DRX de poudre des SR4 et SR5. La halite a été observée une fois seulement dans le pédon 411-3.

Il est à noter que la diffractométrie aux rayons X selon la méthode des poudres non orientées n'est pas une méthode infallible. Certains minéraux présents dans un échantillon peuvent être cachés sous d'autres minéraux et ne pas apparaître sur les diffractogrammes. De même, si un minéral est présent en faible quantité ou possède une faible capacité de réfraction, sa raie peut être à ce point atténuée qu'elle se perd dans une raie voisine plus intense ou bien elle peut être indiscernable du «bruit de fond» des DRX (cas de l'apatite) (Griffin 1971).

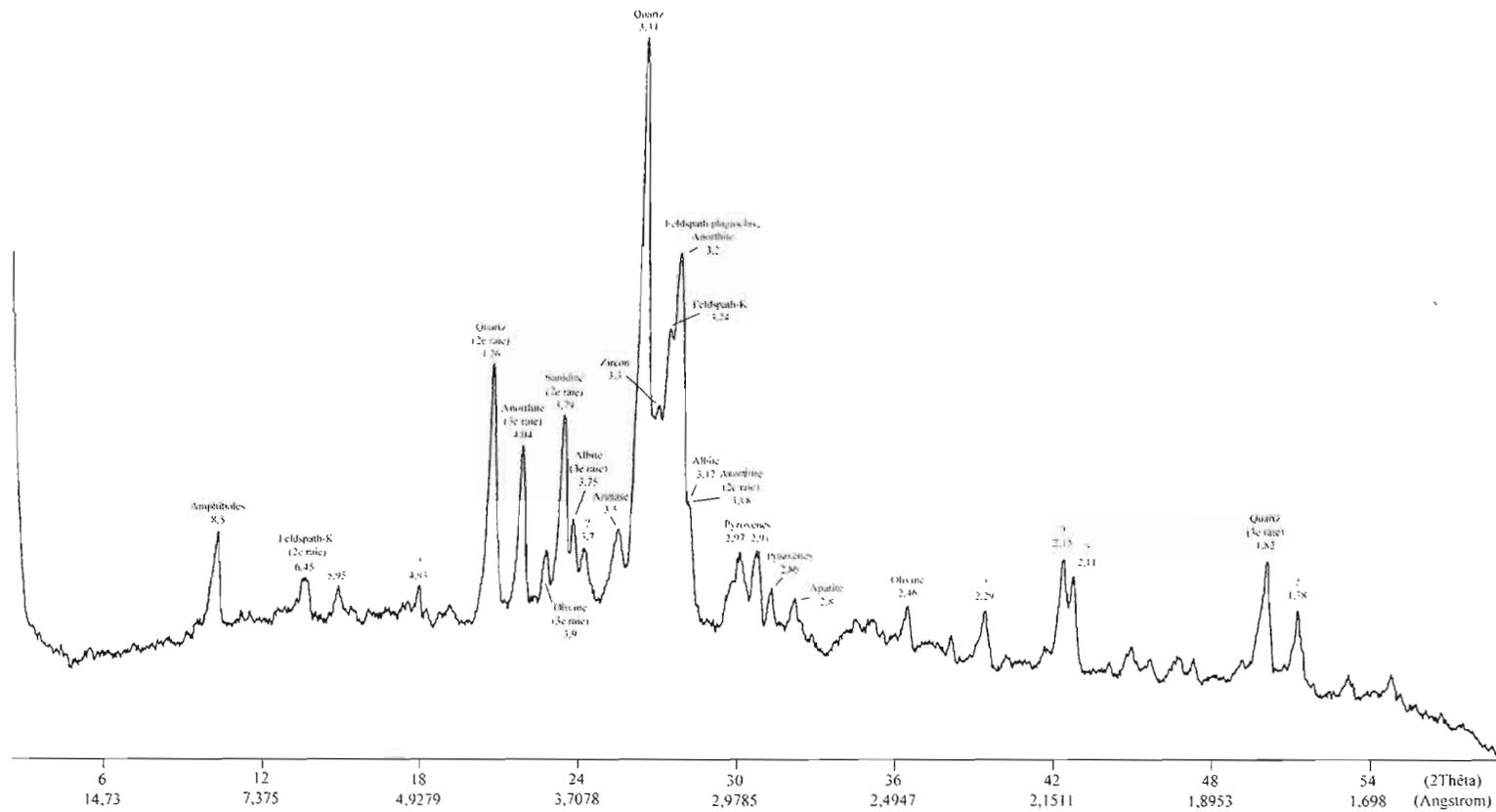


Figure 3.4.1 Diffractogramme au rayon X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 113-1. (Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom. Les points d'interrogation représentent des minéraux qui n'ont pu être identifiés.)
Figure et analyse r alis e par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

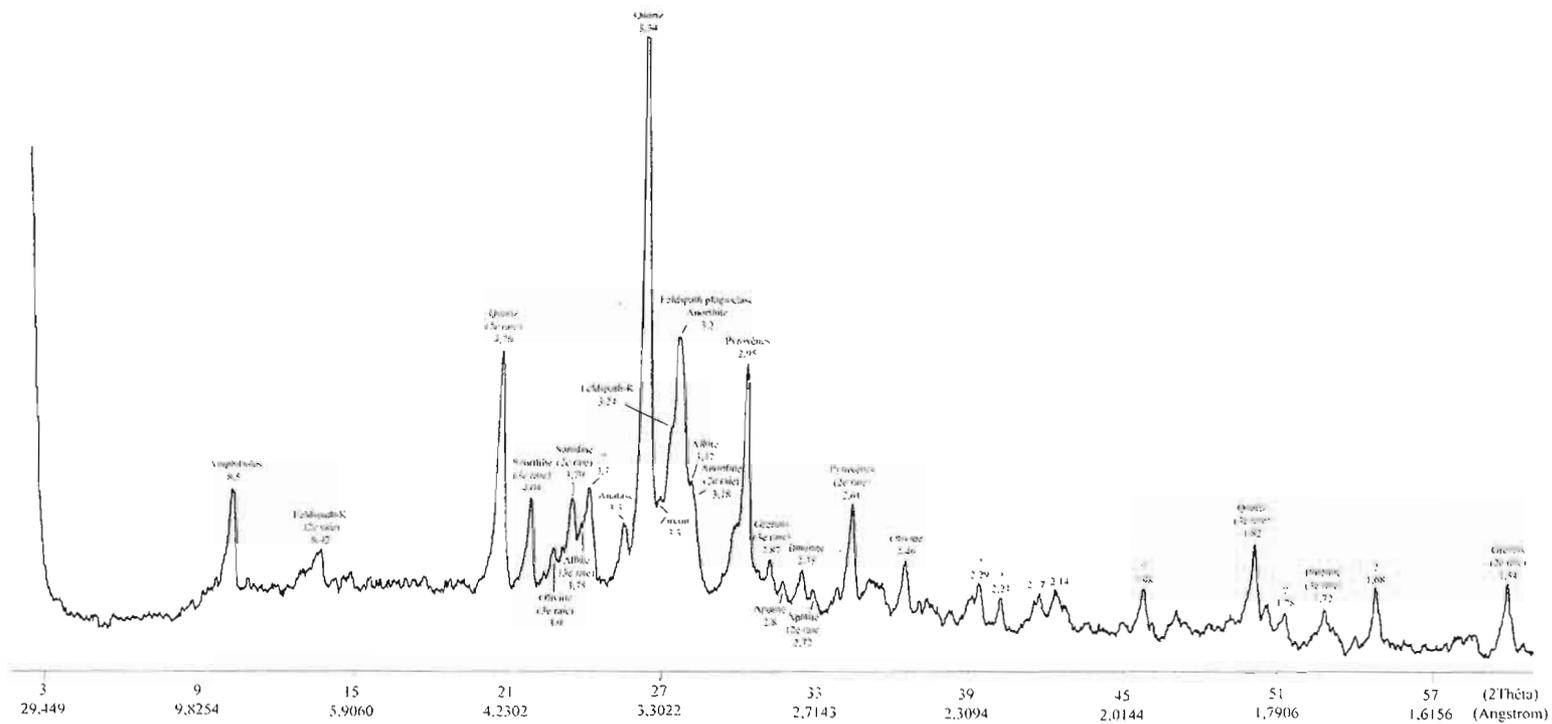


Figure 3.4.2 Diffractogramme au rayon X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 202-2. (Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom. Les points d'interrogation représentent des minéraux qui n'ont pu être identifiés.)
 Figure et analyse r alis e par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

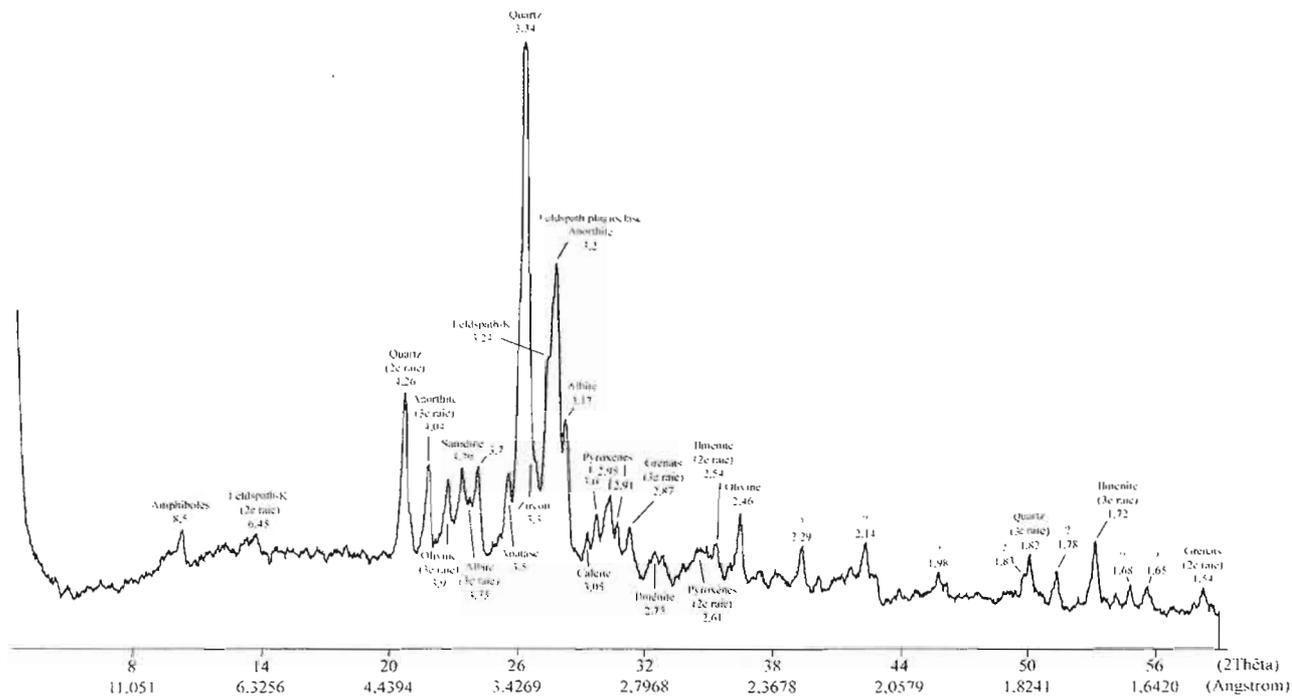


Figure 3.4.3 Diffractogramme au rayon X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pèdon 411-2. (Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom. Les points d'interrogation représentent des minéraux qui n'ont pu être identifiés.)
 Figure et analyse réalisée par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

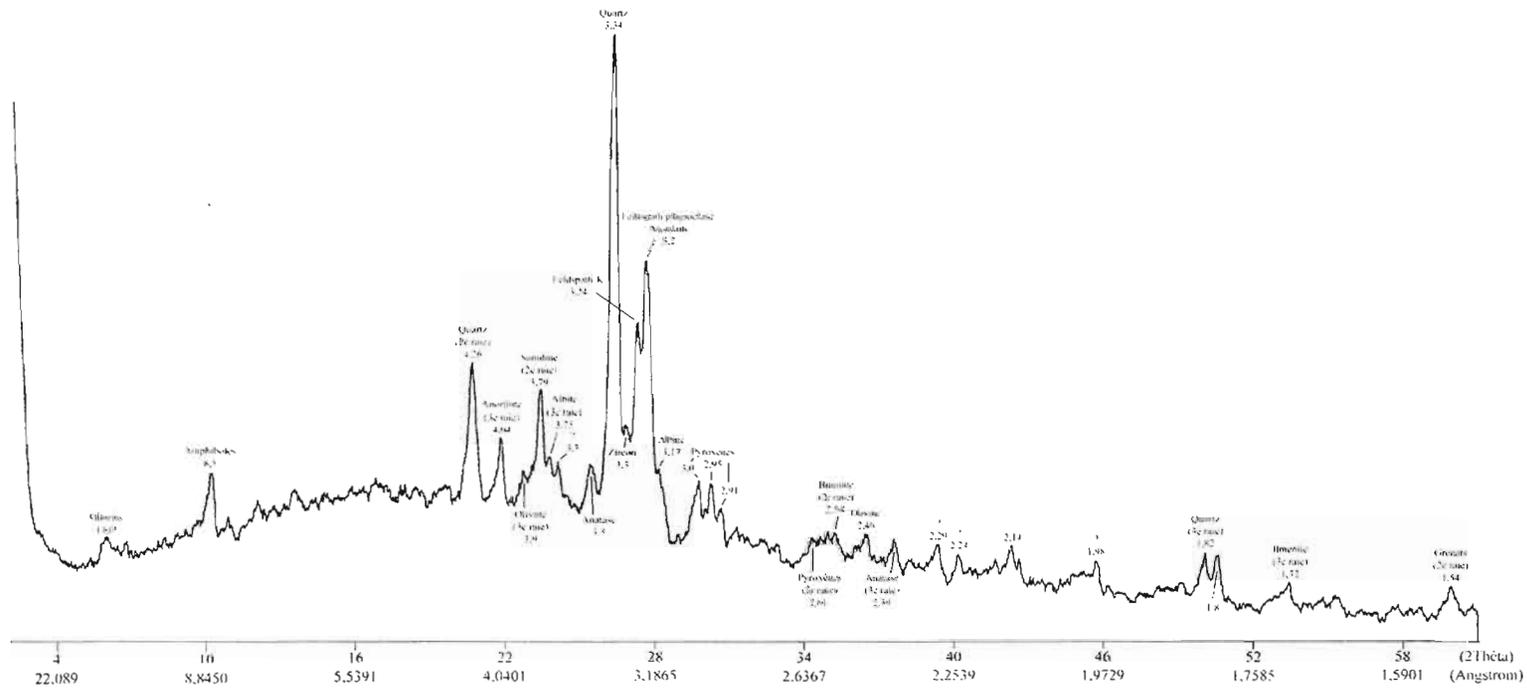


Figure 3.4.4 Diffractogramme au rayon X de la fraction limoneuse de l'horizon B du pédon 514-2. (Les chiffres sous les minéraux sont en Angstrom. Les points d'interrogation représentent des minéraux qui n'ont pu être identifiés.)
 Figure et analyse réalisée par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Tableau 3.6 Résultats de diffractométrie aux rayons X des argiles

Lacs	MacLeod			Josselin			Najoua			Eclair			Lemaine			Truite-Rouge		Fauvette			
	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	212-1	212-2	212-3	
Chlorite																					
Gibbsite														x					x	x	
Halloysite																					
Illite						x															
Kaolinite																					
Métahalloysite	x	x	x	x	x	x								x		x	x	x	x		
Montmorillonite		x	x																		
Vermiculite		x	x	x	x	x	x	x					x	x		x	x	x	x		

Tableau 3.7 Résultats de diffractométrie aux rayons X des limons

Lacs	MacLeod			Josselin			Najoua			Eclair			Lemaine			Truite-Rouge		Fauvette			
	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	212-1	212-2	212-3	
Albite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Amphiboles	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anatase	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anorthite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Apatite						x															
Biotite/Muscovite																					
Calcite																					
Chlorite																					
Dolomite																					
Épidote																					
Feld Plagio	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Feld-K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Goethite																					
Grenats		x	x		x			x		x	x	x	x	x	x						
Halite																					
Hématite																					
Ilménite										x				x						x	
Magnétite																					
Olivines	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pyrite																					
Pyroxènes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Quartz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Talc																					
Zircon	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x= présence de minéraux, nd= résultat non-disponible

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Tableau 3.6 Résultats de diffractométrie au rayon X des argiles (suite)

Lacs	Adanys			Boisvert			Chômeur			Thomas			Daniel		Pothier			Laurent		
	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3
Chlorite										nd										
Gibbsite										nd										
Halloysite	x									nd									x	
Illite										nd										
Kaolinite										nd										
Métahalloysite	x	x	x		x				x	nd	x		x						x	
Montmorillonite										nd										
Vermiculite	x	x	x	x	x		x	x		nd	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tableau 3.7 Résultats de diffractométrie au rayon X des limons (suite)

Lacs	Adanys			Boisvert			Chômeur			Thomas			Daniel		Pothier			Laurent		
	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3
Albite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Amphiboles	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anatase	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anorthite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Apatite							x				x									
Biotite/Muscovite																				
Calcite																				
Chlorite										x						x			x	
Dolomite																				
Épidote																				
Feld Plagio	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Feld-K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Goethite																				
Grenats			x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Halite																				
Hématite																				
Ilménite				x					x	x	x	x				x	x			
Magnétite																				
Olivines	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
Pyrite																				
Pyroxènes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Quartz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Talc																				
Zircon	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x= présence de minéraux, nd= résultat non-disponible

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Tableau 3.6 Résultats de diffractométrie aux rayons X des argiles (suite)

Lacs	Des Jones			General-White			Grégoire		Des Papillons			Blais		David			Clair			Duck			
Min./Sites	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3	
Chlorite																							
Gibbsite																			x				
Halloysite													x		x								x
Illite																							
Kaolinite																							
Métahalloysite				x	x		x	x		x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x
Montmorillonite		x																	x	x	x	x	x
Vermiculite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tableau 3.7 Résultats de diffractométrie aux rayons X des limons (suite)

Lacs	Des Jones			General-White			Grégoire		Des Papillons			Blais		David			Clair			Duck			
Min./Sites	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3	
Albite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Amphiboles	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anatase	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anorthite	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Apatite			x																				
Biotite/Muscovite								x					x			x				x			
Calcite		x			x								x										
Chlorite				x		x	x	x												x			
Dolomite	x																			x			
Épidote																							
Feld Plagio	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Feld-K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Goethite																							
Grenats	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x			x
Halite			x																				
Hématite																							
Ilménite	x	x	x					x												x		x	x
Magnétite																							
Olivines	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pyrite																							
Pyroxènes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Quartz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Talc																							
Zircon	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x= présence de minéraux, nd= résultat non-disponible

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

3.2.3 Minéralogie des sables

Les principaux minéraux présents dans la fraction sableuse observée au binoculaire sont le quartz et les feldspaths plagioclases et potassiques, et ce, dans tous les échantillons (Tableau 3.8). Ces trois minéraux constituent plus de 80 % des minéraux comptés. Les taux de quartz varient entre 25 et 57 %. Cependant, à l'intérieur de chaque sous-région les valeurs sont sensiblement homogènes avec au moins un pédon pour chaque sous-région qui possède une valeur extrême. Par exemple, les proportions de quartz dans les pédons de la SR3 sont de 25 % pour les bassins versants Chômeur, Thomas et Daniel, de 28,2 % pour le lac Laurent et de 50 % pour le lac Pothier. La forte proportion des feldspaths et du quartz va de pair avec la minéralogie de la roche-mère granito-gneissique de la province géologique de Grenville. En général, les proportions des feldspaths potassiques sont plus importantes que celles des feldspaths plagioclases.

Les minéraux ferromagnésiens (par exemple les amphiboles, les pyroxènes, l'épidote, la chlorite), la biotite, la muscovite et les grenats sont les autres minéraux présents, mais ils n'ont pas été observés dans tous les pédons. Les plus fréquents sont les minéraux ferromagnésiens, qui sont absents de quatre pédons seulement (114, 203, 314, 501). La moitié des pédons comptent la présence de biotite ou de muscovite et les grenats ne sont présents que dans sept pédons. Les valeurs pour ces minéraux varient entre 1 et 15 %. La présence d'un taux de 28,6 % pour la biotite du pédon 413-2 est une exception majeure lorsqu'on compare les résultats.

Enfin, aucune amphibole n'a été comptabilisée. Cela ne signifie pas qu'elle n'est pas présente dans les échantillons. Il se peut que les amphiboles aient été classées comme minéraux ferromagnésiens ou même dans la biotite étant donné la grosseur des particules sélectionnées.

Tableau 3.8 Résultats de minéralogie optique des sables (250-500µm) (%)

Lacs	MacLeod	Josselin	Najoua	Éclair	Lemaine	Truite-Rouge	Fauvette	Adanys	Boisvert	Chômeur	Thomas
Min./Sites	112-2	113-3	114-1	201-2	202-1	203-3	212-3	213-2	214-2	301-3	302-1
Biotite	0,0	2,0	0,0	0,0	5,8	1,9	1,5	2,1	1,9	0,0	0,0
Fe/Mg	2,1	3,9	0,0	4,3	3,8	0,0	4,6	4,3	1,9	8,5	10,0
Feld-K	34,0	33,3	39,6	32,6	26,9	22,2	36,9	31,9	34,6	29,8	30,0
Feld-Palgio	25,5	21,6	17,0	26,1	30,8	29,6	29,2	25,5	30,8	29,8	35,0
Grenats	2,1	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	1,5	0,0	1,9	0,0	0,0
Muscovite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	1,5	2,1	0,0	6,4	0,0
Quartz	36,2	39,2	43,4	37,0	30,8	38,9	24,6	34,0	28,8	25,5	25,0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Lacs	Daniel	Pothier	Laurent	Des Joncs	General-White	Grégoire	Des Papillons	Blais	David	Clair	Duck
Min./Sites	311-2	313-1	314-2	411-3	412-1	413-2	414-1	501-1	502-2	514-1	515-2
Biotite	2,3	0,0	0,0	0,0	2,1	28,6	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Fe/Mg	4,5	6,5	0,0	8,3	6,4	8,2	7,5	0,0	10,9	3,9	4,4
Feld-K	36,4	28,3	53,8	31,3	23,4	14,3	28,3	28,6	26,1	33,3	24,4
Feld-Palgio	27,3	15,2	7,7	10,4	25,5	16,3	13,2	14,3	21,7	17,6	13,3
Grenats	0,0	0,0	10,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9
Muscovite	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Quartz	25,0	50,0	28,2	47,9	42,6	32,7	47,2	57,1	41,3	45,1	48,9
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Analyse effectuée par Benoit Vignault, Dpt géographie. Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

3.2.4 Minéralogie UPPSALA développé à partir de la norme CIPW

La minéralogie selon le modèle stœchiométrique UPPSALA développé à partir de la norme CIPW a été faite à partir des données obtenues de la chimie totale. Les calculs exposés dans la section méthodologie ont été faits à partir du logiciel Excel. Les résultats pour tous les sites sont présentés dans le tableau 3.9. La SR1 présente des résultats minéralogiques assez homogènes. La moyenne calculée pour chaque minéral ne varie pas beaucoup. On peut observer une forte proportion de feldspath potassique, d'albite et de quartz avec des moyennes respectives de 19,6 %, 23,1 % et 28,8 %. Ensuite, l'anorthite est présente dans une moyenne de 9,7 %, suivie de près par les amphiboles avec 9,4 % et la muscovite avec 6,9 %. L'apatite et l'épidote sont présentes en moindre proportion, respectivement 0,9 % et 1,6 %. À noter une absence quasi complète de calcite et de chlorite.

De même, à l'exception du bassin versant Truite-Rouge et du pédon 212-2, on note une absence de calcite et de chlorite dans les SR2 et SR3. Ces deux sous-régions ont des résultats modélisés de minéralogie similaires, avec des proportions de feldspath potassique respectivement de 16,3 % (SR2) et 16,9 % (SR3), une fois la valeur extrême de 24,2 % du pédon 314-2 retirée. Pour ce qui est des proportions d'albite, d'anorthite et de quartz, les moyennes sont dans l'ordre de 24,3 %, 11 % et 27,9 %, tandis que les pondérations moyennes pour les amphiboles et la muscovite sont 11,5 % et 6 %. Il faut remarquer que les amphiboles varient quelque peu entre les bassins versants, tout comme les taux d'apatite et d'épidote dont les moyennes sont respectivement de 0,67 % et de 1,8 %. Le pédon 212-2 est le seul de ces deux sous-régions à enregistrer un taux de chlorite de 0,7 %. Enfin, pour ces deux sous-régions, la minéralogie calculée du lac Truite-Rouge est tout à fait différente de l'ensemble des autres lacs avec des proportions moyennes très faibles d'albite (4,8 %) et d'anorthite (5,8 %), et très fortes de quartz (50,4 %) comparé aux autres lacs. Le lac Truite-Rouge est également le seul à présenter des taux de calcite d'environ 1 % en moyenne.

Les résultats d'UPPSALA pour la SR4 présentent une certaine dualité entre les lacs. Les proportions moyennes pour les feldspaths potassiques (16 %), l'apatite (0,6 %), la muscovite

(5,7 %) et l'épidote (1,9 %) sont plutôt homogènes et varient très peu entre les pédons, à l'exception du taux d'épidote pour le pédon 413-2 (3,1 %). En ce qui concerne les proportions moyennes d'albite, d'anorthite, d'amphiboles, de chlorite, de calcite et de quartz, la SR4 paraît être scindée en deux groupes. Le premier groupe constitué des lacs des Joncs et General-White présente des valeurs pour l'albite et l'anorthite supérieures au lac du deuxième groupe, soit les lacs Grégoire et des Papillons. En moyenne les proportions d'albite pour le premier groupe sont de 21,7 % et pour le deuxième groupe de 5,3 %. L'écart est moins important pour l'anorthite, mais tout de même marqué, avec une moyenne pour le premier groupe de 10,9 % et pour le deuxième groupe de 7,5 %. Dans les proportions moyennes d'amphiboles, c'est plutôt le deuxième groupe (19,2 %) qui est supérieur au premier (11,9 %), même en excluant de la moyenne la valeur extrême du pédon 413-2 (30,2 %). Les valeurs de quartz du deuxième groupe (41,5 %) sont également plus importantes que le premier groupe (30,7 %). Enfin, seuls les pédons du lac General-White présentent des taux de chlorite avec une moyenne de 1,3 % et seulement les pédons du deuxième groupe présente des taux de calcite. Le pédon 413-2 du lac Grégoire affiche un taux de calcite de 4,6 %, le plus élevé de toute la région à l'étude, et l'autre pédon présente un taux de calcite de 1,6 %.

La SR5 présente une minéralogie modélisée beaucoup moins variable. Les proportions moyennes de quartz sont les plus fortes de la région à l'étude (40,8 %), à l'exception du lac Truite-Rouge, et les proportions moyennes d'albite (4,8 %) et d'anorthite (7,1 %) sont les plus faibles de l'aire d'étude, similaire au deuxième groupe de la SR4. Les feldspaths potassiques sont en général homogènes avec une moyenne de 15,6 %, tout comme les taux de muscovite (5,5 %) et d'épidote (2,2 %). La proportion moyenne d'amphiboles, à l'exclusion du pédon 514-2 (27,9 %), est de 20,4 % et celle de l'apatite est de 0,7 %. La minéralogie d'UPPSALA dans la SR5 présente des taux de calcite dans l'ensemble des pédons, sauf pour le pédon 515-1. La proportion moyenne est de 2,3 %. La chlorite a également été observée dans les pédons 502-3 (1,4 %) et 515-2 (0,33 %).

Tableau 3.9 Résultats de minéralogie selon le modèle UPPSALA-CIPW (%)

Lacs	MacLeod			Josselin			Najoua			Éclair			Lemaine			Truite-Rouge		Fauvette			Adanys		
Min./Sites	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3
Feld-K	19,9	22,3	20,5	20,9	19,7	19,9	18,8	15,8	18,4	15,5	15,6	16,4	19,3	17,8	16,9	15,1	15,9	16,0	14,3	15,2	16,8	16,0	17,5
Albite	23,2	21,5	22,5	23,8	24,4	23,4	23,4	22,5	23,2	25,8	27,0	28,2	24,5	24,8	27,1	4,6	4,9	25,5	24,3	24,9	25,3	26,6	25,1
Anorthite	11,4	9,4	10,2	8,8	9,7	9,7	9,7	10,1	8,7	12,6	12,8	12,6	9,4	10,7	10,0	6,0	5,5	13,3	12,3	13,2	9,6	10,9	9,7
Apatite	1,6	0,9	1,3	0,9	1,2	1,0	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	2,0	0,4	0,8	0,5	1,4	0,4	0,5	0,6	0,6
Amphiboles	12,5	9,8	10,6	7,4	8,6	9,1	9,2	10,1	7,4	13,1	13,1	12,0	8,2	12,0	7,8	16,5	13,7	14,7	19,9	14,8	8,0	9,7	8,3
Muscovite	7,0	7,9	7,2	7,4	7,0	7,0	6,7	5,6	6,5	5,5	5,5	5,8	6,8	6,3	6,0	5,3	5,6	5,7	5,1	5,4	5,9	5,7	6,2
Chlorite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Epidotes	2,0	1,6	1,7	1,4	1,6	1,6	1,6	1,7	1,4	2,1	2,2	2,1	1,5	2,0	1,5	1,6	1,3	2,3	2,8	2,3	1,5	1,8	1,5
Calcite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Quartz	22,4	26,7	25,9	29,6	27,9	28,3	30,1	33,7	34,2	24,9	23,2	22,4	29,7	25,9	28,7	48,6	52,1	22,0	19,1	23,8	32,3	28,8	31,1
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Lacs	Boisvert			Chômeur			Thomas			Daniel		Pothier			Laurent			Des Jons			General-White		
Min./Sites	214-1	214-2	214-3	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3
Feld-K	16,1	16,7	16,3	16,8	18,1	17,6	16,8	18,0	17,2	17,8	18,5	15,6	14,7	14,9	17,1	24,2	17,0	15,2	14,7	15,3	18,6	16,3	15,8
Albite	19,1	18,9	23,2	25,2	24,8	24,7	24,4	24,2	24,4	25,0	26,0	26,2	25,8	26,5	22,6	17,3	17,8	23,9	23,6	24,8	17,8	20,1	20,1
Anorthite	10,0	8,5	10,5	10,5	10,2	9,1	11,3	11,1	11,6	10,3	10,3	12,7	13,9	13,1	9,9	8,3	10,4	12,0	11,3	11,6	9,6	10,3	10,4
Apatite	0,5	0,4	0,7	0,6	0,6	0,9	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7	1,0	0,7	0,4	0,5	0,3	0,5	0,8	0,6	0,9	0,7	0,4
Amphiboles	11,6	8,8	10,5	9,6	9,4	7,3	11,5	11,3	12,0	9,4	8,9	13,0	15,6	13,6	9,8	9,9	13,8	12,9	11,6	11,8	11,7	11,6	11,8
Muscovite	5,7	5,9	5,8	5,9	6,4	6,2	6,0	6,4	6,1	6,3	6,6	5,5	5,2	5,3	6,1	8,6	6,0	5,4	5,2	5,4	6,6	5,8	5,6
Chlorite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	1,1	1,2
Epidotes	1,7	1,4	1,7	1,7	1,7	1,4	1,9	1,9	2,0	1,7	1,7	2,2	2,4	2,2	1,6	1,4	1,9	2,0	1,9	2,0	1,7	1,7	1,8
Calcite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Quartz	35,2	39,4	31,3	29,7	29,0	32,8	27,5	26,5	26,0	28,9	27,4	24,1	21,5	23,7	32,4	29,8	32,8	28,1	30,9	28,6	31,4	32,3	33,0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Lacs	Grégoire		Des Papillons			Blais		David			Clair			Duck									
Min./Sites	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3							
Feld-K	16,2	13,4	15,6	18,4	16,1	14,9	15,7	15,4	14,6	12,8	15,2	17,4	17,0	16,2	15,7	16,3							
Albite	5,7	4,5	5,6	5,3	5,3	4,7	4,7	5,7	4,9	4,1	6,0	3,4	5,8	4,4	4,6	4,7							
Anorthite	7,2	8,9	7,7	6,5	7,2	6,5	6,7	7,8	7,7	6,3	8,1	7,1	8,0	6,6	6,8	6,9							
Apatite	0,8	0,6	0,5	0,7	0,5	0,3	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	0,7	0,8	1,5	0,6	0,8							
Amphiboles	18,8	30,2	20,6	17,7	19,7	18,3	19,2	21,0	22,9	18,8	21,3	27,9	22,1	20,2	20,1	20,6							
Muscovite	5,7	4,7	5,5	6,5	5,7	5,3	5,5	5,5	5,2	4,5	5,4	6,2	6,0	5,7	5,6	5,8							
Chlorite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0							
Epidotes	1,9	3,1	2,1	1,8	2,0	1,9	1,9	2,2	2,4	1,9	2,2	2,8	2,3	2,0	2,0	2,1							
Calcite	0,9	4,6	2,3	1,0	2,2	2,5	1,4	1,7	2,6	2,5	2,5	3,9	1,9	0,0	2,2	1,7							
Quartz	42,7	29,9	40,0	42,0	41,4	45,6	44,1	40,1	39,2	47,3	39,0	30,6	36,1	43,3	42,2	41,3							
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100							

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

3.2.5 Minéralogie finale

Le tableau 3.10 illustre à l'aide d'un exemple sur l'échantillon 502-3 comment nous avons procédé pour établir la minéralogie finale:

a) avant tout, nous avons superposé tous les résultats d'analyse minéralogique dans le haut du tableau en débutant avec les résultats quantitatifs (UPPSALA et minéralogie des sables), suivi par les résultats qualitatifs (DRX), afin de répondre aux exigences de la section *mineral stack* de PROFILE (Tableau 2.5).

b) une fois la présence minéralogique établie, la première étape consiste à insérer les proportions pour chaque minéral selon les résultats d'UPPSALA et d'observer si la proportion générée pour l'épidote ne doit pas être partagée avec celle des pyroxènes. Dans l'exemple qui nous concerne, l'épidote est absente du diffractogramme de limon de l'échantillon 502-3, mais les pyroxènes sont présents avec une raie assez marquée et large. Les proportions d'épidote ont donc été transférées aux pyroxènes.

c) la deuxième étape sert à diviser la muscovite d'UPPSALA entre muscovite et biotite. Cette division est généralement faite selon les résultats de minéralogie des sables. Dans l'exemple présenté, la muscovite et la biotite n'ont pas été observées dans la minéralogie des sables. Cependant, elles ont été observées dans les diffractogrammes des limons. Lorsque ces minéraux sont observés dans les sables, nous partageons la proportion de muscovite d'UPPSALA entre la muscovite et la biotite selon les proportions respectives de ces minéraux dans la minéralogie des sables. Si, comme dans l'exemple présenté, ils ne sont pas présents dans les sables, mais qu'ils sont présents dans les DRX, nous adaptons les pondérations en fonction de la présence de la vermiculite dans l'échantillon, car la muscovite est beaucoup plus résistante à l'altération que la biotite. De fait, la vermiculite est beaucoup plus un héritage de la dégradation de la biotite que de la muscovite. Ainsi, dans l'exemple qui nous concerne, nous avons divisé la muscovite d'UPPSALA dans un rapport 2/3 où 40 % du résultat d'UPPSALA a été inséré dans la muscovite et 60 % dans la biotite, car nous savons qu'une portion de celle-ci servira à pondérer la vermiculite à l'étape 4.

Tableau 3.10 Exemple de synthèse minéralogique semi-quantitative (%) en 5 étapes avec l'échantillon 502-3

Etapas	Minéralogie Uppsala	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite/Biotite	Chlorite	Epidotes	Calcite	Quartz	Total		
	502-3	12,8	4,1	6,3	0,4	18,8	4,5	1,4	1,9	2,5	47,3	100		
	Minéralogie des Sables	Feldspath-K	Plagioclase	Grenats	Muscovite	Biotite	Ferromagnésiens	Quartz	Total					
	502-2	26,1	21,7	0	0	0	10,9	41,3	100					
	Minéralogie des Argiles	Illite	Gibbsite	Kaolinite	Métaballoysite	Halloysite	Montmorillonite	Vermiculite	Chlorite					
	502-3	x			x			x						
	Minéralogie des Limons	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Micas	Chlorite	Epidotes	Calcite	Dolomite	Anatase		
	502-3	x	x	x		x	x	x				x		
		Goethite	Grenats	Halite	Hématite	Pyroxènes	Ilménite	Magnétite	Olivines	Pyrite	Quartz	Talc	Zircon	
						x			x		x	x		
	Présence Minéralogique	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite	Biotite	Epidotes	Pyroxènes	Grenats	Calcite	Chlorite	
	502-3	x	x	x		x	x	x		x			x	
		Vermiculite	Kaolinite	Quartz										
		x	x	x										
1	Proportion préliminaire	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Micas	Chlorite	Epidotes	Pyroxènes	Calcite	Quartz		
	502-3	12,8	4,1	6,3	0,4	18,8	4,5	1,4	0	1,9	2,5	47,3		
2	Proportion préliminaire	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite	Biotite	Chlorite	Epidotes	Pyroxènes	Calcite	Quartz	
	502-3	12,8	4,1	6,3	0,4	18,8	1,8	2,7	1,4	0	1,9	2,5	47,3	
3	Proportion préliminaire	Feldspath-K	Albite	Anorthite	Apatite	Amphiboles	Muscovite	Biotite	Chlorite	Epidotes	Pyroxènes	Grenats	Calcite	Quartz
	502-3	12,8	4,1	6,3	0,4	18,8	1,8	2,7	1,4	0	1,9	0	2,5	47,3
4	Minéraux secondaires (%) 502-3						5 Minéralogie finale (%) 502-3							
	Feldspath-K	12,8					Feldspath-K	12,7						
	Anorthite	6,3					Anorthite	6,3						
	Albite	4,1					Albite	4,1						
	Amphiboles	18,8					Amphiboles	18,8						
	Pyroxènes	1,9					Pyroxènes	1,9						
	Epidotes	0,0					Epidotes	0,0						
	Grenats	0,0					Grenats	0,0						
	Biotite	1,1					Biotite	1,1						
	Muscovite	2,3					Muscovite	2,2						
	Chlorite	1,4					Chlorite	1,4						
	Vermiculite	1,2	% Minéraux dans fraction <2µm					Vermiculite	1,2					
	Apatite	0,4	Formule: $0,5276 \cdot (2,63) + 0,0244 = 1,4$					Apatite	0,4					
	Kaolinite	0,2					Kaolinite	0,2						
	Calcite	2,5					Calcite	2,4						
	Quartz	47,3					Quartz	47,2						
	Total	100,2					Total	100						

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

d) avant l'étape des minéraux secondaires, nous avons évalué dans l'étape 3 la présence des grenats dans l'échantillon. L'échantillon 502-3 ne présente aucun grenat dans toutes les analyses effectuées. Donc, aucune proportion n'a été ajoutée. Si la présence des grenats avait été observée dans les sables ou les limons, nous aurions dû procéder à un ajustement comme il a été expliqué dans le chapitre méthodologie (Sous-section 2.4.4).

e) l'étape 4 consiste à insérer les proportions des minéraux secondaires observés dans les DRX des argiles, mais pour lesquels nous n'avons aucune proportion préliminaire. Ce qu'il faut s'assurer avant tout c'est que ces proportions ne dépassent pas les proportions d'argile de la granulométrie. Pour ce faire, nous avons utilisé la formule de régression (Figure 2.3). Donc, pour une proportion d'argile de 2,63 %, nous avons évalué une présence d'oxyhydroxides de 0,73 %, ce qui fait que 1,9 % des proportions d'argile de l'échantillon 502-3 doivent être divisées selon la présence des minéraux secondaires observés dans les DRX des argiles. Dans l'exemple que nous présentons, nous avons observé la présence de vermiculite et de métahalloysite. La vermiculite a été soustraite à la biotite. Nous avons établi un rapport d'environ 1/5 entre la kaolinite et la vermiculite pour ce qui est des proportions en fonction de la hauteur des raies sur les DRX.

f) enfin, la métahalloysite insérée dans la kaolinite n'a aucun minéral primaire pour lequel on peut réduire sa proportion. Ainsi, la pondération totale de l'étape 4 est constamment supérieure à 100 % lorsque la kaolinite est présente. Donc, l'étape 5 de la minéralogie finale consiste essentiellement en une repondération sur 100 % de l'étape 4.

La minéralogie finale paraît, à première vue, similaire à la minéralogie modélisée par UPPSALA en ce qui concerne les minéraux majeurs comme le quartz, les feldspaths potassiques, l'albite, l'anorthite et les amphiboles (Tableau 3.12). Nous avons laissé tels quels les résultats pondérés pour ces minéraux étant donné leurs fortes présences dans toutes les analyses effectuées (DRX, minéralogie des sables et modélisation UPPSALA). Ces minéraux composent en moyenne 90 % de la minéralogie totale de tous les échantillons. L'apatite a également été laissée telle quelle, car ce minéral est le seul qui contient du phosphore.

Tableau 3.11 Minéralogie semi-quantitative pondérée des horizons B (%)

Lacs Min./Sites	MacLeod			Josselin			Najoua			Eclair			Lemaine			Truite-Rouge	
	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3
Feldspath-K	19,9	22,2	20,5	20,8	19,6	19,8	18,8	15,8	18,4	15,5	15,6	16,4	19,3	17,8	16,9	15,1	15,9
Anorthite	11,4	9,4	10,2	8,8	9,6	9,7	9,7	10,1	8,7	12,6	12,8	12,6	9,4	10,6	10,0	6,0	5,5
Albite	23,2	21,4	22,5	23,7	24,4	23,4	23,4	22,5	23,2	25,8	27,0	28,2	24,5	24,7	27,1	4,6	4,9
Hornblende	12,5	9,8	10,6	7,4	8,5	9,1	9,2	10,1	7,4	13,1	13,1	12,0	8,2	11,9	7,8	16,4	13,7
Pyroxenes	2,0	1,6	1,7	1,4	1,6	1,6	1,6	1,7	1,4	2,1	2,2	2,1	1,5	2,0	1,5	1,6	1,3
Epidote	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Grenat	0,0	1,6	1,3	0,0	1,5	0,0	0,0	1,0	0,0	1,6	0,0	1,5	0,9	1,4	1,9	0,0	0,0
Biotite	0,0	0,0	0,0	7,3	4,9	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	2,8	2,4	1,2	1,2
Muscovite	6,9	6,1	5,9	0,0	0,0	0,0	5,9	4,0	6,5	3,9	5,5	4,3	2,6	1,5	0,0	4,4	4,3
Chlorite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vermiculite	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,5	0,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	1,6	0,7	0,1
Apatite	1,6	0,9	1,3	0,9	1,2	1,0	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	2,0	0,4	0,8
Kaolinite	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,1	0,1
Calcite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,1
Quartz	22,4	26,7	25,9	29,5	27,9	28,3	30,1	33,7	34,2	24,9	23,2	22,4	29,7	25,8	28,7	48,6	52,0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Lacs Min./Sites	Fauvette			Adanys			Boisvert			Chômeur			Thomas			Daniel	
	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2
Feldspath-K	15,8	14,2	15,2	16,7	15,9	17,4	16,1	16,6	16,3	16,8	18,0	17,6	16,8	18,0	17,2	17,7	18,5
Anorthite	13,1	12,2	13,2	9,6	10,9	9,6	10,0	8,5	10,5	10,5	10,2	9,1	11,3	11,1	11,6	10,2	10,3
Albite	25,3	24,0	24,9	25,2	26,5	25,0	19,1	18,9	23,2	25,2	24,7	24,7	24,4	24,1	24,4	24,9	26,0
Hornblende	14,6	19,7	14,8	8,0	9,7	8,2	11,6	8,8	10,5	9,6	9,3	7,3	11,5	11,3	12,0	9,3	8,9
Pyroxenes	2,3	2,8	2,3	1,5	1,8	0,8	1,7	1,4	1,7	1,7	1,7	1,4	1,9	1,9	2,0	1,7	1,7
Epidote	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Grenat	0,0	1,1	0,8	0,0	0,0	0,9	0,9	0,8	0,9	0,6	0,5	0,0	1,1	1,1	1,0	0,4	0,7
Biotite	1,6	0,8	2,1	2,1	2,2	2,1	3,4	5,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,8
Muscovite	2,3	1,5	2,4	3,3	3,0	2,6	0,0	0,0	0,0	4,0	4,7	6,2	4,9	4,9	4,4	2,9	3,1
Chlorite	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vermiculite	1,7	1,6	0,0	0,5	0,5	1,3	1,3	0,1	0,0	1,3	1,1	0,0	0,0	0,3	0,7	1,9	1,9
Apatite	0,5	1,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,7	0,6	0,6	0,9	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6
Kaolinite	1,1	1,2	0,0	0,2	0,2	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,6	0,0
Calcite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Quartz	21,8	18,9	23,8	32,2	28,7	31,0	35,2	39,4	31,3	29,7	28,9	32,8	27,5	26,5	26,0	28,8	27,4
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 3.11 Minéralogie semi-quantitative pondérée des horizons B (%) (suite)

Lacs Min./Sites	Pothier			Laurent			Des Jons			General-White			Grégoire		Des Papillons		
	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3
Feldspath-K	15,6	14,7	14,9	17,0	24,2	17,0	15,2	14,7	15,3	18,5	16,1	15,8	16,0	13,3	15,6	18,3	16,1
Anorthite	12,7	13,9	13,1	9,9	8,3	10,4	12,0	11,3	11,6	9,5	10,2	10,4	7,1	8,8	7,7	6,5	7,2
Albite	26,2	25,8	26,5	22,4	17,3	17,8	23,9	23,6	24,8	17,7	19,9	20,1	5,6	4,5	5,6	5,2	5,3
Hornblende	13,0	15,6	13,6	9,7	9,9	13,8	12,9	11,6	11,8	11,6	11,5	11,8	18,5	29,8	20,6	17,6	19,7
Pyroxenes	2,2	2,4	2,2	1,6	1,4	1,9	2,0	1,9	2,0	1,7	1,7	1,8	1,9	3,1	2,1	1,8	2,0
Epidote	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Grenat	1,3	1,6	0,0	1,6	2,7	1,8	1,2	0,5	0,5	0,0	0,6	1,1	0,4	0,6	1,1	1,2	0,7
Biotite	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	1,4	3,6	3,5	4,4	3,5	3,9	4,2
Muscovite	2,2	1,9	3,8	1,8	4,1	3,5	3,0	3,5	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chlorite	0,0	0,8	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	1,1	1,2	0,9	1,0	0,0	0,0	0,0
Vermiculite	2,0	0,9	1,5	1,7	0,0	0,7	0,7	0,7	1,5	2,4	2,8	0,9	1,9	0,3	0,9	1,4	0,8
Apatite	0,7	1,0	0,7	0,4	0,5	0,3	0,5	0,8	0,6	0,9	0,7	0,4	0,8	0,6	0,5	0,7	0,5
Kaolinite	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,1	0,0	0,6	0,1	0,0	0,5	0,3
Calcite	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,5	0,0	0,0	0,9	0,0	0,8	3,9	2,3	1,0	2,2
Quartz	24,1	21,5	23,7	32,1	29,8	32,8	28,1	30,9	28,6	31,2	32,0	33,0	42,0	29,6	40,0	41,8	41,3
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Lacs Min./Sites	Blais		David			Clair			Duck		
	501-1	501-3	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3
Feldspath-K	14,9	15,6	15,4	14,6	12,7	15,1	17,2	17,0	16,2	15,6	16,1
Anorthite	6,5	6,7	7,8	7,7	6,3	8,1	7,0	8,0	6,6	6,7	6,8
Albite	4,7	4,7	5,7	4,9	4,1	6,0	3,4	5,8	4,4	4,6	4,6
Hornblende	18,3	19,1	20,9	22,9	18,8	21,2	27,6	22,1	20,1	19,9	20,3
Pyroxenes	1,9	1,9	2,2	2,4	1,9	2,2	2,8	2,3	2,0	2,0	2,1
Epidote	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Grenat	0,9	0,9	0,8	0,5	0,0	0,7	1,1	1,3	0,9	1,8	0,8
Biotite	3,9	3,6	1,6	0,0	1,1	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
Muscovite	0,0	0,0	2,7	4,7	2,2	4,8	1,9	2,6	4,1	2,4	1,8
Chlorite	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,5	0,0	0,0	0,3	0,0
Vermiculite	0,4	1,0	0,4	0,0	1,2	0,4	2,6	0,1	0,8	1,8	3,1
Apatite	0,3	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	0,7	0,8	1,5	0,6	0,8
Kaolinite	0,2	0,3	0,1	0,0	0,2	0,2	1,0	0,1	0,4	0,9	1,2
Calcite	2,5	1,4	1,7	2,6	2,4	2,0	3,9	1,9	0,0	1,7	1,7
Quartz	45,6	44,0	40,0	39,2	47,2	38,9	30,3	36,1	43,2	41,8	40,7
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les proportions pour l'apatite dans les échantillons sont approximativement toujours inférieures à 1 %, à l'exception des pédons (112-1, 112-3, 113-2, 202-3, 212-2, 515-1).

Le 10 % de la minéralogie restante est ce qui apparaît caractériser et différencier les pédons et les sous-régions (Figure 3.5). Nous avons dans la synthèse minéralogique adapté les résultats d'UPPSALA des quatre minéraux restants (muscovite, chlorite, épidote et calcite) aux neuf minéraux également restants de la section *mineral stack* du modèle PROFILE (muscovite, biotite, pyroxène, épidote, grenats, chlorite, vermiculite, kaolinite et calcite) afin d'exploiter au maximum les possibilités minéralogiques offertes par PROFILE.

Ainsi, la première observation importante de la minéralogie finale se situe au niveau de la présence minéralogique ou de l'absence de certains minéraux dans la comparaison des résultats quantitatifs et qualitatifs des analyses minéralogiques et l'établissement d'une pondération pour ces minéraux:

a) dans tous les DRX des limons, on note une absence complète de l'épidote, mais toujours une présence marquée par plus d'une raie des pyroxènes. C'est ce qui justifie le fait que toutes les proportions d'épidote de la modélisation UPPSALA ont été transférées dans la section pyroxène de la minéralogie finale. La présence des pyroxènes varie entre 1,35 % (203-3) et 3,1 % (413-2). Les pyroxènes sont présents dans tous les échantillons.

b) la présence des grenats a été observée soit dans les DRX de limons, soit dans la minéralogie des sables. Ce minéral a été observé dans seulement 32 % des échantillons de la minéralogie des sables. Par contre, la présence de ceux-ci dans les DRX des limons a été observée dans environ 71 % des diffractogrammes. La pondération a donc été établie à partir de la minéralogie des sables de chaque bassin versant avec une remise en proportion selon le nombre de minéraux de la minéralogie finale. Si les grenats ont été observés seulement dans les DRX des limons, nous les avons jumelés à un bassin versant à proximité dans la même sous-région. Ainsi, les grenats ont été observés dans environ 77 % des pédons pour une moyenne de 1,1 %.

**Présence minéralogique pour chaque bassin versant:
moyenne de chaque pédon par bassin versant**

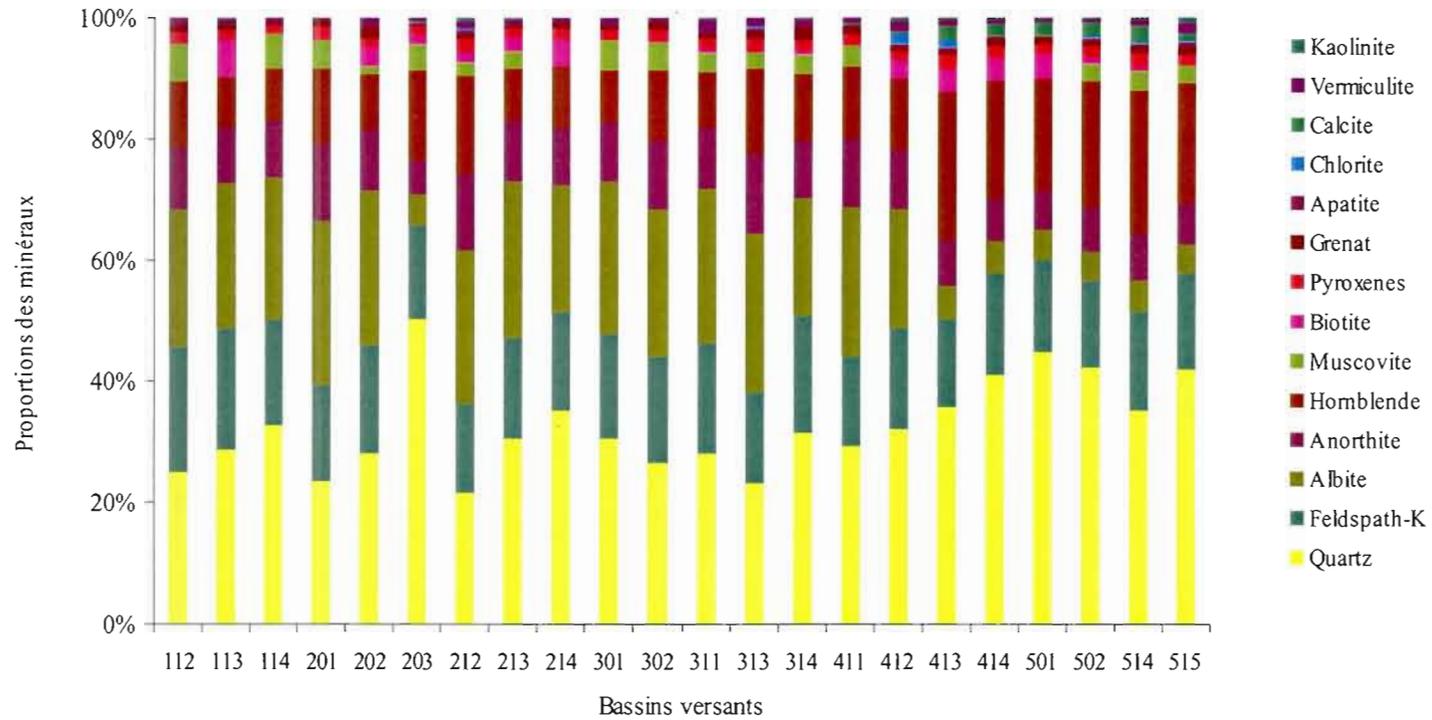


Figure 3.5 Proportion minéralogique pour les 22 bassins versants : moyenne des pédons par bassin versant.
Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006.

c) la biotite est présente dans 53 % des échantillons. Elle a été observée dans la minéralogie des sables et sa pondération est une portion de la muscovite générée par le modèle UPPSALA. Les valeurs varient de façon considérable entre 0,75 % et 7,3 % pour une moyenne d'environ 3 %.

d) la pondération pour la muscovite a été effectuée de la même façon que celle de la biotite. Par contre, ce minéral est présent dans environ 73 % des pédons. La moyenne est quelque peu supérieure à celle de la biotite avec 3,7 % et les valeurs varient entre 1,5 % et 6,9 %.

e) la chlorite a surtout été observée dans les DRX des limons même si la modélisation UPPSALA a généré des proportions de chlorite pour le lac General White et les pédons 212-2, 502-3 et 515-2. Les valeurs de ces derniers ont été conservées. Quant à la présence de la chlorite dans les DRX des limons, la proportion insérée dans la minéralogie finale a été soit corrélée avec la modélisation UPPSALA ou bien une faible proportion des biotites ou des muscovites a été retirée de ceux-ci et ajoutée à la chlorite. En plus des six pédons susmentionnés, seulement cinq autres pédons possèdent de la chlorite dans leur minéralogie. Il s'agit du lac Grégoire et des pédons 313-2, 314-1 et 514-2. La présence de la chlorite dans ces échantillons est en moyenne quelque peu inférieure à 1 %.

f) la présence de la calcite est également faible dans l'ensemble de la région, mais supérieure à celle de la chlorite. La calcite est surtout présente dans l'ouest de la région à l'étude; dans la SR5 à l'exception du pédon 515-1, aux lacs Truite-Rouge, Grégoire et des Papillons ainsi que dans les pédons 411-1, 411-2 et 412-2, ce qui représente 35 % de tous les pédons pour une moyenne de 1,7 %. Les proportions ont été en général établies par la modélisation UPPSALA et la présence confirmée dans les DRX des limons.

g) la présence de la vermiculite est essentiellement identifiée dans les DRX des argiles. Elle se trouve dans environ 80 % des échantillons pour une moyenne approximative de 1 %. Les variations dans les résultats sont surtout occasionnées par les différences dans les proportions d'argiles dans la texture des échantillons. Certaines valeurs très élevées sont peut-être biaisées par le fait qu'il a été impossible de tenir compte de la proportion des minéraux

primaires hérités dans les fractions argileuses, tandis que les valeurs très faibles comme 0,1 % sont dues au fait que les proportions des fractions argileuses étaient très faibles dans les échantillons concernés, mais la raie était tout de même présente dans les DRX des argiles.

h) enfin, il en est de même pour la kaolinite. Comme mentionné précédemment dans l'exemple de l'échantillon 502-3, les proportions entre kaolinite et vermiculite ont été faites dans un rapport 1/5. Donc, la moyenne pour la kaolinite dans les échantillons que cela concerne (55 %) est d'environ 0,4 %.

3.2.6 Comparaison des résultats de minéralogie

Les analyses minéralogiques présentées précédemment ont été comparées à d'autres études qui ont été faites dans le Bouclier canadien. Ainsi, les résultats de DRX des argiles de la présente étude sont confirmés par les travaux de Mutwewingabo et al. (1975) à St-Agathe, dans la vallée de la Gatineau, et dans la forêt de Duchesnay, près de Québec. Ces derniers ont observés dans les argiles de ces pédons la présence de vermiculite, de montmorillonite, de kaolinite et d'illite. Ils ont également noté l'absence de chlorite dans les profils de Duchesnay et ils ont eu beaucoup de difficulté à l'observer dans ceux de Gatineau et de St-Agathe. Ce n'est qu'après l'extraction de l'Al par le citrate de Na à 100°C qu'ils ont pu l'identifier, extraction qui n'a pas été fait dans la présente étude. En revanche, dans les DRX des limons de notre étude, la chlorite a été observé dans quelques pédons des SR3, SR4 et SR5. Les diffractogrammes de Mutwewingabo et al. (1975) ont tous présenté les raies de diffraction du quartz, des feldspaths (potassiques et plagioclases) et des amphiboles. Ils ont aussi recensé dans les fractions sableuses de leurs échantillons, comme il a été observé dans la sous-section sur la minéralogie des sables, la présence des minéraux susmentionnés incluant les micas avec prédominance de la biotite ainsi que des minéraux lourds comme les pyroxènes et les grenats (Mutwewingabo et al. 1975; Federoff et al. 1977).

En ce qui concerne le modèle UPPSALA, l'étude de Bélanger et al. (2004) a utilisé le même modèle pour reconstruire la minéralogie de quatre pédons dans la province de Québec. Deux

de ces pédons se trouvent dans la région de Valcartier sur le Bouclier canadien et ont été utilisés pour les comparés aux résultats générés dans cette étude. Ainsi, lorsqu'on fait la moyenne de la minéralogie de ces deux pédons et qu'on la compare à la moyenne des 62 pédons étudiés dans ce mémoire nous obtenons un coefficient de corrélation de 0,90. La relation est plus forte pour les bassins versants qui se situent au centre et à l'est de l'aire d'étude ($r = 0,97$). En revanche, la corrélation est beaucoup plus faible pour les lacs situés à l'ouest, en particulier la SR5 et les lacs 413, 414 ($r = 0,66$). Cette faible corrélation est principalement due à des taux beaucoup plus faibles d'albite et très élevés pour les amphiboles et le quartz, par rapport aux autres pédons, ainsi que par la présence de la calcite absente de la majorité des pédons (Tableau 3.12).

Tableau 3.12 Comparaison du modèle UPPSALA entre les résultats présentés par Bélanger et al. (2002) pour Valcartier et les 62 pédons à l'étude (%)

Minéraux/Régions	Moyenne Valcartier	Moyenne 62 pédons	Moyenne SR1-SR2-SR3 et lacs 411, 412	Moyenne SR5 et lacs 413, 414
Feldspath-K	21,62	16,73	17,25	15,69
Albite	24,51	16,91	22,89	4,95
Anorthite	9,86	9,41	10,50	7,25
Apatite	1,68	0,70	0,71	0,67
Amphiboles	7,75	14,51	11,17	21,20
Muscovite	7,65	5,92	6,10	5,55
Chlorite	0,00	0,10	0,10	0,11
Epidotes	1,44	1,92	1,80	2,17
Calcite	0,00	0,73	0,04	2,12
Quartz	25,51	33,05	29,43	40,30
<i>r</i>		0,90	0,97	0,66
<i>P</i>		<0,001	<0,001	0,036

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les résultats de minéralogie semi-quantitative peuvent être comparés à ceux de Ouimet et Duchesne (2005) qui ont utilisé une technique similaire à celle présentée dans cette étude, c'est-à-dire une minéralogie semi-quantitative basée sur les DRX. Cependant, alors que nous avons utilisé un modèle de reconstruction des minéraux basés sur la chimie totale pour établir les pondérations, ces derniers ont établis la proportion des minéraux selon la surface intégrée des raies de diffraction de chaque minéral et la proportion finale selon la granulométrie des échantillons. Ces données de minéralogie proviennent de trois bassins versants du RESEF (Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers) situés dans le Bouclier canadien; le lac Claire, le lac Laflamme et le lac de la Tirasse.

Dans le but de permettre une comparaison, nous avons retiré deux minéraux de notre liste (grenats et calcite), car il ne faisait pas partie des minéraux identifiés par Ouimet et Duchesne (2005). De plus, nous avons additionné les proportions d'albite et d'anorthite afin de les rassembler sous le groupe des plagioclases. Il est à noter que les pondérations totales de la minéralogie de Ouimet et Duchesne (2005) n'équivaut pas 100 %. Ainsi, nous n'avons pas repondéré notre minéralogie lorsque nous avons retiré les grenats et la calcite de nos échantillons. Une fois ses ajustements effectués, nous avons calculé la moyenne des horizons B de l'étude de Ouimet et Duchesne (2005) que nous avons comparé à la moyenne des 62 pédons de la présente étude. Le coefficient de corrélation entre ces deux moyennes s'avère extrêmement forte avec un r de 0,95. Lorsque nous avons observé les corrélations selon chacune des sous-régions, elles se sont avérées très fortes pour les SR1 ($r = 0,97$), SR2 ($r = 0,95$) et SR3 ($r = 0,95$), tandis qu'elles diminuent pour la SR4 ($r = 0,88$) et pour la SR5 ($r = 0,79$). Les différences entre la minéralogie semi-quantitative de Ouimet et Duchesne (2005) et celles des SR4 et SR5 sont essentiellement occasionnées par des proportions plus faibles de feldspath plagioclases et plus fortes des amphiboles (Tableau 3.13).

Tableau 3.13 Comparaison de la minéralogie semi-quantitative de Ouimet et Duchesne (2005) vs. la minéralogie semi-quantitative de chacune des sous-régions et de l'aire d'étude (%)

Minéraux/Régions	Moyenne Ouimet et Duchesne (2005)	Moyenne SR1	Moyenne SR2	Moyenne SR3	Moyenne SR4	Moyenne SR5	Moyenne 62 pédons
K-Feldspath	20,4	19,6	16,0	17,5	16,0	15,5	16,9
Plagio	28,9	32,8	34,4	34,6	18,2	12,0	26,4
Apatite	0,3	0,9	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
Amphiboles	2,9	9,4	11,8	11,4	18,4	21,5	14,5
Muscovite	1,0	3,9	1,7	2,9	0,0	3,0	2,3
Biotite	0,5	2,1	2,7	0,5	3,6	0,5	1,9
Chlorite	0,4	0,0	0,1	0,2	0,8	0,2	0,3
Epidote	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pyroxene	3,6	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	1,9
Vermiculite	1,5	0,3	0,8	1,4	1,4	1,2	1,0
Kaolinite	0,2	0,1	0,4	0,2	0,4	0,5	0,3
Quartz	34,3	28,7	29,1	27,6	36,3	39,7	32,3
r		0,97	0,95	0,95	0,88	0,79	0,95
P		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	<0,001

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

PARTIE II

SIMULATION DE L'ALTÉRATION AVEC LE MODÈLE PROFILE

CHAPITRE IV

INTRODUCTION AU MODÈLE PROFILE

PROFILE est un modèle mathématique et biogéochimique développé dans le but de calculer l'influence des dépôts acides sur les sols. Il a été élaboré par les chercheurs suédois Harald Sverdrup et Per Warfvinge du *Department of Chemical Engeneering II* de l'université de Lund, Suède. Le modèle est innovateur parce qu'il calcule les taux d'altération du sol à partir d'équations bien définies et de mesures terrain indépendantes des propriétés du sol. Il a été très utilisé par le *European Critical Loads Program* afin de fournir des données pour les négociations et les stratégies de réduction des émissions de SO₂ entre les pays (Hodson et al. 1997). Bien que le modèle n'ait pas été nommé formellement en 1988, il a été décrit pour la première fois dans *Water, Air and Soil Pollution* (Sverdrup et Warfvinge 1988). Dans cet article on y décrivait les équations de base du modèle et des taux d'altération ont été calculés pour certains bassins versants d'Europe et d'Amérique du Nord aux fins de comparaison avec les flux mesurés avec les méthodes conventionnelles (par exemple budget intrant-extrant et bilan de masse). Une bonne corrélation a été observée entre les méthodes, permettant aux auteurs d'affirmer qu'un modèle fondé à partir d'études en laboratoire pouvait être utilisé avec succès pour expliquer les taux d'altération mesurés sur le terrain (Sverdrup and Warfvinge 1988). Le perfectionnement du modèle a continué au cours des années 1990 et la version 2.2 a été rendue accessible à la communauté scientifique internationale. Cette recherche utilise la version internationale PROFILE 4.1 (juin 1998, accessible à l'adresse suivante: www2.chemeng.lth.se/models/profile/).

Le modèle PROFILE est défini comme un modèle d'équilibre dynamique calculant le taux d'altération ainsi que certaines caractéristiques de la composition chimique du sol à partir de ses propriétés physiques, chimiques et minéralogiques (Sverdrup 1996). Ces intrants alimentent le modèle pour qu'il génère une chimie du sol et celle de la solution des différents horizons du sol. Pendant les dix premières années après la création du modèle, les

publications des travaux ont été limitées à quelques simulations en Suède et en Grande-Bretagne (Sverdrup et Warfvinge 1988; Langan et al. 1996; Hodson et al. 1997). Cependant, depuis la fin des années 1990, le modèle a suscité l'intérêt d'autres chercheurs de pays européens (Reynolds et Stevens 1998; Fichter et al. 1998; Koptsik et al. 1999; Eggenberger et Kurz 2000; Van Der Salm 2001), d'Amérique du Nord (Kolka et al. 1996; Ouimet et al. 2001; Watmough et Dillon 2003; Bélanger et al. 2004) et d'Asie (Duan et al. 2002).

Le modèle conceptuel PROFILE reproduit en partie les interactions entre le sol, les arbres et les dépôts atmosphériques, alors que le modèle mathématique est constitué de plusieurs modèles afin de rendre calculable les paramètres conceptuels.

4.1 Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel PROFILE a été bien décrit dans le rapport numéro 5 du *Department of Chemical Engineering II* intitulé *Critical Loads of Acidity to Swedish Forest Soils: Methods, Data and Results* (Warfvinge et Sverdrup 1995). Celui-ci simule le cycle des nutriments à l'intérieur d'un écosystème forestier et les processus chimiques qui prennent place dans le sol. Ces processus sont divisés en un modèle principal et en plusieurs sous-modèles de réactions chimiques.

Le modèle principal illustre les processus physiques de transport à une échelle macroscopique, alors que les sous-modèles intègrent les réactions chimiques individuelles du sol, c'est-à-dire les réactions chimiques de la solution du sol, l'altération des minéraux, la nitrification et le prélèvement des nutriments (Figure 4.1). Parce qu'il y a une grande variabilité verticale de la qualité de la solution du sol dans un pédon, la zone racinaire ne peut pas être modélisée comme un compartiment unique. PROFILE a donc été conçu de façon à représenter les différents horizons d'un pédon. Chaque compartiment du modèle est donc égal à un horizon. Ceci permet un calibrage basé sur les données individuelles des horizons d'un sol. Afin de bien saisir le modèle PROFILE, il est très important de reconnaître que tous

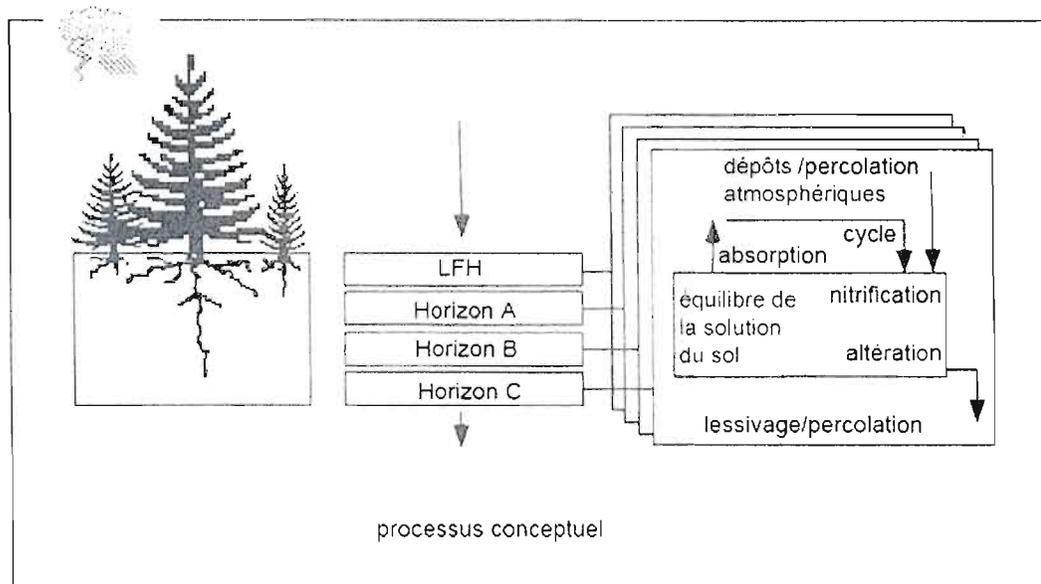


Figure 4.1 Processus de conceptualisation qui a amené à la formulation du modèle PROFILE. (Warfvinge et Sverdrup 1995). Traduction Patrick Lamoureux

les sous-systèmes chimiques d'un écosystème forestier communiquent via la solution du sol (Warfvinge et Sverdrup 1995).

Dans le modèle PROFILE, l'écosystème forestier interagit directement avec le sol via le prélèvement des nutriments. En général, le taux de prélèvement des nutriments est confiné à l'état ou à la qualité du système sol. Si le modèle était constitué d'un seul horizon de sol, le cycle des nutriments n'affecterait pas la structure du modèle ou le paramétrage. Au contraire, dans un modèle qui intègre plusieurs horizons, le cycle des nutriments redistribue les éléments partout dans le pédon (Figure 4.2). Le modèle PROFILE utilise donc une approche de prélèvement des nutriments qui permet de différencier la concentration des nutriments dans la solution du sol selon la position des horizons dans le pédon. La concentration sera plus élevée dans les horizons superficiels du pédon et le dernier horizon ne sera probablement pas affecté.

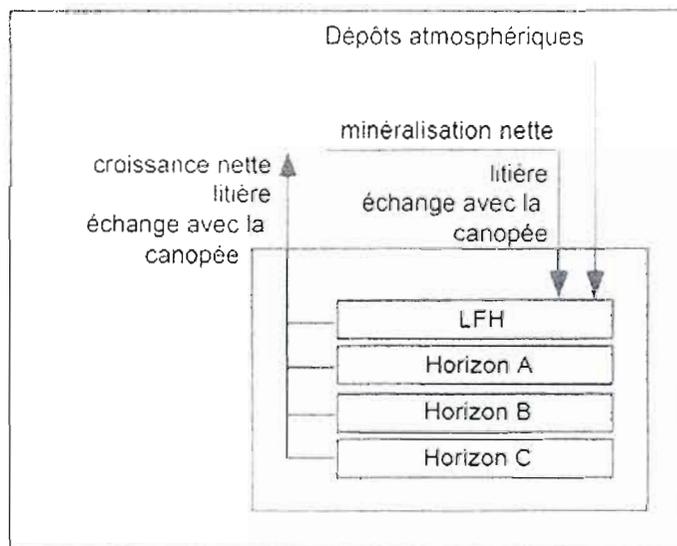


Figure 4.2
Modèle utilisé
dans PROFILE
pour simuler le
prélèvement des
nutriments
(Warfvinge et
Sverdrup 1995).
Traduction
Patrick
Lamoureux,
UQAM, 2006

4.2 Modèle mathématique

Le modèle PROFILE est construit selon un bilan massique d'un écosystème. Dans le bilan, les processus acidifiants sont contrebalancés par les sources d'alcalinité. La description des bases théoriques du modèle PROFILE est également tirée du rapport numéro 5 mentionné précédemment ainsi que des manuels d'instruction de PROFILE 4.0 (Alveteg et al. 1997) et PROFILE 4.2 (Becker 1999). Les différentes versions de PROFILE qui ont été élaborées depuis sa conception sont justifiées par (1) l'ajout de nouveaux paramètres, (2) la mise à jour de certains paramètres et (3) la correction de certaines erreurs informatiques superficielles (Hodson et al. 1997; manuel d'utilisation pour PROFILE 4.1 intégré au logiciel informatique).

4.2.1 Bilan massique

Le modèle mathématique tente de transformer le modèle conceptuel en un système qui permet de calculer le ratio aluminium: [calcium+magnésium+potassium] (Al:BC) pour différents niveaux d'intrants atmosphériques. Lorsque l'Al est libéré, il a un effet antagoniste sur le prélèvement des BC (c'est-à-dire les macro-nutriments importants pour la santé de l'écosystème forestier) (Cronan et Grigal 1995). En se référant à l'équation du bilan massique simple et en améliorant celui-ci afin de tenir compte de certains aspects spécifiques liés par exemple au taux d'altération et à la nitrification, la formule mathématique du modèle prend la forme suivante (Warfvinge et Sverdrup 1995; Becker 1999):

$$\begin{aligned}
 [CNA]_i &= \\
 \frac{1}{Q_i} (Q_{i-1} [CNA]_{i-1} + z_i \Theta_i (R_{w,i} - R_{bc,i} + R_{u_{NO_3},i} - R_{u_{NH_4},i} - R_{N_i,i})) \\
 [BC^{2+}]_i &= \frac{1}{Q_i} \left(Q_{i-1} [BC^{2+}]_{i-1} + z_i \Theta_i * \frac{1}{2} (R_{BC,i} - R_{bc,i}) \right) \\
 [NO_3^-]_i &= \frac{1}{Q_i} (Q_{i-1} [NO_3^-]_{i-1} + z_i \Theta_i (-R_{u_{NO_3},i} - R_{N_i,i})) \\
 [NH_4^+]_i &= \frac{1}{Q_i} (Q_{i-1} [NH_4^+]_{i-1} + z_i \Theta_i (-R_{u_{NH_4},i} - R_{N_i,i})) \\
 [Na^+]_i &= (Q_{i-1} [Na^+]_{i-1} + z_i \Theta_i (R_{w,i} - R_{bc,i}))
 \end{aligned}$$

où $[X]_i$ réfère à la concentration d'un élément chimique $[X]$ dans la solution du sol $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3}]$, z_i à l'épaisseur de l'horizon d'un sol $[\text{m}]$, Θ_i au volume de contenu en eau $[\text{m}^3 \text{ m}^{-3}]$, $[i]$ à un horizon d'un sol, Q_i à la circulation de l'eau $[\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ an}^{-1}]$, $R_{w,i}$ au taux d'altération des BC+Na $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}]$, $R_{BC,i}$ également au taux d'altération des BC+Na $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}]$, $R_{u_{BC},i}$ au prélèvement des BC+Na par les arbres $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}]$, $R_{u_{NH_4},i}$ au prélèvement de l'ion ammonium (NH_4) par les arbres $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}]$, $R_{u_{NO_3},i}$ au prélèvement de l'ion nitrate (NO_3) par les arbres $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}]$ et $R_{N_i,i}$ à la transformation (nitrification) de l'azote (N) en NO_3 $[\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}]$.

La structure du modèle mathématique est constituée de quatre équations de masse qui intègrent les principaux processus chimiques du sol, soit: (1) les réactions chimiques dans la solution du sol, (2) l'altération des minéraux, (3) la nitrification et (4) le prélèvement des nutriments. De même, les auteurs du modèle ont intégré le bilan massique de NO_3^- , NH_4^+ et du sodium (Na^+), pour mieux émuler la nitrification et le prélèvement de N par les arbres ainsi que pour préciser dans le modèle d'altération la présence du Na^+ .

4.2.2 Réactions chimiques dans la solution du sol

Dans un écosystème forestier en état d'équilibre climacique les processus d'acidification sont neutralisés via quelques systèmes tampons: (1) le système carbonaté, (2) le système alumineux, (3) les acides organiques (R^- et H^+) et (4) l'autoprotolyse de l'eau. Une fois ces systèmes/processus exprimés simplement, on obtient une équation qui permet de calculer la CNA de la solution de sol (Warfvinge et Sverdrup 1995):

$$[CNA] = [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{R}^-] - [\text{H}^+] - \sum_{m=1}^3 m [\text{Al}(\text{OH})_{3-m}^{m+}]$$

Cette équation permet de connaître la CNA à partir de la concentration de l'ion d'hydrogène (H^+) en spécifiant la pression partielle en CO_2 , la température et la concentration du carbone organique dissous (COD [R dans les équations]). De cette façon, on tient compte des réactions chimiques impliquant OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , R^- , Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ afin de caractériser la solution du sol et obtenir les données pour l'équation de la CNA.

4.2.3 Modèle d'altération des minéraux

Une des grandes innovations du modèle PROFILE est qu'il calcule le taux d'altération des minéraux à partir des propriétés minéralogiques du sol et des propriétés chimiques de la solution du sol en contact avec les minéraux. C'est la raison pour laquelle nous avons privilégié ce modèle pour l'évaluation du taux d'altération. Le taux total d'altération simulé représente la somme des taux élémentaires des réactions d'altération chimique pour chaque minéral. En général, quatre réactions chimiques d'altération ont été identifiées en laboratoire pour les sols podzoliques étudiés par le *Department of Chemical Engineering II*, soit les réactions avec l'ion H^+ , l'eau (H_2O), la pression partielle en CO_2 et les composés organiques (R^-). Ainsi, selon les conditions naturelles prévalentes dans l'environnement du sol, le taux de BC libérés (r) pour chaque minéral (j) est généralisé par l'équation suivante (Warfvinge et Sverdrup 1995; Becker 1999):

$$r_j = \frac{k_H * [H^+]^{m_H}}{f_H} + \frac{k_{H_2O}}{f_{H_2O}} + \frac{k_{CO_2} * P_{CO_2}^{n_{CO_2}}}{f_{CO_2}} + \frac{k_R * 0.7 [R^-]^{m_R}}{f_R}$$

où r_j réfère au taux de l'élément libéré pour un minéral donné [$kmol_c m^{-3} an^{-1}$], k_y au taux de coefficient [k] libéré d'une réaction [y] (où [y] toujours à une réactions d'altération avec H^+ , H_2O , CO_2 et R^-), f_y au taux de facteur réductif [f] libéré d'une réaction [y] (valeur entre 0 et 1), [x] à la concentration en H^+ ou d'acides organiques dans la solution du sol [$kmol_c m^{-3} an^{-1}$], P_{CO_2} à la pression partielle en CO_2 , n_y au taux de réaction [n] d'une réaction [y] et H , H_2O , CO_2 et R réfèrent respectivement aux réactions d'altération individuellement, c'est-à-dire les réactions avec un ion hydrogène, les réactions avec l'eau, les réactions avec la pression partielle en gaz carbonique et les réactions avec des complexes organiques ligands. Le facteur réductif f_y de l'équation peut être calculé à partir de la concentration des BC, d'Al et de R^- dans la solution du sol.

Le taux des réactions d'altération dans le sol est limité par la température. L'effet de la température est quantifié à partir de l'équation d'Arrhenius, c'est-à-dire le taux de réaction est fonction de l'énergie nécessaire pour activer les surfaces des minéraux. Une variation de

la température du sol a des conséquences importantes sur les résultats du modèle. Par exemple, un changement de 4°C dans le sol peut faire basculer le taux d'altération de 30%.

Au cours de la pédogenèse, l'altération des minéraux se fait seulement à l'interface de l'eau et des surfaces minérales. Conséquemment, le modèle tient compte de la quantité de surfaces en contact avec l'eau. Pour établir le taux d'altération des BC à travers l'ensemble du pédon ou d'un bassin versant, le modèle utilise les équations suivantes (Warfvinge et Sverdrup 1995; Becker 1999):

$$R_{BC,i} = \frac{A_i * \theta_i}{\Theta_i} \sum_{j=1}^{minerals} (1 - y_{Na,i}) * r_j * x_j$$

$$W_{BC} = \sum_{i=1}^{horizons} z_i * \Theta_i * R_{BC,i}$$

où $R_{BC,i}$ réfère au taux d'altération des BC [$\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}$], A_i à la surface spécifique des minéraux [$\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$], θ_i au volume de contenu en eau ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), Θ_i au taux de saturation en eau (déduit à partir du contenu en eau ou par modélisation) (valeur de 0 et 1), $y_{Na,i}$ à la proportion de sodium contenue dans les minéraux (valeur entre 0 et 1), x_j aux proportions des minéraux (valeur 0 et 1), r_j à la vitesse de libération des BC pour chacun des minéraux [$\text{kmol}_c \text{ m}^{-3} \text{ an}^{-1}$], z_i à l'épaisseur de chacun des horizons du sol [m], W_{BC} au taux d'altération des BC dans tout le pédon [$\text{mmol}_c \text{ m}^{-2} \text{ an}^{-1}$], [j] à un minéral parmi les quatorze minéraux inclus dans le modèle et [i] à un des horizons du pédon.

4.2.4 Modèle de la dynamique de N et du prélèvement des nutriments par les arbres

Le cycle de N dans le modèle PROFILE est reproduit seulement avec la nitrification et le prélèvement par les arbres. Il y a trois raisons qui expliquent cette approche: (1) une description complète des processus de redistribution de N aurait rendu la structure du modèle trop complexe, (2) certains de ces processus sont pris en compte au cours du prélèvement et

(3) une insuffisance de données régionales n'a pas permis le calibrage du modèle pour ces processus. Dans le modèle, on présume que la totalité de NH_4^+ est oxydé et prélevé sous la forme de NO_3^- .

Le prélèvement des nutriments est évalué selon deux hypothèses. La première sous-tend qu'il y a un taux maximal de prélèvement des nutriments par horizon donné et la deuxième sous-tend que le prélèvement des nutriments ne peut se faire si la concentration en BC descend sous un point critique. Le prélèvement des BC devient dès lors un problème d'offre et de demande. L'algorithme établi par les chercheurs suédois pour calculer le prélèvement des BC est (Becker 1999):

$$R_{BC,i} = \min \left(\max \left(0, \frac{2}{z_i * \Theta_i} * (Q_{i-1} * [BC^{2+}]_{i-1} - Q_i * [BC^{2+}]_{crit}) + R_{BC,i} \right), R_{BC,max,i} \right)$$

où $[BC^{2+}]_{i-1}$ réfère à la concentration en BC de la solution du sol [$\text{kmol}_c \text{m}^{-3}$], $[BC^{2+}]_{crit}$ à la concentration critique de BC dans la solution du sol, z_i à l'épaisseur de l'horizon [m], Θ_i au contenu en eau [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], $[i]$ à un horizon d'un pédon, Q_i au flux de l'eau dans un horizon [$\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{an}^{-1}$], $R_{BC,i}$ au taux d'altération des BC pour un horizon [$\text{kmol}_c \text{m}^{-3} \text{an}^{-1}$], $R_{UBC,i}$ au prélèvement des BC par les arbres [$\text{kmol}_c \text{m}^{-3} \text{an}^{-1}$], $R_{UBC,max,i}$ au prélèvement maximal de BC par les arbres [$\text{kmol}_c \text{m}^{-3} \text{an}^{-1}$] et U_{BC} au prélèvement brut de BC par les arbres [$\text{mmol}_c \text{m}^{-2} \text{an}^{-1}$]. Notez que $R_{UBC,max,i}$ est déduit à partir du prélèvement net de BC qui inclut la charge de BC provenant de la litière et des échanges avec le houppier de l'arbre.

Pour l'ensemble d'un pédon, le prélèvement des BC est calculé de la façon suivante (Warfvinge et Sverdrup 1995; Becker 1999):

$$U_{BC} = \sum_i^{horizons} z_i * \Theta_i * R_{BC,i}$$

CHAPITRE V

MÉTHODOLOGIE DU MODÈLE PROFILE

Les modèles mathématiques permettent d'étudier et d'interpréter des systèmes complexes et non-linéaires ainsi que l'interaction de plusieurs processus simultanément. Nous avons pu observer que le modèle PROFILE possède une description mathématique fort complexe et il nécessite une importante base de données pour opérer. C'est pourquoi les chercheurs suédois ont créé un programme informatique permettant de synthétiser le modèle mathématique en un modèle informatique. Le programme a été conçu sur Apple Macintosh, mais il est également disponible sur PC depuis 1990. Il est convivial et génère des résultats assez rapidement. Le modèle informatique est divisé en une section de quatre à six tables de données dans lesquelles on insère les données générales et spécifiques ainsi qu'une deuxième section de résultats comprenant sept tables de données. Nous allons présenter ces tables de données pour ensuite exposer comment les données ont été obtenues, c'est-à-dire (1) en laboratoire à l'aide des échantillons prélevés sur le terrain, (2) simulées ou (3) empruntées à la littérature. Pour cette recherche, compte tenu de l'échelle du terrain à l'étude et du nombre d'échantillons à manipuler, le modèle PROFILE a été utilisé dans le but unique d'évaluer le taux d'altération des éléments majeurs des horizons B podzoliques.

5.1 Base de données du modèle

Les intrants que l'on spécifie dans le modèle PROFILE sont divisés en deux sections, c'est-à-dire la section générale et la section liée au sol. Les deux premières tables de données sont du domaine général. La table de donnée 1 du modèle comprend l'identification de l'échantillon, les horizons à analyser, le taux de nitrification (aucune, faible, modérée et élevée), les variables hydroclimatiques (par exemple la précipitation annuelle, le ruissellement annuel, la température du sol) et les variables de dépôts atmosphériques secs et humides anioniques

(SO₄, H, NO₃) ainsi que cationiques (NH₄, Ca, Mg, K, Na, Al) en kmol_c ha⁻¹ an⁻¹. La deuxième table de données générales concerne la végétation arborée. On doit y spécifier le prélèvement net des nutriments, les échanges ioniques entre l'atmosphère et la canopée, la qualité de la litière, la minéralisation nette des nutriments (tous en kmol_c ha⁻¹ an⁻¹) et d'autres variables spécifiques à la profondeur du prélèvement des BC et de N (fraction m⁻¹) ainsi que de la solubilité de l'aluminium (AlExp) (Tableau 5.1) (Sverdrup 1996).

Tableau 5.1 Tables de données des intrants PROFILE pour les bassins versants

Table 1		Table 2
Variables générales		Variables de végétation
Identification de l'échantillon	xxx-x	Prélèvement net des nutriments (kmol _c ha ⁻¹ an ⁻¹)
Nombre d'horizon	2	Ca
Précipitation annuelle (m an ⁻¹)	BioSIM	Mg
Ruissellement (m an ⁻¹)	Const. Rég.	K
Température du sol (°C)	ForSTEM	Na
Dépôts atmosphériques (kmol _c ha ⁻¹ an ⁻¹)		Échanges ioniques entre l'atmosphère et la canopée (kmol _c ha ⁻¹ an ⁻¹)
Dépôts sec et humide anioniques		Ca
SO ₄		Ca
Cl	Const. Rég.	Mg
NO ₃		K
Dépôts sec et humide cationiques		Na
NH ₄		Qualité de la litière (kmol _c ha ⁻¹ an ⁻¹)
Ca		Ca
Mg	Const. Rég.	Mg
K		K
Na		Na
Taux qualitatif de Nitrification		Minéralisation nette des nutriments (kmol _c ha ⁻¹ an ⁻¹)
None-Low-Medium-High	Const. Rég.	Ca
		Mg
		K
		Na
		Profondeur du prélèvement des BC (fraction m ⁻¹)
		Profondeur du prélèvement de l'N (fraction m ⁻¹)
		Solubilité de l'aluminium (AlExp)

Const. Rég. = Constante régionale

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Toutes les informations requises dans la section sol se trouvent sur une seule table de donnée divisée selon le nombre d'horizons spécifiés dans la table de donnée 1 de la section générale. Le modèle permet d'inclure un maximum de quatre horizons pour chaque simulation. Pour tous les horizons, on doit insérer des informations sur son épaisseur (m), son contenu en eau ($m^3 m^{-3}$), sa densité apparente ($kg m^{-3}$) et sa surface spécifique exposée à l'altération ($m^2 m^{-3}$). Pour chacun, on doit également spécifier la pression partielle en CO_2 (\times atmosphère), la proportion d'eau qui percole dans l'horizon et qui en sort (%), la proportion des BC et de N prélevés (%), le carbone organique dissous (COD) ($mg l^{-1}$), la solubilité de l'aluminium (le $\log K$ gibbsite) et la minéralogie (14 minéraux) (Tableau 5.2) (Sverdrup 1996).

Tableau 5.2 Tables de données des intrants PROFILE pour les pédons

Table 3			
Variables pour l'horizon de surface		Variables pour l'horizon minéral	
Épaisseur de l'horizon (m)	Const. Rég.	Épaisseur de l'horizon (m)	Env. Can.
Contenu en eau du sol ($m^3 m^{-3}$)	Const. Rég.	Contenu en eau du sol ($m^3 m^{-3}$)	ForHYM
Densité apparente ($kg m^{-3}$)	Const. Rég.	Densité apparente ($kg m^{-3}$)	Env. Can.
Surface spécifique	Const. Rég.	Surface spécifique	Labo.
Pression CO_2 (\times atm.)	Const. Rég.	Pression CO_2 (\times atm.)	Const. Rég.
% des précipitations entrant dans l'horizon	ForHYM	% des précipitations entrant dans l'horizon	ForHYM
% des précipitations sortant de l'horizon	ForHYM	% des précipitations sortant de l'horizon	ForHYM
Prélèvement des cations (% du max.)	Const. Rég.	Prélèvement des cations (% du max.)	Const. Rég.
Prélèvement de l'azote (% du max.)	Const. Rég.	Prélèvement de l'azote (% du max.)	Const. Rég.
COD ($mg l^{-1}$)	Const. Rég.	COD ($mg l^{-1}$)	Const. Rég.
pK Gibbsite	Const. Rég.	pK Gibbsite	Const. Rég.
Minéralogie (%)		Minéralogie (%)	
Feldspath-K		Feldspath-K	
Anorthite		Anorthite	
Albite		Albite	
Amphiboles		Amphiboles	
Pyroxenes		Pyroxenes	
Epidotes		Epidotes	
Grenats		Grenats	
Biotite		Biotite	Labo.
Muscovite		Muscovite	
Chlorite		Chlorite	
Vermiculite		Vermiculite	
Apatite		Apatite	
Kaolinite		Kaolinite	
Calcite		Calcite	
Quartz		Quartz	
Total		Total	

Const. Rég. = Constante regionale

Env. Can. = Mesuré par Environnement Canada

Labo. = Mesuree en laboratoire

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les résultats de la simulation sont présentés sur sept tables de données. Les tables de données quatre et cinq exposent la composition chimique de la solution du sol par horizon. La 4^{ème} table de donnée fait la synthèse de la solution du sol, incluant les dépôts atmosphériques (c'est-à-dire pH, ANC, BC, Al, Si, NO₃ et NH₄). La 5^{ème} table de donnée expose les valeurs de cations et d'anions de façon individuelle (c'est-à-dire Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Al-organique et Al-inorganique). La 6^{ème} table de donnée aborde la qualité ainsi que la quantité des éléments prélevés par la végétation (N, BC, Al). Les quatre dernières tables de données focalisent essentiellement sur le produit d'altération. Sur la 7^{ème} table de donnée, on observe le taux de libération des différents éléments via l'altération des minéraux, alors que la 8^{ème} table de donnée présente les taux de libération pour chacun des minéraux. Enfin, la 9^{ème} table de donnée présente les taux de libération des différents éléments par horizon et la 10^{ème} table de donnée présente les taux de libération en fonction des différents processus d'altération (H⁺, H₂O, CO₂, R⁻) (Sverdrup 1996).

5.2 Les variables évaluées

La distribution granulométrique, la surface spécifique et la composition minéralogique des échantillons ont été évaluées dans la première partie du mémoire. L'épaisseur des pédons a été saisie par l'intermédiaire de la base de données du réseau TADPA (2001-2002).

En ce qui concerne la minéralogie, nous avons mentionné dans le chapitre 2 qu'elle a été adaptée et détaillée pour le modèle PROFILE afin d'améliorer la qualité des résultats d'altération. Quant à la texture des échantillons, elle n'est pas une variable directement spécifiée dans le modèle. Cependant, elle permet d'estimer la surface spécifique selon l'équation texturale et elle est une donnée essentielle pour établir les variables hydrologiques (voir les sections suivantes). La surface spécifique des échantillons est essentielle à la simulation du taux d'altération, car le taux d'altération est proportionnel à la surface accessible à l'eau. L'importance de cette donnée a fait en sorte que nous avons évalué, dans la première partie du mémoire, la surface spécifique selon deux méthodes différentes: (1) une évaluation en laboratoire à l'aide de l'équation BET et (2) en utilisant l'algorithme textural

élaboré par Sverdrup (1990). Les valeurs pour l'épaisseur des horizons B des pédons sont celles correspondant à l'ensemble du profil minéral du sol, jusqu'à un maximum d'un mètre (Tableau 5.3). Ceci s'explique par le fait que nous considérons l'horizon B des pédons comme étant l'intermédiaire entre l'horizon A très altéré et l'horizon C peu ou pas altéré, car PROFILE simule le taux d'altération pour un profil de sol complet. Donc, le fait de n'utiliser seulement l'épaisseur des horizons B pour la simulation du taux d'altération par le modèle introduirait un biais.

Tableau 5.3 Épaisseur des horizons minéral [E_m] (m)

Lac	MacLeod			Josselin			Najoua			Eclair				
Site	112-1	112-2	112-3	113-1	113-2	113-3	114-1	114-2	114-3	201-1	201-2	201-3		
E_m	0,6	0,56	0,69	0,41	0,48	0,53	0,45	0,85	1	0,79	0,83	0,93		
Lac	Lemaine			Truite-Rouge		Fauvette			Adanys			Boisvert		
Site	202-1	202-2	202-3	203-2	203-3	212-1	212-2	212-3	213-1	213-2	213-3	214-1	214-2	214-3
E_m	0,87	0,2	0,98	0,7	0,8	0,74	0,48	0,78	0,73	0,67	0,79	0,97	1	0,53
Lac	Chômeur			Thomas			Daniel		Pothier			Laurent		
Site	301-1	301-2	301-3	302-1	302-2	302-3	311-1	311-2	313-1	313-2	313-3	314-1	314-2	314-3
E_m	0,84	1	0,43	0,75	0,94	0,69	0,66	0,63	0,8	0,5	0,93	1	0,41	0,93
Lac	Des Joncs			General-White			Grégoire		Des Papillons			Blais		
Site	411-1	411-2	411-3	412-1	412-2	412-3	413-1	413-2	414-1	414-2	414-3	501-1	501-3	
E_m	0,58	0,82	0,77	0,78	1	0,95	0,55	0,92	0,86	0,56	1	1	1	
Lac	David			Clair			Duck			Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006				
Site	502-1	502-2	502-3	514-1	514-2	514-3	515-1	515-2	515-3					
E_m	0,84	0,7	0,75	0,74	0,98	0,72	1	0,66	1					

Source: Environnement Canada, base de données du réseau TADPA, 2001-2002

5.3 Les variables hydroclimatiques

Certaines variables hydroclimatiques n'ont pas été évaluées sur le terrain. Pour la plupart, ces variables exigent une récolte des données précises et ponctuelles (par exemple, la température du sol et le contenu en eau) ou épisodique (par exemple la percolation de l'eau dans les horizons du sol). Les modèles hydroclimatiques simplifient beaucoup l'estimation de ces données, particulièrement lorsqu'une étude est entreprise sur un grand territoire et comprend plusieurs sites d'étude. Ces dernières données jumelées à celles déjà en notre possession sur

la description des bassins versants ont permis d'estimer les variables hydrologiques à partir du modèle ForHYM (Arp et Yin 1992), alors que le modèle complémentaire ForSTEM (Yin et Arp 1993) a généré la variable de température du sol.

Le modèle BioSIM (*biological simulator*) est un modèle mathématique créé afin de générer des prévisions météorologiques ou des événements saisonniers déprédateurs (par exemple insectes ravageurs) d'un écosystème. Les températures de l'air et les précipitations sont interpolées à partir du réseau des stations météorologiques d'Environnement Canada et sont ajustées selon l'altitude des sites et leur localisation. Le modèle permet une simulation historique du climat sur des sites géographiques spécifiques et requiert peu d'intrants, c'est-à-dire la localisation géographique du site, son altitude ainsi que les données météorologiques au choix: mensuelles, quotidiennes ou sous la forme de zones climatiques (Régnière et St-Amant 2004). Les résultats de BioSIM peuvent être présentés sous des formats graphiques, cartographiques ou simplement dans un chiffrier. Dans cette étude, le modèle a été utilisé afin d'établir une moyenne des précipitations annuelles sur trente ans pour chaque bassin versant.

Le modèle ForHYM (*forest hydrological model*) est un simulateur des processus majeurs de circulation de l'eau dans l'écosystème forestier à partir de données climatiques mensuelles et de la description biophysique du site à l'étude. Le modèle simule les processus hydrologiques: la précipitation est interceptée par la canopée, s'écoule le long du tronc et parvient finalement au sol. Le modèle tient compte de la précipitation sous forme de neige et sa fonte ou son évaporation. La percolation de l'eau dans les différents horizons, la saturation en eau du sol, la décharge au cours d'eau et les pertes par évapotranspiration ou ruissellement de surface sont également simulées. Les données requises pour opérer ForHYM sont (1) la température moyenne de l'air, (2) le volume des précipitations mensuelles totales incluant sa fraction neigeuse, (3) la localisation latitudinale, (4) la surface spécifique végétative de la forêt exprimée selon la surface foliaire et la surface des troncs et (5) la capacité effective de réserve en eau selon la capacité du terrain et le point de flétrissement permanent de tous les horizons du sol (Arp et Yin 1992). Lorsque les informations pour la surface spécifique végétative et la capacité de réserve en eau ne sont pas disponibles, le modèle utilise d'autres

indices qui exigent des données supplémentaires quant aux proportions de conifères et de feuillus dans la forêt ainsi que l'épaisseur des horizons du sol et la texture de ces derniers. Dans cette étude, le modèle ForHYM a été utilisé pour générer les variables hydrologiques telles le contenu en eau des sols et la percolation de l'eau entre les horizons des pédons à partir d'une moyenne sur 5 ans. Les résultats de BioSIM ont servi d'intrants climatiques au modèle. Les données biophysiques des sites ont été fournies par Environnement Canada (Base de données du réseau TADPA-Québec, 2001-2002). Le modèle a été calibré et testé sur deux bassins versants; le lac Turkey, Ontario, et le lac Laflamme, Québec. Les vérifications ont été faites entre les résultats simulés et ceux mesurés sur le terrain sur les variables de couvert de neige (mm en eau), de contenu en eau de l'horizon B (mm/mm) et de contenu en eau de l'horizon C (mm/mm). Les résultats de vérification ont donné des coefficients de corrélation respectivement de 0,9 pour le couvert de neige, de 0,874 pour le contenu en eau de l'horizon B et de 0,872 pour le contenu en eau de l'horizon C (Arp et Yin 1992).

Pour sa part, le modèle ForSTEM (*forest temperature model*) traite uniquement des changements de température ou de transfert de chaleur à travers les différents compartiments du sol forestier. Les compartiments incluent le couvert nival, l'humus, le sol minéral superficiel et le sol minéral sous la zone racinaire. Le modèle considère également les transferts de chaleur latente causés par les alternances gel/dégel et les changements de propriétés thermiques du sol causées par les variations du contenu en eau ainsi que les effets des alternances gel/dégel. La température du sol est générée sur une base mensuelle, mais le modèle peut offrir aussi une résolution plus fine (hebdomadaire ou quotidienne). La base de données requise pour opérer le modèle est limitée à la latitude, l'altitude, le degré de la pente, l'exposition de la pente, la texture du sol, l'épaisseur de chaque horizon, la région climatique forestière, la température de l'air et le contenu en eau de chaque horizon incluant les accumulations de neige pendant la période hivernale (Yin et Arp 1993). Le pas de temps utilisé pour ForSTEM est également une moyenne sur 5 ans. Les données requises ont été générées par BioSIM et/ou ForHYM dans les simulations précédentes, les informations manquantes ont été comblées à partir de la base de données d'Environnement Canada, réseau TADPA-Québec (2001-2002) et des résultats de texture de la section précédente. Le modèle a été testé sur 10 sites en Ontario, au Québec, au Nouveau-Brunswick et au Colorado.

L'erreur de prédiction du modèle se situe à $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ dans au moins les trois quarts des sites. Celles-ci sont surtout survenues lorsque les mesures de température ne révélèrent aucune diminution en descendant dans le profil du sol ou dans les sols contenant de larges espaces d'air entre de gros fragments de roches (Yin et Arp 1993).

5.3.1 Résultats de la modélisation des conditions hydroclimatiques

Les précipitations varient entre 0,96 m et 1,6 m. Un gradient de l'ouest vers l'est est perceptible avec les valeurs les plus importantes dans la SR1. Les moyennes annuelles de température du sol varient entre $1,98^{\circ}\text{C}$ et $6,24^{\circ}\text{C}$. Les résultats sont assez homogènes pour les SR3, SR4 et SR5. Par contre, les résultats pour les SR1 et SR2 sont plus variables et les variations semblent liées à l'altitude et à l'orientation géographique des bassins versants. Le contenu en eau de chaque pédon est corrélé à son épaisseur. Les résultats varient entre $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ et $0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Les flux hydrologiques sont partagés entre l'horizon supérieur (LFH) et le sol minéral. Entre 17,7 % et 37,2 % des eaux de percolation circulent dans le LFH et entre 7,8 % et 29,7 % dans le sol minéral (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 Résultats des simulations BioSIM, ForHYM et ForSTEM pour les variables hydroclimatiques et de température du sol

Lac	MacLeod-112	Josselin-113	Najoua-114	Éclair-201	Lemaine-202	Truite-Rouge-203
BioSIM						
Précipitation (m an ⁻¹)	1,43	1,60	1,33	1,07	1,36	1,30
ForHYM						
Contenu en eau Site 1	0,29	0,24	0,34	0,23	0,13	0,24
du sol par Site 2	0,31	0,21	0,18	0,22	0,57	0,21
pédon (m ³ m ⁻³) Site 3	0,25	0,19	0,15	0,19	0,12	–
Intrant LFH	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Extrant LFH	67,75	72,18	81,97	73,95	71,86	78,95
Intrant sol minéral	67,75	72,18	81,97	73,95	71,86	78,95
Extrant sol minéral	49,18	64,42	66,02	54,66	61,89	63,09
ForSTEM						
Température du sol (°C)	2,65	4,19	5,03	1,98	4,59	5,58
Lac	Fauvette-212	Adanys-213	Boisvert-214	Chômeur-301	Thomas-302	Daniel-311
BioSIM						
Précipitation (m an ⁻¹)	1,06	0,96	0,96	1,13	1,17	1,20
ForHYM						
Contenu en eau Site 1	0,24	0,21	0,21	0,26	0,27	0,31
du sol par Site 2	0,38	0,23	0,23	0,22	0,22	0,33
pédon (m ³ m ⁻³) Site 3	0,23	0,20	0,20	0,51	0,30	–
Intrant LFH	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Extrant LFH	67,93	75,78	75,78	75,81	82,28	80,76
Intrant sol minéral	67,93	75,78	75,78	75,81	82,28	80,76
Extrant sol minéral	47,72	57,46	57,46	51,88	61,89	58,25
ForSTEM						
Température du sol (°C)	4,26	2,68	2,68	3,65	2,58	3,31
Lac	Pothier-313	Laurent-314	Des Jongs-411	General-White-412	Grégoire-413	Des Papillons-414
BioSIM						
Précipitation (m an ⁻¹)	1,19	1,12	1,12	1,06	1,06	1,07
ForHYM						
Contenu en eau Site 1	0,27	0,17	0,26	0,24	0,18	0,14
du sol par Site 2	0,42	0,42	0,18	0,19	0,11	0,21
pédon (m ³ m ⁻³) Site 3	0,23	0,18	0,20	0,20	–	0,12
Intrant LFH	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Extrant LFH	81,06	74,17	69,71	71,78	62,79	67,35
Intrant sol minéral	81,06	74,17	69,71	71,78	62,79	67,35
Extrant sol minéral	55,25	56,02	53,65	54,24	52,83	55,57
ForSTEM						
Température du sol (°C)	3,47	3,80	4,71	4,66	5,18	4,51
Lac	Blais-501	David-502	Clair-514	Duck-515	Réalisé par Patrick Lamoureux et Jean-François Dupuis, UQAM, 2006	
BioSIM						
Précipitation (m an ⁻¹)	1,07	0,99	0,99	1,22		
ForHYM						
Contenu en eau Site 1	0,15	0,19	0,23	0,30		
du sol par Site 2	0,15	0,22	0,17	0,45		
pédon (m ³ m ⁻³) Site 3		0,21	0,23	0,30		
Intrant LFH	100,00	100,00	100,00	100,00		
Extrant LFH	69,78	63,91	69,62	80,93		
Intrant sol minéral	69,78	63,91	69,62	80,93		
Extrant sol minéral	52,83	45,97	49,63	51,28		
ForSTEM						
Température du sol (°C)	5,62	5,60	4,82	6,24		

5.4 Les variables constantes à l'ensemble des bassins versants

À l'exception des données concernant l'épaisseur des horizons, plusieurs paramètres du modèle n'ont pas été évalués sur le terrain. Dans tous les pédons, l'épaisseur de l'horizon supérieur ou de surface (LFH) a été fixée à 10 cm. Pour les intrants décrivant la dynamique végétative et le recyclage des éléments nutritifs (table de donnée 2), les personnes-ressources d'Environnement Canada nous ont assuré que les seules perturbations que ces écosystèmes forestiers matures aient connues ont été les effets des dépôts atmosphériques. Nous avons donc présumé que ceux-ci étaient tous en état d'équilibre climacique, c'est-à-dire que l'apport en éléments nutritifs dans le système est égal à la perte et qu'il n'y a pas de redistribution de ceux-ci dans le profil du sol.

Pour ce qui est des autres paramètres non mentionnés jusqu'à présent, c'est-à-dire le ruissellement, les dépôts atmosphériques, la nitrification, le contenu en eau, la densité de l'humus, la pression partielle en CO₂, le prélèvement des nutriments par la végétation, le carbone organique dissous et la première constante de dissociation (pK) de la gibbsite, nous avons emprunté les valeurs utilisées par Bélanger et al. (2002a et 2002b) pour une simulation dynamique de la chimie des sols et des eaux de surface dans le bassin versant expérimental de l'Hermine dans les Basses-Laurentides à 80 km au nord de Montréal. Ce bassin versant est situé au centre sud de la région à l'étude. Les données empruntées pour les fins de cette recherche nous apparaissent plus conformes à la réalité nord-est américaine que les données standardisées des concepteurs du modèle (Tableau 5.5).

Tableau 5.5 Données constantes utilisées pour les simulations
(tirés de Bélanger et al. 2002a, b)

	Ruissellement (m an^{-1})	0,5
	Taux de Nitrification	Low
Dépôts atmosphérique	Dépôts sec et humide d'Anions ($\text{kmolc ha}^{-1} \text{an}^{-1}$)	
	SO ₄	0,619
	Cl	0,074
	NO ₃	0,436
	Dépôts sec et humide des Cations ($\text{kmolc ha}^{-1} \text{an}^{-1}$)	
	NH ₄	0,238
	Ca	0,13
	Mg	0,025
	K	0,008
	Na	0,053
Horizon de surface	Contenu en eau du sol ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,5
	Densité di sol (kg m^{-3})	0,0001
	Surface spécifique ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$)	0,0001
	pression CO ₂ ($\times \text{atm}$)	5
	Prélèvement des cations (% du max.)	30
	Prélèvement de N (% du max.)	60
	Carbone organique dissous (DOC) (mg l^{-1})	25
Sol minéral	pK Gibbsite	5,5
	pression CO ₂ ($\times \text{atm}$)	25
	Prélèvement des cations (% du max.)	70
	Prélèvement de N (% du max.)	40
	Carbone organique dissous (DOC) (mg l^{-1})	3
	pK Gibbsite	8,5

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

5.5 Test de sensibilité du modèle PROFILE

L'objectif du test de sensibilité est avant tout d'évaluer la sensibilité des résultats générés. La simulation des processus géochimiques implique une multitude de données et certaines variables ont plus d'influence que d'autres sur le taux d'altération. Les variables permanentes introduites dans cette simulation sont basées sur une étude similaire de Bélanger et al. (2002) au sud de la région à l'étude et concernent essentiellement les variables de COD, de pression partielle en CO₂, du pK de la gibbsite et de nitrification. D'après Jönsson et al. (1995), ce groupe de variables est le deuxième en importance susceptible d'influencer les résultats de simulation et également elles sont très difficiles à évaluer, avec une marge d'erreur de $\pm 80\%$.

Les trois premières variables auraient pu être substituées à des données fournies par les concepteurs du modèle basées sur l'épaisseur des pédons (Becker 1999). Ainsi, selon l'épaisseur des pédons sélectionnés, nous avons modifié les données de COD et de pression partielle en CO_2 . Pour le pK de la gibbsite, nous avons testé la sensibilité du modèle selon les valeurs les plus fortes et les plus faibles suggérés par Becker (1999). Quant à la nitrification, nous avons simulé deux scénarios. Les simulations originales ont été faites selon une nitrification faible. Le premier scénario consiste à simuler un taux d'altération sans aucune nitrification et le deuxième selon une nitrification élevée. Un test a également été effectué sur la minéralogie afin de comparer l'influence sur la simulation de la minéralogie semi-quantitative à celle obtenue par déductions stœchiométriques (c'est-à-dire UPPSALA). Selon Jönsson et al. (1995), la sensibilité du modèle à la minéralogie est surtout concentrée sur les minéraux ferromagnésiens (pyroxènes, épidotes, etc), lesquels sont plus difficiles à différencier. Enfin, la sensibilité de PROFILE aux différentes mesures de surfaces spécifiques sera abordées dans le chapitre sur les résultats des taux d'altération.

Cinq sites ont été sélectionnés pour le test de sensibilité, basé sur trois critères permettant une représentation fidèle de l'ensemble de la région et des sous-régions ainsi qu'une diversité entre les sites sélectionnés. Ces critères sont: (1) les résultats d'altération des BC+Na représentatifs de chacune des sous-régions (2) une minéralogie diversifiée qui inclus les minéraux les moins présents ainsi qu'une variabilité dans les proportions des minéraux les plus abondants et (3) des différences dans l'épaisseur des pédons qui permettent de substituer certaines données à celles proposées par Becker (1999) (Tableau 5.6). Nous avons lancé des simulations pour chacun des cinq sites sélectionnés, en faisant varier chaque fois une variable de leur base de données respective.

Tableau 5.6 Base de données des sites sélectionnés pour le test de sensibilité

	112-2	203-2	313-2	412-1	502-3
Taux d'altération des BC+Na ($\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	0,86	1,74	1,96	1,71	3,47
Variables du sol minéral					
Épaisseur (m)	0,56	0,7	0,5	0,78	0,75
Température du sol ($^{\circ}\text{C}$)	2,65	5,58	3,47	4,66	5,6
Contenu en eau ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,31	0,24	0,42	0,24	0,21
Densité (kg m^{-3})	1040,3	919,9	1087,2	1057,4	963,8
Surface spécifique (texture) ($\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$)	$0,721 \times 10^6$	$1,059 \times 10^6$	$1,236 \times 10^6$	$1,234 \times 10^6$	$1,405 \times 10^6$
Pression CO_2 (x atm)	25	25	25	25	25
Précipitation entrant l'horizon (%)	67,75	78,95	81,06	71,78	63,91
Précipitation sortant de l'horizon (%)	49,18	63,09	55,25	54,24	45,97
Prélèvement des cations (% of max)	70	70	70	70	70
Prélèvement de l'azote (% of max)	40	40	40	40	40
COD (mg l^{-1})	3	3	3	3	3
pK gibbsite	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Minéralogie (%)					
Feldspath-potassique	22,24	15,09	14,71	18,49	12,72
Anorthite	9,41	5,99	13,86	9,5	6,3
Albite	21,45	4,58	25,78	17,71	4,07
Amphiboles	9,76	16,44	15,56	11,63	18,77
Pyroxenes	1,59	1,64	2,42	1,65	1,87
Epidotes	0	0	0	0	0
Grenats	1,63	0	1,55	0	0
Biotite	0	1,22	0	4,16	1,07
Muscovite	6,14	4,4	1,95	0	1,81
Chlorite	0	0	0,83	1,67	1,41
Vermiculite	0,1	0,72	0,87	2,38	1,62
Apatite	0,94	0,4	0,97	0,91	0,4
Kaolinite	0,1	0,15	0	0,7	0,32
Calcite	0	0,79	0	0	2,45
Quartz	26,66	48,58	21,5	31,19	47,19
Total	100	100	100	100	100

L'impact des variations paramétriques sur les résultats des BC+Na est difficile à synthétiser. On peut diviser en trois catégories les résultats d'altération du test de sensibilité selon des variations faible, moyenne ou forte (Tableau 5.7). Lorsque les valeurs de COD (5) et de nitrification (élevé) sont augmentées par rapport aux données d'origine, les résultats de simulation augmentent très peu ou pas du tout (moins de 1 %). Par contre, une diminution du COD (0,5) et un arrêt complet de la nitrification (aucune) génèrent pour certains pédon une diminution des résultats d'environ 2,5 %.

Les variables qui affectent modérément les résultats du modèle sont la pression partielle en CO₂ et le pK de la gibbsite. La pression en CO₂ lorsqu'elle est diminuée de 5 atmosphères réduit les résultats de référence d'environ 3 %, alors que les résultats augmentent d'un peu moins de 3 % lorsqu'on l'augmente de 5 atmosphères. Il faut remarquer que le lac David paraît plus sensible à cette augmentation. Ceci pourrait s'expliquer par ses proportions élevées en calcite. Une variation du pK de la gibbsite de plus ou moins une unité fait varier les résultats de référence surtout pour les lacs situés à l'est de l'aire d'étude. Les lacs Pothier, General White et David sont très peu ou pas affectés par un changement du pK de la gibbsite (<1 %). Par contre, les résultats de sensibilité des lacs MacLeod et Truite-Rouge varient de ±15 % à une diminution ou une augmentation du pK de la gibbsite.

En ce qui concerne les changements occasionnés par la minéralogie, les résultats de simulation d'altération en employant les valeurs déduites seulement par stoechiométrie (UPPSALA) sont en moyenne 10 % plus faibles que la simulation utilisant les valeurs semi-quantitatives. Les différences dans les résultats d'altération varient entre 3 % et 18 %. Elles sont principalement dues aux ajustements qui ont été faits pour chaque pédon lors de la reconstitution minéralogique dans la première partie du mémoire. Par exemple, les sols du lac David et Truite-Rouge possèdent des concentrations élevées de calcite, déjà présentes dans la reconstitution minéralogique par stoechiométrie. Ainsi, la proportion de calcite n'a pas changé et contribue considérablement au taux d'altération des BC+Na. En revanche, les grenats et la biotite ne sont pas considérés dans la minéralogie établie par UPPSALA l'absence de ces derniers dans la minéralogie reconstituée par stoechiométrie peut avoir

contribué à sous-estimer le taux d'altération des échantillons concernés, car se sont des minéraux dont la vitesse d'altération est respectivement assez rapide et intermédiaire (Goldich 1938; Wilson 1986).

Tableau 5.7 Test de sensibilité de certaines variables ayant des effets sur le taux d'altération des BC+Na ($\text{kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

	MacLeod	Truite-Rouge	Pothier	General White	David
	112-2	203-2	313-2	412-1	502-3
Résultats de Base	0,87	1,05	1,96	1,70	3,47
COD à 5	0,87	-	1,98	-	-
COD à 0,5	-	1,02	-	1,65	3,39
Pression CO ₂ à 20 atm	0,85	-	1,89	-	-
Pression CO ₂ à 30 atm	-	1,07	-	1,75	3,74
pK gibbsite à 7,5	1,01	1,11	1,96	1,70	3,47
pK gibbsite à 9,5	0,74	0,91	1,95	1,70	3,47
Nitrification à None	0,87	0,98	1,92	1,66	3,46
Nitrification à High	0,86	1,06	1,96	1,71	3,47
Minéralogie UPPSALA	0,71	0,92	1,89	1,58	3,35

Réalisation: Patrick Lamoureux. UQAM 2006

CHAPITRE VI

RÉSULTATS DES TAUX D'ALTÉRATION ET DISCUSSION

Un des sous-objectifs de l'étude était de comparer les résultats du modèle en utilisant deux différentes façons d'évaluer la surface spécifique, c'est-à-dire la surface spécifique estimée à partir de l'algorithme textural et celle obtenue selon la méthode BET. Premièrement, nous exposerons les résultats des taux d'altération chimique obtenus à l'aide de l'algorithme textural pour l'ensemble de la région et ceux obtenus en fonction des diverses surfaces spécifiques mesurées selon la méthode BET. Deuxièmement, nous discuterons des taux d'altération au point de vue des différences dans les résultats et de la distribution spatiale de ceux-ci. Des liens seront aussi établis avec la minéralogie. Quoique nous avons fait les calculs PROFILE pour chacun des 62 pédons à l'étude, nous utiliserons les valeurs moyennes pour chaque bassin versant pour l'analyse des résultats (N.B. les résultats par pédons sont présentés à l'annexe 2 du mémoire). Troisièmement, nous allons comparer les résultats obtenus dans cette études avec ceux d'autres auteurs qui ont utilisé PROFILE ou d'autres méthodes d'évaluation du taux d'altération.

6.1 Taux d'altération annuels de BC+Na selon la surface spécifique estimée par l'algorithme textural

Le taux d'altération moyen des cations basiques (BC+Na) simulé par PROFILE avec une surface spécifique estimée selon l'algorithme textural pour l'ensemble des 22 bassins versants est de $1,96 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le taux le plus faible est $0,87 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (113) et le plus élevé est $5,5 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (515) (Tableau 6.1). Le lac Duck (515) et le lac Clair (514) sont les seuls bassins à avoir un taux supérieur à $4 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le Ca est le cation dominant pour 95 % des bassins versants. Le Mg et le Na sont les cations de seconde importance pour 50 % et 45 % des bassins, respectivement. Enfin, dans près de 70 % des bassins versants, le K est le cation basique le moins libéré par l'altération.

Des tendances régionales se dessinent. Au nord-est, la SR1 présente un taux d'altération moyen des BC+Na de $1,01 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le taux le plus élevé de cette sous-région est $1,18 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (114) et le taux le plus faible est $0,87 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (113), ce dernier est le plus faible de l'ensemble des bassins versants. La SR5, au sud-ouest, affiche les taux d'altération les plus élevés de toute l'aire d'étude, soit une valeur moyenne de $4 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Les taux d'altération des bassins versants de cette sous-région sont tous supérieurs à $3 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. La valeur la plus élevée est de $5,5 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (515) et la plus faible de $3,06 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (502). Contrairement aux autres sous-régions, le Na est ici le cation le moins important de la composante d'altération dans la SR5. Nous observons aussi cette tendance pour les bassins versants Truite-Rouge (203), Grégoire (413) et des Papillons (414).

Tableau 6.1 Moyenne par bassin versant du taux d'altération des sols simulé par PROFILE selon la surface spécifique établie avec l'algorithme textural ($\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

Lacs/ Sous-régions	BC+Na	Ca	Mg	K	Na	
MacLeod	112	0,98	0,39	0,24	0,11	0,24
Josselin	113	0,87	0,30	0,24	0,10	0,24
Najoua	114	1,18	0,39	0,26	0,15	0,38
Éclair	201	1,64	0,57	0,35	0,16	0,55
Lemaine	202	1,12	0,40	0,28	0,12	0,33
Truite-Rouge	203	1,39	0,74	0,44	0,12	0,09
Fauvette	212	2,33	0,84	0,63	0,20	0,66
Adansys	213	1,11	0,36	0,25	0,13	0,36
Boisvert	214	1,20	0,40	0,34	0,13	0,33
Chômeur	301	1,43	0,49	0,28	0,17	0,49
Thomas	302	1,03	0,38	0,26	0,11	0,29
Daniel	311	1,50	0,49	0,30	0,19	0,52
Pothier	313	2,10	0,77	0,48	0,19	0,66
Laurent	314	1,50	0,52	0,37	0,18	0,43
Des Joncs	411	1,85	0,81	0,36	0,16	0,51
Général White	412	2,07	0,96	0,47	0,19	0,45
Grégoire	413	3,53	2,64	0,67	0,12	0,10
Des Papillons	414	1,84	1,27	0,39	0,10	0,08
Blais	501	3,27	2,36	0,64	0,15	0,11
David	502	3,06	2,31	0,53	0,12	0,10
Clair	514	4,16	3,23	0,66	0,16	0,12
Duck	515	5,50	3,66	1,26	0,34	0,25

Realisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les taux d'altération des SR2 et SR3 sont très similaires, soit des taux d'altération moyens respectifs de $1,46 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et de $1,51 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ici, même si le Ca est le principal élément libéré, le Na se rapproche beaucoup du Ca avec une moyenne pour les deux sous-régions de $0,54 \text{ kmol}_c \text{ Ca ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et de $0,43 \text{ kmol}_c \text{ Na ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Les quantités de BC+Na libérées par altération sont d'environ 30 % plus élevées dans les SR2 et SR3 par rapport à la SR1. Quant à la SR4, les taux sont dans l'ensemble légèrement plus élevés que dans les SR2 et SR3, mais les quantités d'éléments libérés sont bien inférieures à celles dans la SR5: le taux d'altération moyen de BC+Na pour la SR4 est de $2,32 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le Mg et le Na sont soit deuxième ou troisième en importance.

On observe donc un gradient d'altération du sud-ouest vers le nord-est à l'intérieur de la région à l'étude, avec plus de cations libérés dans la SR5 et une diminution vers la SR1. Une analyse de la proportion de chaque cation à l'ensemble suggère la même tendance régionale. Ainsi, le gradient sud-ouest nord-est est perceptible lorsqu'on analyse les taux de Ca par sous-région. Dans la SR5, le Ca représente environ 72 % de tous les cations basiques libérés, tandis que ce chiffre diminue à 61 % pour la SR4, à 35 % pour la SR3, à 37 % pour la SR2 et à 36 % pour la SR1. Toutefois, la tendance est inversée quant aux autres cations basiques: la différence est particulièrement grande pour le Na avec une variation d'environ 28 % entre la SR1 et la SR5.

6.2 Taux d'altération annuels de BC+Na selon la surface spécifique mesurée avec la méthode BET sans extraction des oxyhydroxides

Les taux d'altération simulés à partir de la surface spécifique mesurée selon l'approche BET sont en moyenne deux fois supérieurs aux résultats obtenus en utilisant l'algorithme textural. Dans 95 % des cas, les quantités des cations libérés sont de 1,3 à 3,4 fois plus importantes que celles simulées avec la surface spécifique estimée avec l'algorithme textural. Avec la méthode BET, l'écart entre les valeurs les plus faibles et les plus élevées est très important, variant entre $0,47 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (113) et $12,8 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (514) (Tableau 6.2). La moyenne pour l'ensemble de la région est de $4,20 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le Ca demeure le cation dominant dans 77 % des bassins versants, suivi du Mg, du Na et finalement du K. On observe le même gradient sud-ouest nord-est que pour la simulation précédente et approximativement les mêmes ordres de cation libérés qu'avec l'algorithme textural. Le coefficient de corrélation (r) entre les taux d'altération simulés (Ca+Mg+K+Na) avec la méthode BET sans l'extraction des oxyhydroxides et ceux avec l'algorithme textural est de 0,91 ($P < 0,001$).

Les taux d'altération sont corrélés positivement à la surface spécifique. Il est bien connu que le taux d'altération simulé avec PROFILE est proportionnel à la surface spécifique du sol minéral (Hodson et al. 1998a). Ainsi, dans notre étude, les surfaces spécifiques plus élevées avec la méthode BET (avec présence d'oxyhydroxides) ont généré des taux d'altération plus

Tableau 6.2 Moyenne par bassin versant du taux d'altération des sols simulé par PROFILE selon la surface spécifique établie avec l'équation BET sans extraction des oxyhydroxides ($\text{kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

Lacs/ Sous-régions		BC+Na	Ca	Mg	K	Na
MacLeod	112	1,17	0,44	0,26	0,15	0,32
Josselin	113	0,47	0,17	0,14	0,05	0,11
Najoua	114	1,54	0,50	0,32	0,20	0,52
Éclair	201	3,59	1,25	0,72	0,36	1,26
Lemaine	202	1,70	0,59	0,37	0,20	0,56
Truite-Rouge	203	2,49	1,35	0,73	0,23	0,18
Fauvette	212	3,90	1,38	1,01	0,36	1,16
Adanys	213	2,16	0,67	0,43	0,26	0,80
Boisvert	214	2,88	0,91	0,75	0,34	0,88
Chômeur	301	3,45	1,14	0,56	0,45	1,30
Thomas	302	2,99	1,04	0,61	0,34	1,00
Daniel	311	3,93	1,27	0,73	0,50	1,44
Pothier	313	5,56	2,02	1,18	0,53	1,83
Laurent	314	2,54	0,86	0,59	0,32	0,77
Des Jones	411	4,26	1,92	0,78	0,37	1,20
Général White	412	3,78	1,71	0,86	0,36	0,85
Grégoire	413	5,33	3,88	1,06	0,22	0,17
Des Papillons	414	4,96	3,60	0,93	0,24	0,19
Blais	501	5,13	3,72	0,98	0,25	0,18
David	502	6,38	4,88	1,04	0,26	0,21
Clair	514	12,7	9,99	1,86	0,52	0,38
Duck	515	11,4	7,47	2,61	0,79	0,56

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

importants. Selon Hodson et al. (1998b), les oxyhydroxides amorphes ont tendance à exagérer les valeurs de surface spécifique parce qu'ils sont caractérisés par des surfaces rugueuses et poreuses. Toutefois, la présence des oxyhydroxides dans les fractions fines peut favoriser la formation d'agrégats et par conséquent, abaisser la valeur de la surface spécifique (Hodson et al. 1998a). Nous présumons que cette exception s'applique pour le lac Josselin (113) compte tenu de sa valeur de surface spécifique et de taux d'altération plus faible que celui généré par l'algorithme textural.

6.3 Taux d'altération annuels de BC+Na selon la surface spécifique estimée avec la méthode BET suite à l'extraction des oxyhydroxides

La surface spécifique est déterminante dans l'évaluation du taux d'altération d'un sol et les résultats élevés obtenus sur les échantillons avec la méthode BET sans extraction des oxyhydroxides nous ont incité à procéder à l'extraction des oxyhydroxides afin de vérifier si les valeurs de surface spécifique étaient réellement élevées et/ou biaisées par la présence de ces derniers. Afin de vérifier s'il y avait une réelle différence entre les résultats, nous avons choisi les échantillons qui présentaient les surfaces spécifiques les plus élevées avec la méthode BET pour au moins chacune des sous-régions, à l'exception de la SR4 comme il a été mentionné dans le chapitre II. Les taux d'altération simulés pour ces six sols se

Tableau 6.3 Taux d'altération simulés par PROFILE avec une surface spécifique établie selon l'équation BET avec extraction des oxyhydroxides pour six échantillons ($\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

Lacs et sols		BC+Na	Ca	Mg	K	Na
Najoua	114-3	0,88	0,29	0,21	0,11	0,27
Éclair	201-1	1,72	0,61	0,38	0,17	0,56
Boisvert	214-3	1,09	0,38	0,31	0,11	0,29
Chômeur	301-3	1,96	0,65	0,30	0,26	0,74
David	502-3	4,39	3,44	0,69	0,16	0,12
Clair	514-3	2,89	2,06	0,57	0,14	0,12

Réalisation Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

rapprochent davantage de ceux simulés avec les surfaces spécifiques estimées par l'algorithme textural. Le taux d'altération moyen des six échantillons est de $2,16 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Les taux varient entre $0,88 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et $4,39 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Le Ca demeure le cation dominant de la composante d'altération à 83 %. La tendance régionale sud-ouest nord-est est toujours perceptible et le coefficient de corrélation entre les taux d'altération de ces six échantillons et ceux générés avec les surfaces spécifiques estimées avec l'algorithme est de 0,904 ($P=0,100$).

6.4 Discussion

6.4.1 Comparaison des résultats d'altération selon les différentes surfaces spécifiques

Une comparaison des taux d'altération de BC+Na obtenus à partir des surfaces spécifiques estimées selon différentes méthodologies démontre clairement l'importance singulière de cet intrant dans PROFILE. Comme le mentionnent Hodson et al. (1998a), les revêtements d'oxyhydroxides sur les minéraux ont tendance à exagérer l'évaluation de la surface spécifique parce qu'ils sont caractérisés par des surfaces rugueuses et poreuses et/ou parce qu'ils forment des revêtements à la surface des minéraux. Également, Hodson (2002) estime que ces revêtements d'oxyhydroxides ne constituent pas une surface imperméable isolant les minéraux des solutions dans le sol, car ils ne couvrent pas totalement la surface des minéraux et, comme il l'a été mentionné précédemment, ils sont très poreux. Enfin, parfois, dans les fractions fines, les oxyhydroxides favorisent la formation d'agrégats qui réduiront la valeur de la surface spécifique (Hodson et al. 1998a). Ainsi, l'analyse BET sur des échantillons sans élimination des oxyhydroxides amorphes est à déconseiller pour le modèle PROFILE, car il y a la plupart du temps surestimation des surfaces altérables, ce qui

influence l'ensemble des résultats de simulation. L'influence des oxyhydroxides amorphes sur les valeurs mesurées de surfaces spécifiques et sur la réactivité des minéraux gagnerait à être élucidée, ce qui dépasse le cadre de ce mémoire.

Cependant, les taux d'altération obtenus en utilisant les surfaces spécifiques estimées avec l'algorithme textural sont sensiblement les mêmes que ceux obtenus avec les surfaces spécifiques mesurées avec la méthode BET après extraction des oxyhydroxides. La très forte corrélation ($r = 0,904$) entre les résultats nous permet d'affirmer que les coefficients de texture de l'algorithme texturale donnent une bonne estimation de la surface spécifique, même s'ils ne tiennent pas compte de la composition minéralogique des échantillons ce dont doutait Hodson (2002). Toutefois, la méthode BET demeure une mesure de surface spécifique plus précise tout de même, à la condition d'extraire les oxyhydroxydes, car elle tient compte de ces deux éléments essentiels dans la mesure de la surface: la composition minéralogique et la granulométrie. De plus, Courchesne et al. (1996) ont démontré en laboratoire que l'extraction des oxyhydroxides sur les minéraux d'horizons podzoliques du Québec avait peu d'influence sur les taux d'altération du Mg et du K. La méthode d'extraction de ces oxyhydroxides, qui utilise une solution acide (pH 3), ne semble pas affecter la surface des minéraux et ainsi elle ne crée pas de nouvelles surfaces sur ces derniers.

6.4.2 Gradient sud-ouest nord-est

La tendance sud-ouest nord-est observée dans les taux d'altération pourrait s'expliquer en partie par la situation géographique des bassins versants et également par certaines variables physiques des échantillons de sol. Ces différences semblent avoir des effets promoteurs ou antagonistes sur le taux d'altération des sols. C'est pourquoi, une analyse statistique multivariée a été faite afin d'observer si certaines caractéristiques physiques des bassins versants avaient une corrélation avec les taux d'altération obtenus dans cette étude (Tableau 6.4). Tout d'abord, on peut observer une bonne corrélation entre les taux d'altération et la situation géographique des bassins versants. Les coefficients de corrélation de -0,68 pour la

Tableau 6.4 Résultat de coefficient de corrélation (r) de l'analyse multivariée entre les taux d'altération des 22 bassins versants et certaines données physique

Caractéristiques des bassins versants	BC+Na		Caractéristiques des bassins versants		
	r	P		r	P
Latitude	-0,68	< 0,001	Argile	0,56	0,007
Longitude	-0,73	< 0,001	Limon	0,48	0,025
Élévation	-0,63	0,002	Sable	0,52	0,013
Précipitation	-0,35	0,112	Quartz	0,43	0,046
T° moyenne	0,72	< 0,001	Amphiboles	0,83	< 0,001
T° du sol	0,64	< 0,001	Albite	0,70	< 0,001
Superficie bassin	0,01	0,95	Anorthite	0,45	0,035
Superficie lac	0,17	0,441	Plagio. (Al+An)	0,67	0,001
Périmètre	0,11	0,612	Feldspath-K	0,52	0,012
			Somme (Am+Pl+F1)	0,51	0,016

Réalisé par Patrick Lamoureux. UQAM. 2006

latitude et de -0,73 pour la longitude démontrent bien qu'il existe un gradient latitudinal d'environ 2,5° (approx. 200 km) et longitudinal d'environ 6° (approx. 600 km) entre le lac le plus au sud (514) et celui le plus au nord (302). L'altitude des bassins versants semble également avoir une petite influence sur les taux d'altération ($r = -0,63$). Les lacs de la SR5 sont les moins élevés en altitude (260 m d'altitude en moyenne) et les lacs de la SR1 sont les plus élevés (670 m d'altitude en moyenne). Également, une bonne corrélation a été observée entre les taux d'altération et les températures moyennes de l'air et du sol (respectivement 0,72 et 0,64). Celle-ci démontre que les températures ont plus d'influence sur le taux d'altération que les précipitations ($r = -0,35$). En effet, la partie sud-ouest de l'aire d'étude a une moyenne de température de l'air plus élevée que le nord-est ainsi que des taux de précipitation annuelle plus faible.

Le gradient est également perceptible dans les résultats minéralogiques et granulométriques, par exemple, lorsqu'on compare la SR5 à la SR1, la première est beaucoup plus diversifiée du point de vue de la composition minéralogique et elle présente les teneurs en argiles les plus élevées. En ce qui concerne la minéralogie, l'analyse multivariée faite sur les cinq minéraux qui représentent environ 90 % de la minéralogie totale, confirme qu'il y a une bonne corrélation entre les taux d'altération et les proportions d'amphiboles ($r = 0,83$) et d'albite ($r = 0,7$). En revanche, les coefficients de corrélation pour l'anorthite et les feldspaths

potassiques ainsi que la somme des minéraux silicatés (c'est-à-dire amphiboles, albite, anorthite et feldspath-K) est peu convaincante. Il en est de même avec la texture des sols où les corrélations entre les taux d'altération et les trois classes granulométriques sont peu significatives et sensiblement semblables (Tableau 6.4).

6.4.3 Lien entre le taux d'altération et la minéralogie

Le rôle de l'altération sur les réservoirs de cations échangeables des sols est beaucoup plus lié à la vitesse de dégradation des minéraux présents qu'à la réserve totale de BC+Na dans ceux-ci. Il existe un lien entre la composition chimique d'un minéral et sa vitesse d'altération. Les minéraux carbonatés s'altèrent très rapidement comparativement aux minéraux très résistants comme le quartz et le zircon (Duchaufour 1991). Un minéral comme la calcite, tant qu'elle est présente (même en faible quantité), produira toujours plus de cations basiques qu'une anorthite (feldspath plagioclase). Cette cinétique d'altération est basée sur la série de susceptibilité des minéraux à l'altération de Goldich (1938). On y retrouve:

- (1) le groupe minéral de la calcite et de la dolomie (vitesse d'altération très rapide),
- (2) le groupe minéral des grenats, olivines, épidotes et pyroxènes (vitesse d'altération rapide),
- (3) le groupe minéral des amphiboles, la chlorite et la biotite (vitesse d'altération intermédiaire),
- (4) le groupe minéral des feldspaths plagioclases ainsi que la vermiculite (vitesse d'altération lente),
- (5) le groupe minéral des feldspaths potassiques et la muscovite (vitesse d'altération très lente) et
- (6) le groupe minéral du quartz et du zircon (vitesse d'altération très très lente) (Wilson 1986, Goldich 1938).

Les quantités de BC+Na libérés par l'altération s'expliquent ainsi par l'abondance ou la rareté de minéraux s'altérant rapidement ou modérément. Comme nous l'avons mentionné plus tôt dans la section présentant les résultats de minéralogie (sous-section 3.2.5), environ 90

% de la minéralogie de tous les échantillons est caractérisée par la présence de quartz, des feldspaths potassiques, des feldspaths plagioclases et des amphiboles. En tenant compte de la série de susceptibilité des minéraux à l'altération de Goldich (1938), on comprend mieux les différents taux d'altération générés par PROFILE, puisque les amphiboles sont les seuls parmi ces quatre minéraux à détenir une vitesse d'altération intermédiaire et des variations significatives de sa proportion dans les échantillons (entre 7 % et 20 %), en comparaison aux quatre minéraux les plus importants. Ceci est également démontré dans le Tableau 6.4 où les amphiboles ont la plus forte corrélation avec les taux d'altération par rapport aux autres minéraux. De plus, la diversité minéralogique du 10 % de la minéralogie restante (c'est-à-dire pyroxènes, grenats, biotite, muscovite, chlorite, vermiculite, apatite, kaolinite et calcite) dans les échantillons semble également avoir une responsabilité dans les différences entre les taux d'altération, mais celle-ci est plus difficile à démontrer, car ces minéraux ne sont pas présents dans tous les échantillons.

Ainsi, nous pouvons observer que la proportion de quartz n'est pas un bon indicateur du taux d'altération: les sols ayant les proportions les plus élevées de quartz ne sont pas ceux qui ont les plus faibles taux d'altération et ceux qui ont les valeurs les plus faibles de quartz ont régulièrement les taux d'altération les moins élevés. De fait, la corrélation de 0,43 entre ce dernier et les taux d'altération semble bien le démontrer (Tableau 6.4). La proportion des feldspaths potassiques varie très peu entre les pédons, mais elle influence très peu le taux d'altération ($r = 0,52$). Les feldspaths potassiques ont une vitesse d'altération très lente et cela semble avoir un effet sur les faibles variations dans le taux d'altération de K. Lorsque l'altération de K est plus élevée, il pourrait s'agir d'un apport provenant des minéraux du 10 % restant (c'est-à-dire pyroxènes, grenats, biotite, muscovite, vermiculite).

La présence des feldspaths plagioclases est très importante dans tous les échantillons, à l'exception des bassins versants de la SR5, 203, 413 et 414. Ici, c'est la concentration des amphiboles avec d'autres minéraux à vitesse d'altération rapide (pyroxènes, grenats) et intermédiaire (biotite, chlorite) qui semble générer les différences entre les taux d'altération les plus élevées et les moins élevées. Par exemple, le lac Josselin (113) possède le taux d'altération le plus faible de toute l'aire d'étude ($0,86 \text{ kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). On observe dans sa

minéralogie des proportions très faibles d'amphiboles (en moyenne 8,4 % pour les 3 pédons). En revanche, le lac Éclair (201) présente une minéralogie similaire à celle du lac Josselin, mais avec une moyenne de 12,7 % d'amphiboles pour un taux d'altération de $1,56 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ces résultats sous-tendent également que les minéraux les plus susceptibles d'influencer les taux d'altération sont les amphiboles ($r = 0,83$) et le groupe des minéraux constituant les 10 % de la minéralogie restante (c'est-à-dire pyroxènes, grenats, biotite, muscovite, chlorite, vermiculite, apatite, kaolinite et calcite) (Tableau 6.4). Ainsi, il apparaît qu'un bassin versant possédant une proportion élevée d'amphiboles en plus de contenir d'autres minéraux à vitesse d'altération rapides (pyroxènes, grenats) ou intermédiaires (biotite, chlorite) génère des taux d'altération plus élevés, ce qui est le cas des lacs General White (412), Grégoire (413) et de la SR5. Il faut tout de même spécifier que la présence en concentrations très élevées des feldspaths plagioclases semble assurer une certaine base à l'approvisionnement en cations basiques dans tous les bassins versants avec un coefficient de corrélation avec les taux d'altération de 0,67 (Tableau 6.4). Enfin, les échantillons dans lesquels la calcite est présente affichent des taux d'altération supérieurs aux autres échantillons (surtout la SR5). La calcite est le minéral qui s'altère le plus rapidement (parfois 80 fois plus rapidement que les feldspaths potassiques et la muscovite) (Wilson 1986). Elle fournit une quantité très importante de Ca, même si elle est présente en faible quantité dans les échantillons.

La géologie d'origine granito-gneissique de l'aire d'étude explique d'une certaine manière les proportions élevées des quartz, feldspaths (potassiques et plagioclases) et amphiboles dans l'ensemble des échantillons. Toutefois, ce sont les particularités géologiques de chaque sous-région qui semblent expliquer les petites différences observées dans la minéralogie et conséquemment dans les taux d'altération. Par exemple, les résultats élevés de libération du Ca et la présence de calcite dans certains pédons à l'ouest de l'aire d'étude s'expliquent par un socle rocheux à forte présence de roches calcosilicatées et marbreuses (Coty et al. 1994). Également, la forte présence de plagioclases dans toutes les sous-régions, à l'exception de la SR5 et des lacs Truite-Rouge (203), Grégoire (413) et des Papillons (414) peut s'expliquer par l'imposante présence d'intrusion anorthositique et mangéritique au centre et à l'est de l'aire d'étude.

6.4.4 Comparaison des taux d'altération générés par PROFILE avec d'autres estimations

Dans le but de valider les résultats présentés dans ce chapitre, ceux-ci ont été comparés à d'autres résultats d'estimation du taux d'altération. Dans un premier temps, les résultats d'altération simulés des 22 bassins versants ont été comparés aux résultats de budget intrant-extrant fournis par le ministère de l'Environnement du Canada pour les mêmes bassins versants (Tableau 6.5). Cela permet une validation des résultats de simulation de l'altération avec des mesures prises sur le terrain (hauteur et chimie de précipitations, évapotranspiration, débit et chimie à l'exutoire). Dans un deuxième temps, les résultats simulés ont été comparés à des résultats de sols forestiers provenant d'environnements comparables. Seulement, une seule de ces comparaisons a été faite avec PROFILE, tandis que les autres résultats ont été obtenus selon la méthode des bilans élémentaires pédogénétiques (Tableau 6.6).

La comparaison des taux d'altération simulés par PROFILE avec les résultats de budget intrant-extrant pris sur le terrain sur les mêmes bassins versants démontre pour les BC+Na une corrélation de 0,79 (Tableau 6.5). Cette corrélation assez forte suggère que le modèle PROFILE estime bien l'ensemble des BC+Na. Il est également permis de suggérer le même constat pour le Ca ($r = 0,845$) et le Mg ($r = 0,72$). En revanche, cette affirmation ne peut pas s'appliquer au comparaisn de K ($r = 0,18$) et de Na ($r = 0,07$). Le K étant le cation basique le plus facilement prélevé par la végétation, il est donc possible que la faible corrélation obtenue soit due au fait que peu de K chemine à travers le profil dans la solution du sol pour se rendre aux lacs des bassins versants. De fait, le tableau 6.5 présente des concentrations infimes de K dans la méthode de budget intrant-extrant. En ce qui concerne le Na, la très faible corrélation est plus difficile à expliquer, car le Na contrairement aux autres cations basiques n'est pas prélevé par la végétation. Par conséquent, il devrait avoir une corrélation aussi bonne que le Ca et le Mg. On pourrait expliquer cette faible corrélation par la façon dont PROFILE a été programmé pour évaluer les concentrations des cations basiques. PROFILE 4.1 évalue avant tout le taux d'altération selon le total des BC+Na et ensuite il détermine les valeurs respectives des cations (Ca, Mg, K, Na) à partir de ce total, au lieu, d'évaluer la libération des cations individuellement et ensuite établir un total. Il est donc possible que PROFILE surestime les taux d'altération pour le Na dans la redistribution individuelle des cations.

Tableau 6.5 Comparaison des résultats d'altération PROFILE avec ceux d'Environnement Canada établis
selon la méthode de budget intrant-sortant ($\text{kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

Lacs	Sites	CB+Na		Ca		Mg		K		Na	
		PROFILE	Budget								
MacLeod	112	0,98	0,63	0,39	0,35	0,24	0,14	0,11	0,02	0,24	0,12
Josselin	113	0,87	0,85	0,30	0,53	0,24	0,15	0,10	0,03	0,24	0,14
Najoua	114	1,18	0,68	0,39	0,40	0,26	0,11	0,15	0,02	0,38	0,15
Éclair	201	1,64	0,69	0,57	0,38	0,35	0,19	0,16	0,02	0,55	0,09
Lemaine	202	1,12	0,99	0,40	0,60	0,28	0,20	0,12	0,04	0,33	0,15
Truite-Rouge	203	1,39	1,01	0,74	0,65	0,44	0,20	0,12	0,02	0,09	0,14
Fauvette	212	2,33	0,67	0,84	0,36	0,63	0,18	0,20	0,02	0,66	0,10
Adanys	213	1,11	0,43	0,36	0,24	0,25	0,10	0,13	0,02	0,36	0,07
Boisvert	214	1,20	0,85	0,40	0,50	0,34	0,20	0,13	0,05	0,33	0,10
Chômeur	301	1,43	0,89	0,49	0,56	0,28	0,14	0,17	0,05	0,49	0,13
Thomas	302	1,03	1,67	0,38	1,12	0,26	0,29	0,11	0,05	0,29	0,21
Daniel	311	1,50	0,75	0,49	0,42	0,30	0,15	0,19	0,05	0,52	0,13
Pothier	313	2,10	0,79	0,77	0,45	0,48	0,18	0,19	0,03	0,66	0,14
Laurent	314	1,50	1,78	0,52	1,10	0,37	0,45	0,18	0,05	0,43	0,17
Des Jones	411	1,85	1,27	0,81	0,83	0,36	0,26	0,16	0,03	0,51	0,16
Gén.-White	412	2,07	2,09	0,96	1,30	0,47	0,51	0,19	0,06	0,45	0,22
Grégoire	413	3,53	1,65	2,64	1,16	0,67	0,32	0,12	0,07	0,10	0,10
Papillons	414	1,84	1,30	1,27	0,81	0,39	0,30	0,10	0,04	0,08	0,15
Blais	501	3,27	2,22	2,36	1,82	0,64	0,25	0,15	0,06	0,11	0,10
David	502	3,06	2,15	2,31	1,52	0,53	0,49	0,12	0,03	0,10	0,11
Clair	514	4,16	1,94	3,23	1,55	0,66	0,25	0,16	0,03	0,12	0,12
Duck	515	5,50	3,13	3,66	2,14	1,26	0,76	0,34	0,05	0,25	0,17
r		0,79		0,845		0,72		0,18		0,070	
P		< 0,001		< 0,001		< 0,001		0,423		0,755	

Réalisé par Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Les taux d'altération simulés par Ouimet et Duchesne (2005) ont été faits sur trois bassins versants à l'aide du modèle PROFILE. Deux des trois bassins versants utilisés dans cette recherche se situent à l'est de la présente aire d'étude. Dès lors, il devient très intéressant de comparer les résultats des deux recherches. En général, la moyenne des taux d'altération des BC+Na pour nos 62 pédon (2,06 kmol_c ha⁻¹ an⁻¹) est un peu plus élevée que celle du lac Laflamme (1,51 kmol_c ha⁻¹ an⁻¹). En revanche, les résultats des SR1, SR2 et SR3 sont similaires à ceux du lac Laflamme, et ceux du lac Clair se comparent très bien avec les résultats des bassins versants de la SR1 (Tableau 6.1). De fait, le lac Clair se situe à proximité de la SR1. Cependant, les taux d'altération dans les SR4 et SR5 sont supérieurs à ceux calculés par Ouimet et Duchesne (2005). Rappelons que ces deux sous-régions, au sud-ouest de l'aire d'étude, étaient différentes des autres en ce qui concerne la minéralogie et les données climatiques. Enfin, le lac de la Tirasse possède un taux d'altération des BC+Na beaucoup plus faible que les autres. Ce lac est situé plus au nord (49°), et les taux plus faibles sont en accord avec la corrélation inverse observée entre la latitude et les taux d'altération (sous-section 6.4.2).

Lorsqu'on compare les taux d'altération simulés par PROFILE avec les taux d'altération établis selon les bilans élémentaires pédogénétiques, on observe un écart assez important entre les résultats des deux méthodes, surtout pour les SR4 et SR5. En revanche, les résultats des SR1, SR2 et SR3 se comparent très bien à ceux obtenus par Watmough et Dillon (2003) pour les lacs Chub et Harp, mais ils demeurent supérieurs à la majorité des autres résultats présentés. Courchesne et al. (2002) suggèrent que la vitesse d'altération des minéraux dans les sols est initialement plus élevée pour ensuite ralentir après environ 4000 ans de pédogenèse et atteindre des valeurs plus faibles. Ce que nous observons dans les comparaisons au tableau 6.6 est complètement le contraire et suggère que les taux actuels d'altération des sols sont supérieurs aux taux mesurés à l'aide de chronoséquences. Ceci va plutôt dans le sens des observations et résultats de Langan et al. (1996), qui suggèrent que les taux d'altération actuels sont plus élevés que les taux historiques à cause de l'augmentation des dépôts acides dans les écosystèmes ces 200 dernières années.

Tableau 6.6 Moyenne des taux d'altération des sous-régions étudiées comparées à des résultats de bilan élémentaire pédogénétique et de simulation (kmol, ha⁻¹ an⁻¹)

Simulation avec PROFILE	Sites	Ca	Mg	K	Na	BC+Na	Précision sur les méthodes utilisées
Présente étude 2006 - Canada, Qc	Moyenne SR1	0,36	0,25	0,12	0,29	1,01	
	Moyenne SR2	0,55	0,38	0,15	0,39	1,46	
	Moyenne SR3	0,53	0,34	0,17	0,48	1,51	PROFILE 4.1
	Moyenne SR4	1,42	0,47	0,14	0,28	2,32	
	Moyenne SR5	2,89	0,77	0,19	0,14	4,00	
	Moyenne Générale	1,15	0,44	0,15	0,32	2,06	
Ouinet et Duchesne 2005 - Canada, Qc	Lac Clair	0,34	0,25	0,04	0,06	0,70	
	Lac Laflamunc	0,70	0,33	0,27	0,21	1,51	PROFILE 4.2
	Lac de la Tirassee	0,17	0,04	0,01	0,03	0,26	
Bilan élémentaire pédogénétique Courchesne 2002 - Canada	Hernine	0,07	0,05	0,04	0,04	0,19	Taux sur une période de 11 000 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
	Rouyn-1	0,09	0,07	0,02	0,10	0,28	
	Rouyn-4	0,35	0,27	0,09	0,40	1,11	Taux sur une période de 8000 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
Olsson et Melkerud 2000 - Suède	Nyånget	0,08	0,05	0,04	0,08	0,24	
	Heden	0,08	0,13	0,06	0,12	0,39	Taux sur une période de 9447 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
	Hyytiälä	0,07	0,05	0,06	0,11	0,29	
Lichter 1998 - Etats-Unis	Lac Michigan	0,26	0,17	0,00	0,00	0,43	Taux sur une période de 4150 ans pour la fraction <2 mm des 15 premiers cm du profil minéral
	Cloquet	0,25	0,10	0,03	n.d.	0,38	
Kolka et al. 1996 - Etats-Unis	Omega	0,18	0,06	0,01	n.d.	0,25	Taux sur une période de 11 600 ans pour la fraction des limons (2 à 53 µm) du profil minéral
	Ontonagon	0,14	0,05	0,02	n.d.	0,21	et selon un modèle exponentiel (NB: BC+Na sans les Na)
	Solon	0,03	0,02	0,01	n.d.	0,05	
	Warba	0,31	0,07	0,01	n.d.	0,39	
	Adams	0,24	0,12	0,15	0,25	0,76	
Jersak et 1995 et 1997 - Etats-Unis	Beckett	0,07	0,04	0,04	0,11	0,26	Taux sur une période de 12 000 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
	Houghtonville	0,07	0,41	0,62	0,04	1,14	
Wessentink et al 1994 - Allemagne	Solling	0,08	0,30	0,20	0,08	0,66	Taux sur une période de 10 000 ans pour la fraction <2 mm des 60 premiers cm du profil minéral
Bain et al. 1993 - Écosse	Glen Feshie	0,06	0,09	0,14	0,26	0,55	Taux sur une période de 13 000 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
Kirkwood et Nesbitt 1991 - Canada	Plastic Lake	0,13	0,08	0,07	0,14	0,42	Taux sur une période de 12 000 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
Wattmough et Dillon 2003 - Canada, ON	Plastic Lake	0,13	0,08	0,07	0,14	0,42	
	Red Chalk Lake	0,23	0,16	0,05	0,16	0,60	
	Chub Lake	0,46	0,40	0,09	0,22	1,16	
	Harp Lake 3A	0,41	0,28	0,07	0,22	0,97	Taux sur une période de 12 000 ans pour la fraction <2 mm du profil minéral
	Harp Lake 4	0,50	0,36	0,18	0,30	1,34	
	Harp Lake 6	0,36	0,25	0,05	0,18	0,84	
	Harp Lake 6A	0,31	0,20	0,06	0,13	0,70	

n.d. = non disponible

Réalisé par Patrice Lamoureux, UQAM, 2006

CONCLUSION

Le renouvellement des réservoirs de cations basiques dans les sols par altération chimique est un des aspects essentiels de l'équilibre écosystémique des forêts dont le socle rocheux est acide. Cette recherche tentait d'établir un taux d'altération annuel des sols de la bordure sud du Bouclier canadien à partir d'un outil de simulation qui tenait compte des caractéristiques pédologiques propres à un bassin versant. La recherche a porté sur 22 bassins versants de premiers ordres hydrographiques du réseau TADPA (Transports à distance des polluants atmosphériques), situés entre les rivières des Outaouais et Saguenay, Québec, Canada.

Nous avons utilisé le modèle mathématique et biogéochimique PROFILE, développé en Suède dans le but de calculer l'influence des dépôts acides sur les sols, pour simuler les taux d'altération. Des analyses détaillées des caractéristiques physiques des pédons et des caractéristiques hydroclimatiques pour chaque bassin versant ont été faites. Dans PROFILE, un sous-modèle stoechiométrique, UPPSALA, reconstitue la minéralogie d'un sol à partir de sa chimie totale. Nous avons voulu améliorer la méthode en établissant une minéralogie précise des différentes fractions granulométriques des horizons B (argile, limon, sable). La surface spécifique des sols a été établie selon deux méthodes distinctes: un algorithme textural proposé dans PROFILE et la méthode BET basée sur le volume d'adsorption d'azote des matières. Nous avons extrait les oxyhydroxides sur certains échantillons afin d'évaluer leur influence sur les valeurs de surface spécifique et sur le taux d'altération. Des simulations à partir de modèles hydroclimatiques ont permis de caractériser les données de pluviométrie, de ruissellement, de contenu en eau des horizons du sol et de température du sol pour chaque bassin versant. Les données de précipitations ont été établies par le logiciel BioSIM. La température du sol pour chaque site a été faite à partir du modèle ForSTEM et les données hydrologiques par ForHYM. La superficie de l'aire d'étude et le nombre élevé d'échantillons n'ont pas permis la récolte de toutes les données qu'exige le modèle PROFILE. Certaines données ont dû être présumées pour chaque pédon et sous-région. Celles-ci ont été tirées de la littérature dans des études similaires qui ont été faites au sud de l'aire d'étude. En

revanche, elles ont fait l'objet de tests de sensibilité afin d'observer les variations qu'elles pouvaient générer dans les résultats d'altération.

Le taux d'altération moyen pour les BC+Na avec une surface spécifique évaluée selon l'algorithme de texture est de $1,96 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Celui simulé avec une surface spécifique selon l'équation BET est de $4,20 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, tandis que le taux d'altération moyen suite à l'extraction des oxyhydroxides dans l'évaluation de la surface spécifique avec la méthode BET pour six échantillons est de $2,16 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

La simulation des taux d'altération avec PROFILE est proportionnelle à la surface spécifique du sol minéral. Cet intrant dans le modèle apparaît comme un des plus important et des plus difficiles à évaluer afin de bien représenter la réalité terrain. Il est évident après observation des résultats de surface spécifique et d'altération que les revêtements d'oxyhydroxides sur les minéraux ont tendance à exagérer les évaluations. Cependant, la comparaison des résultats d'altération entre ceux générés avec l'algorithme textural et ceux avec la méthode BET après extraction des oxyhydroxides montre une très forte corrélation et suggère que l'algorithme textural donne une bonne estimation de la surface spécifique, malgré qu'il ne tienne aucunement compte de la composition minéralogique des échantillons.

Un gradient géographique a été observé. L'altération dans les bassins versants au sud-ouest de l'aire d'étude est de beaucoup supérieure à celle dans ceux situés au nord-est, tel que montré par une bonne corrélation entre les taux d'altération et la latitude (-0,68) et aussi avec la longitude (-0,73). De plus, l'altération est plus faible dans les sites en plus haute altitude et où les températures de l'air et du sol sont plus basses.

L'influence de la vitesse de dégradation de certains minéraux par rapport à d'autres apporte un éclaircissement sur les différents taux d'altération simulés. Les quantités de BC+Na libérés par l'altération s'expliqueraient beaucoup plus par l'abondance ou la rareté de certains minéraux s'altérant rapidement ou modérément que par la présence très importante de minéraux dont la dégradation est lente ou très lente. Ces derniers présents en grande quantité

dans les sols, surtout les feldspaths, semblent maintenir des taux d'altération au minimum. En revanche, la présence de minéraux comme les pyroxènes, les grenats, la biotite et la chlorite augmente les quantités de cations basiques libérés, même s'ils sont présents en faible proportion dans la minéralogie.

Les comparaisons entre les résultats d'altération simulés avec ceux établis selon la méthode de budget intrant-extrant sur les mêmes bassins versants démontrent de fortes corrélations en ce qui concerne l'altération du Ca et du Mg ainsi que des BC+Na en général. En revanche, la prédiction pour le Na est nettement en contradiction avec la méthode du budget intrant-extrant. Également, la comparaison des résultats d'altération présentée dans cette étude avec ceux des bilans élémentaires pédogénétiques suggère une augmentation des taux d'altération actuels par rapport aux taux historiques. Il serait très judicieux de faire des analyses de bilans élémentaires sur ces bassins versants afin de confirmer ce phénomène.

Enfin, il faut remarquer qu'une minéralogie complète et représentative de chaque pédon, utilisant au maximum les possibilités offertes par PROFILE, a non seulement permis de préciser les taux d'altération, mais surtout de repérer les minéraux qui ont le plus d'influence sur le taux d'altération. Certes, la méthode de minéralogie semi-quantitative présentée dans ce mémoire est expérimentale et nécessite quelques améliorations. Par exemple, la pondération des minéraux secondaires doit être mieux précisée en tenant compte plus précisément de la forte présence des minéraux détritiques dans les fractions argileuses.

Dans l'éventualité où une étude de ce genre serait reproduite, quelques recommandations pourraient être pertinentes aux futurs chercheurs. Avant tout, il est suggéré de réduire le nombre de sites à l'étude ou même l'aire d'étude en tant que telle par rapport à celle présentée dans ce mémoire. Cela permettrait de faire des mesures détaillées sur le terrain et en laboratoire sur plusieurs variables. La sélection des pédons pourrait tenir compte de la variabilité de l'altération dans un même bassin versant, soit le long de catenas. L'étude et l'échantillonnage de chacun des pédons devraient porter sur l'ensemble des horizons des sols et les analyses sur chacun de ces horizons, étant donné la variabilité à l'intérieur même du

pédon. Les modèles font certainement gagner temps et argent, mais à quel point représentent-ils fidèlement la réalité terrain? La comparaison des valeurs générées par PROFILE avec la chimie des eaux de percolation des sols serait intéressante. Ceci, de concert avec des bilans intrants-extrants dressés avec des données provenant du bassin versant sous étude (hydrologie et géochimie) augmenterait notre niveau de confiance et ne pourrait qu'améliorer la conception des modèles, tel le modèle PROFILE.

APPENDICE A

**POOL DE 100 g. DES 62 ÉCHANTILLONS UTILISÉS
DANS LES ANALYSES EN LABORATOIRE**

Pool de 100 g pour les 62 horizons B échantillonnés

Lac	Site	Sous-horizons	Épaisseur (cm)	Densité <2 mm (g cm ⁻³)	Ép.*De.	Proportion (l g) (Ép.*De.)/Total	Proportion (100 g)
MacLeod	112-1	B1	20	1,00	20,07	0,58	58
		B2	20	0,74	14,79	0,42	42
	Total				34,86	1	100
	112-2	B1	24	0,84	20,09	0,41	41
		B2	24	1,18	28,41	0,59	59
	Total				48,51	1	100
	112-3	B1	4	0,92	3,67	0,06	6
		B2	16	0,77	12,26	0,21	21
		B3	20	0,92	18,30	0,32	32
		B4	26	0,90	23,40	0,41	41
Total				57,64	1	100	
Josselin	113-1	B1	7	0,53	3,71	0,14	14
		B2	15	0,66	9,83	0,38	38
		B3	14	0,90	12,60	0,48	48
	Total				26,14	1	100
	113-2	B1	12	0,92	11,05	0,31	31
		B2	12	1,13	13,60	0,38	38
		B3	10	1,13	11,30	0,31	31
	Total				35,95	1	100
	113-3	B1	8	0,73	5,80	0,12	12
		B2	22	1,07	23,61	0,50	50
B3		17	1,07	18,19	0,38	38	
Total				47,60	1	100	
Najoua	114-1	B1	24	0,61	14,57	0,51	51
		B2	16	0,86	13,83	0,49	49
	Total				28,39	1	100
	114-2	B1	23	0,51	11,68	0,22	22
		B2	20	0,97	19,30	0,36	36
		B3	16	1,42	22,71	0,42	42
	Total				53,69	1	100
	114-3	B1	12	0,66	7,94	0,10	10
		B2	23	1,10	25,31	0,31	31
		BC	32	1,54	49,35	0,60	60
Total				82,60	1	100	
Éclair	201-1	B1	23	0,82	18,97	0,27	27
		B2	16	0,90	14,40	0,20	20
		B3	30	1,23	36,90	0,53	53
	Total				70,27	1	100
	201-2	B1	12	0,64	7,72	0,17	17
		B2	15	1,14	17,13	0,37	37
		B3	17	1,23	20,91	0,46	46
	Total				45,77	1	100
	201-3	B1	18	0,73	13,14	0,18	18
		B2	25	0,90	22,57	0,31	31
B3		30	1,23	36,97	0,51	51	
Total				72,68	1	100	

Pool de 100 g pour les 62 horizons B échantillonnés (suite)

Lac	Site	Sous-horizons	Épaisseur (cm)	Densité <2 mm (g cm ⁻³)	Ép.*De.	Proportion (1 g) (Ép.*De.)/Total	Proportion (100 g)	
Lemaine	202-1	B1	10	0,73	7,30	0,12	12	
		B2	19	0,94	17,94	0,30	30	
		B3	32	1,05	33,73	0,57	57	
	Total				58,97	1	100	
	202-2	B1	20+	1,52	-	-	1	100
		202-3	B1	12	0,73	8,76	0,27	27
			B2	20	0,48	9,65	0,29	29
			B3	21	0,69	14,43	0,44	44
		Total				32,84	1	100
	Truite-Rouge	203-2	B1	30	0,84	25,16	0,42	42
B2			30	0,89	26,56	0,45	45	
B3			6	1,30	7,80	0,13	13	
Total					59,52	1	100	
203-3		B1	15	0,84	12,60	0,32	32	
		B2	30	0,89	26,70	0,68	68	
Total					39,30	1	100	
Fauvette	212-1	B1	10	0,95	9,45	0,21	21	
		B2	15	0,78	11,71	0,26	26	
		B3	17	1,43	24,34	0,53	53	
	Total				45,50	1	100	
	212-2	B1	16	1,19	19,06	0,33	33	
		B2	18	1,45	26,05	0,45	45	
		BC	9	1,45	13,02	0,22	22	
	Total				58,13	1	100	
	212-3	B1	16	0,70	11,26	0,24	24	
		B2	26	1,39	36,14	0,76	76	
Total				47,40	1	100		
Adanys	213-1	B1	14	0,93	12,96	0,20	20	
		B2	21	1,12	23,60	0,36	36	
		B3	19	1,56	29,73	0,45	45	
	Total				66,29	1	100	
	213-2	B1	12	0,54	6,46	0,17	17	
		B2	24	1,29	30,91	0,83	83	
	Total				37,37	1	100	
	213-3	B1	13	0,74	9,56	0,16	16	
		B2	18	0,66	11,94	0,20	20	
		B3	30	1,26	37,91	0,64	64	
Total				59,41	1	100		
Boisvert	214-1	B1	20	0,78	15,65	0,29	29	
		B2	32	1,20	38,24	0,71	71	
	Total				53,89	1	100	
	214-2	B1	3	0,81	2,43	0,05	5	
		B2	34	1,23	41,96	0,95	95	
	Total				44,39	1	100	
	214-3	B1	11	0,80	8,75	0,30	30	
		B2	18	1,16	20,84	0,70	70	
Total				29,59	1	100		

Pool de 100 g pour les 62 horizons B échantillonnés (suite)

Lac	Site	Sous-horizons	Épaisseur (cm)	Densité <2 mm (g cm ⁻³)	Ép.*De.	Proportion (1 g (Ép.*De.)/Total	Proportion (100 g)	
Chômeur	301-1	B1	6	0,80	4,77	0,11	11	
		B2	15	1,10	16,52	0,38	38	
		B3	21	1,08	22,65	0,52	52	
	Total	301-1				43,94	1	100
			B1	10	0,80	7,95	0,12	12
			B2	18	1,17	21,04	0,32	32
	Total	301-2	B3	34	1,08	36,72	0,56	56
						65,71	1	100
			B1	8	0,80	6,36	0,39	39
Total	301-3	B2	18	0,56	10,12	0,61	61	
					16,48	1	100	
Thomas	302-1	B1	14	0,42	5,83	0,23	23	
		B2	18	1,06	19,04	0,77	77	
	Total	302-1				24,87	1	100
			B1	17	0,91	15,39	0,39	39
	Total	302-2	B2	20	1,22	24,39	0,61	61
						39,78	1	100
	Total	302-3	B1	13	0,76	9,94	0,38	38
			B2	18	0,90	16,13	0,62	62
	Total	302-3				26,07	1	100
Daniel	311-1	B1	16	0,94	14,96	0,44	44	
		B2	18	1,04	18,67	0,56	56	
	Total	311-1				33,64	1	100
			B1	10	0,94	9,40	0,32	32
	Total	311-2	B2	20	1,02	20,35	0,68	68
						29,75	1	100
Pothier	313-1	B1	12	0,88	10,50	0,25	25	
		B2	12	1,04	12,48	0,29	29	
		B3	15	1,30	19,43	0,46	46	
	Total	313-1				42,41	1	100
			B1	10	0,89	8,90	0,24	24
			B2	12	1,04	12,48	0,33	33
	Total	313-2	B3	13	1,23	16,03	0,43	43
						37,41	1	100
			B1	12	0,86	10,31	0,13	13
	Total	313-3	B2	22	1,04	22,84	0,30	30
			B2	12	0,95	11,36	0,15	15
			B3	24	1,36	32,61	0,42	42
					77,13	1	100	
Laurent	314-1	B1	9	0,80	7,20	0,12	12	
		B2	15	1,01	15,15	0,26	26	
		B3	24	1,53	36,81	0,62	62	
	Total	314-1				59,16	1	100
			B1	12	0,80	9,60	0,45	45
			B2	14	0,85	11,91	0,55	55
Total	314-2				21,51	1	100	

Pool de 100 g pour les 62 horizons B échantillonnés (suite)

Lac	Site	Sous- horizons	Épaisseur (cm)	Densité <2 mm (g cm ⁻³)	Ép.*De.	Proportion (1 g (Ép.*De.)/Total	Proportion (100 g)	
Laurent (suite)	314-3	B1	8	0,80	6,40	0,19	19	
		B2	25	1,07	26,79	0,81	81	
		Total			33,19	1	100	
Des Jones	411-1	B1	14	0,93	13,00	0,22	22	
		B2	18	1,18	21,17	0,36	36	
		B3	20	1,20	23,95	0,41	41	
	Total			58,12	1	100		
	411-2	B1	18	0,93	16,82	0,33	33	
		B2	30	1,15	34,59	0,67	67	
	Total			51,41	1	100		
	411-3	B1	17	0,84	14,23	0,30	30	
		B2	23	1,47	33,70	0,70	70	
Total			47,93	1	100			
General White	412-1	B1	10	0,82	8,17	0,13	13	
		B2	24	1,03	24,82	0,39	39	
		B3	27	1,14	30,78	0,48	48	
	Total			63,77	1	100		
	412-2	B1	18	0,65	11,67	0,19	19	
		B2	18	1,30	23,32	0,37	37	
		B3	20	1,39	27,82	0,44	44	
	Total			62,80	1	100		
	412-3	B1	8	0,74	5,88	0,14	14	
		B2	18	0,76	13,68	0,33	33	
		B3	22	1,00	22,00	0,53	53	
	Total			41,56	1	100		
	Grégoire	413-1	B1	21	0,87	18,24	0,50	50
			B2	21	0,87	18,17	0,50	50
		Total			36,41		0	
413-2		B1	26	1,23	32,01	0,47	47	
		B2	21	1,69	35,58	0,53	53	
Total				67,59	1	100		
Des Papillons	414-1	B1	22	0,74	16,22	0,31	31	
		B2	23	1,01	23,25	0,44	44	
		B3	12	1,09	13,08	0,25	25	
	Total			52,55	1	100		
	414-2	B1	25	0,80	20,06	0,37	37	
		B2	20	0,89	17,77	0,33	33	
		B3	15	1,09	16,35	0,30	30	
	Total			54,17	1	100		
	414-3	B1	23	0,79	18,09	0,30	30	
		B2	20	1,08	21,60	0,36	36	
		B3	18	1,09	19,63	0,33	33	
	Total			59,33	1	100		

Pool de 100 g pour les 62 horizons B échantillonnés (suite)

Lac	Site	Sous-horizons	Épaisseur (cm)	Densité <2 mm (g cm ⁻³)	Ép.*De.	Proportion (1 g) (Ép.*De.)/Total	Proportion (100 g)
Blais	501-1	B1	15	0,76	11,38	0,20	20
		B2	18	1,24	22,29	0,40	40
		B3	15	1,48	22,26	0,40	40
Total				55,93	1	100	
Total	501-3	B1	30	1,03	30,99	0,49	49
		B2	22	1,45	31,83	0,51	51
Total				62,82	1	100	
David	502-1	B1	22	0,71	15,53	0,24	24
		B2	27	0,95	25,53	0,39	39
		B3	20	1,22	24,49	0,37	37
Total				65,55	1	100	
Total	502-2	B1	20	0,65	12,97	0,24	24
		B2	20	1,14	22,77	0,41	41
		B3	15	1,28	19,23	0,35	35
Total				54,97	1	100	
Total	502-3	B1	21	0,68	14,28	0,22	22
		B2	23,5	1,05	24,56	0,38	38
		B3	25	1,04	26,07	0,40	40
Total				64,91	1	100	
Clair	514-1	B1	28	1,46	40,89	0,36	36
		B2	28	1,42	39,89	0,36	36
		B3	18	1,75	31,52	0,28	28
Total				112,31	1	100	
Total	514-2	B1	32	1,05	33,60	0,45	45
		B2	41	1,01	41,26	0,55	55
Total				74,85	1	100	
Total	514-3	B1	23	0,82	18,87	0,32	32
		B2	26	0,73	18,95	0,32	32
		B3	23	0,92	21,22	0,36	36
Total				59,05	1	100	
Duck	515-1	B1	19	1,03	19,55	0,28	28
		B2	17	1,22	20,81	0,30	30
		B3	22	1,31	28,71	0,42	42
Total				69,07	1	100	
Total	515-2	B1	20	0,99	19,80	0,50	50
		B2	20	1,00	20,04	0,50	50
Total					1	100	
Total	515-3	B1	12	0,95	11,42	0,12	12
		B2	20	1,07	21,35	0,22	22
		B3	20	1,35	27,01	0,28	28
		B4	26	1,41	36,66	0,38	38
Total				96,44	1	100	

APPENDICE B

TAUX D'ALTÉRATION SIMULÉS AVEC PROFILE POUR LES 62 PÉDONS
SELON LES SURFACES SPÉCIFIQUES ÉTABLIS AVEC LA MÉTHODE BET
ET L'ALGORITHME DE TEXTURE

Taux d'altérations des 62 pédons à partir d'une surface spécifique établit selon la méthode BET (kmolc ha-1 an-1)

Lacs et sols		Altération Chimique					Lacs et sols		Altération Chimique				
		BC+Na	Ca	Mg	K	Na			BC+Na	Ca	Mg	K	Na
MacLeod	112-1	1,148	0,453	0,271	0,129	0,295	Daniel	311-1	3,133	1,015	0,611	0,389	1,118
	112-2	1,239	0,440	0,262	0,178	0,360		311-2	4,728	1,517	0,849	0,605	1,758
	112-3	1,125	0,433	0,256	0,135	0,301		Pothier	313-1	6,681	2,397	1,364	0,661
Josselin	113-1	0,239	0,086	0,074	0,025	0,055	313-2		4,010	1,524	0,937	0,331	1,217
	113-2	0,417	0,165	0,121	0,037	0,094	313-3	5,990	2,136	1,250	0,584	2,020	
Najoua	113-3	0,758	0,268	0,231	0,079	0,180	Laurent	314-1	3,504	1,167	0,721	0,413	1,203
	114-1	0,801	0,286	0,215	0,087	0,212		314-2	1,612	0,520	0,394	0,264	0,434
	114-2	1,633	0,561	0,362	0,182	0,528		314-3	2,491	0,886	0,663	0,282	0,660
Éclair	114-3	2,199	0,661	0,389	0,318	0,831	Des Joncs	411-1	5,360	2,570	0,951	0,429	1,410
	201-1	4,512	1,599	0,922	0,448	1,543		411-2	3,715	1,912	0,595	0,283	0,926
	201-2	2,542	0,874	0,527	0,260	0,880		411-3	3,706	1,289	0,781	0,383	1,253
Lemaine	201-3	3,705	1,282	0,698	0,381	1,345	Général White	412-1	3,833	1,266	1,115	0,485	0,966
	202-1	1,938	0,601	0,420	0,254	0,662		412-2	5,266	3,124	0,821	0,367	0,953
	202-2	1,298	0,437	0,342	0,139	0,380	412-3	2,239	0,735	0,638	0,239	0,627	
Truite-Rouge	202-3	1,874	0,720	0,337	0,193	0,624	Grégoire	413-1	3,533	2,092	0,973	0,256	0,212
	203-2	3,105	1,879	0,811	0,239	0,175		413-2	7,129	5,667	1,150	0,177	0,135
	203-3	1,875	0,811	0,657	0,230	0,177	Des Papillons	414-1	6,219	4,666	1,068	0,260	0,224
Fauvette	212-1	3,367	1,150	0,835	0,336	1,047		414-2	2,093	1,284	0,537	0,158	0,114
	212-2	3,463	1,312	0,972	0,269	0,911		414-3	6,575	4,857	1,174	0,306	0,238
Adanys	212-3	4,883	1,682	1,222	0,463	1,515	Blais	501-1	4,614	3,549	0,750	0,179	0,136
	213-1	2,293	0,699	0,439	0,290	0,865		501-3	5,652	3,894	1,217	0,311	0,230
	213-2	2,713	0,860	0,552	0,308	0,993		David	502-1	6,044	4,331	1,146	0,301
213-3	1,476	0,459	0,286	0,193	0,538	502-2	4,826		3,767	0,745	0,171	0,142	
Boisvert	214-1	1,795	0,593	0,494	0,206	0,503	Clair	502-3	8,267	6,528	1,216	0,299	0,224
	214-2	3,383	1,014	0,889	0,441	1,039		514-1	9,085	6,854	1,428	0,417	0,386
	214-3	3,465	1,111	0,862	0,387	1,104		514-2	18,78	15,53	2,332	0,607	0,313
Chômeur	301-1	2,004	0,669	0,382	0,236	0,717	Duck	514-3	10,38	7,579	1,834	0,530	0,436
	301-2	2,815	0,923	0,515	0,358	1,020		515-1	9,545	4,156	3,539	1,096	0,755
	301-3	5,521	1,835	0,784	0,746	2,157		515-2	11,79	8,696	2,053	0,596	0,441
Thomas	302-1	2,479	0,868	0,510	0,274	0,827	515-3	12,97	9,545	2,245	0,689	0,488	
	302-2	3,617	1,247	0,720	0,429	1,221							
	302-3	2,879	1,007	0,602	0,320	0,949							

Réalisation : Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

Taux d'altérations des 62 pédons à partir d'une surface spécifique établit selon l'algorithme de texture (kmolc ha-1 an-1)

Lacs et sols		Altération Chimique					Lacs et sols		Altération Chimique				
		BC+Na	Ca	Mg	K	Na			BC+Na	Ca	Mg	K	Na
MacLeod	112-1	1,239	0,481	0,279	0,145	0,334	Daniel	311-1	1,512	0,495	0,311	0,187	0,518
	112-2	0,869	0,338	0,221	0,102	0,208		311-2	1,486	0,483	0,291	0,188	0,524
	112-3	0,836	0,346	0,214	0,084	0,192		Pothier	313-1	2,174	0,781	0,479	0,208
Josselin	113-1	0,444	0,155	0,136	0,048	0,106	313-2		1,955	0,744	0,478	0,159	0,574
	113-2	1,318	0,449	0,314	0,160	0,395	313-3	2,158	0,771	0,483	0,203	0,700	
	113-3	0,862	0,299	0,258	0,093	0,211	Laurent	314-1	2,192	0,731	0,464	0,257	0,740
Najoua	114-1	0,796	0,285	0,214	0,087	0,211		314-2	1,034	0,357	0,292	0,150	0,235
	114-2	1,295	0,451	0,302	0,142	0,400		314-3	1,277	0,459	0,362	0,142	0,313
	114-3	1,452	0,442	0,272	0,210	0,529	Des Joncs	411-1	1,860	0,87	0,364	0,148	0,479
Éclair	201-1	1,560	0,555	0,347	0,152	0,506		411-2	1,817	0,915	0,314	0,139	0,448
	201-2	1,453	0,503	0,319	0,148	0,483		411-3	1,863	0,649	0,411	0,190	0,612
	201-3	1,892	0,656	0,375	0,193	0,669	Général White	412-1	1,702	0,570	0,503	0,212	0,417
Lemaine	202-1	1,123	0,367	0,272	0,139	0,345		412-2	3,231	1,898	0,524	0,224	0,585
	202-2	1,428	0,476	0,369	0,155	0,427		412-3	1,271	0,426	0,372	0,135	0,338
	202-3	0,812	0,353	0,185	0,066	0,208	Grégoire	413-1	1,425	0,816	0,419	0,105	0,085
Truite-Rouge	203-2	1,724	1,018	0,474	0,135	0,097		413-2	5,628	4,457	0,926	0,139	0,106
	203-3	1,050	0,459	0,398	0,113	0,082	Des Papillons	414-1	1,856	1,355	0,356	0,078	0,067
Fauvette	212-1	2,011	0,689	0,512	0,197	0,612		414-2	1,541	0,931	0,407	0,119	0,084
	212-2	3,105	1,176	0,876	0,240	0,813		414-3	2,125	1,533	0,417	0,098	0,077
	212-3	1,862	0,645	0,490	0,171	0,556	Blais	501-1	3,153	2,409	0,529	0,121	0,093
Adanys	213-1	1,309	0,406	0,265	0,166	0,472		501-3	3,377	2,302	0,756	0,183	0,136
	213-2	1,018	0,352	0,261	0,101	0,305	David	502-1	2,562	1,801	0,526	0,124	0,111
	213-3	0,993	0,331	0,228	0,118	0,317		502-2	3,148	2,436	0,509	0,110	0,093
Boisvert	214-1	1,199	0,406	0,347	0,134	0,312		502-3	3,466	2,699	0,553	0,121	0,093
	214-2	0,950	0,320	0,297	0,103	0,230	Clair	514-1	3,888	2,884	0,669	0,172	0,163
	214-3	1,460	0,478	0,372	0,161	0,448		514-2	6,788	5,539	0,931	0,207	0,111
Chômeur	301-1	1,711	0,572	0,331	0,201	0,607		514-3	1,792	1,256	0,373	0,088	0,074
	301-2	1,943	0,638	0,365	0,246	0,694	Duck	515-1	3,499	1,515	1,363	0,365	0,256
	301-3	0,641	0,254	0,148	0,064	0,175		515-2	4,866	3,526	0,927	0,235	0,179
Thomas	302-1	0,649	0,258	0,186	0,052	0,152		515-3	8,145	5,943	1,478	0,421	0,303
	302-2	1,389	0,484	0,304	0,163	0,438							
	302-3	1,065	0,394	0,278	0,104	0,288							

Réalisation : Patrick Lamoureux, UQAM, 2006

BIBLIOGRAPHIE

Abrahamsen, G. 1983. «Effects of Long Range Transported Pollutants on Forests». Dans National Swedish Environment Protection Board (éd.) *Ecological Effects of Acid Deposition. Report PM 1636*. Solna, Sweden: National Swedish Environment Protection Board, p. 191-197.

Adams, M. B., J. A. Burger, A. B. Jenkins et L. Zelany. 2000. «Impact of Harvesting and Atmospheric Pollution on Nutrient Depletion of Eastern US Hardwood Forests». *Forest Ecology and Management*, vol. 138, issues 1-3 (nov.), p. 301-319.

Alvertég, M., P. Warfvinge et H. Sverdrup. 1997. *PROFILE 4.0 User's guidance for the Apple Macintosh Version*, Draft version.

ARIC (Atmosphere, Climate and Environment information program). *Acid Rain*, Manchester Metropolitan University. www.doc.nmu.ac.uk/aric/eae/french/index.html. 30-06-2003.

Arp, Paul A. et Xiwei Yin. 1992. «Predicting Water Fluxes through Forests from Monthly Precipitation and Mean Monthly Air Temperature Records». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 22, p. 864-877.

Bain, D.C., A. Mellor, M.S.E. Robertson-Rintoul et S.T. Buckland. 1993. «Variations in Weathering Processes and Rates with Time in a chronosequence of Soils from Glen Feshie, Scotland». *Geoderma*, vol. 57, p. 275-293.

Becker, Rolf. 1999. *Critical Load-PROFILE 4.2 Manual (International Version)*. Strausberg: Öko-Data, 46 p.

Bélanger, Nicolas, David Paré, Mireille Bouchard et Gaëtan Daoust. 2004. «Is the Use of Trees with Superior Growth a Threat to soil Nutrient Availability? A Case Study with Norway Spruce». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, p. 560-572.

Bélanger, Nicolas, François Courchesne, Benoît Côté, James W. Fyles, Per Warfvinge et William Hendershot. 2002a. «Simulation of Soil Chemistry and Nutrient Availability in a Forested Ecosystem of Southern Quebec. Part I Reconstruction of the Time-series Files of Nutrient Cycling using the MAKEDEP Model». *Environmental Modelling & Software*, vol. 7, p. 427-445.

Bélanger, Nicolas, François Courchesne, Benoît Côté, James W. Fyles, Per Warfvinge et William Hendershot. 2002b. «Simulation of Soil Chemistry and Nutrient Availability in a Forested Ecosystem of Southern Quebec. Part II. Application of the SAFE Model». *Environmental Modelling & Software*, vol. 7, p. 447-465.

- Birkeland, Peter W. 1999. *Soils and Geomorphology*. 3^e éd. New York: Oxford University press, 430 p.
- Bouchard, André. 1995. *Changements dans le niveau d'acidité des lacs du sud du Québec de 1985 à 1994*. SGI 2-1539678. Montréal (Québec) : Conservation de l'environnement, Région du Québec, Centre Saint-Laurent, 35 p.
- Bouchard, Mireille et Serge Jolicoeur. 2000. «Chemical Weathering studies in Relation to Geomorphological research in southeastern Canada». *Geomorphology*, vol. 32, p. 213-238.
- Brantley, Susan L., et Nathan P. Mellott. 2000. «Surface Area and Porosity of Primary Silicate Minerals». *American Mineralogist*, vol. 85, p. 1767-1783.
- Brindley, G.W. et G. Brown. 1980. *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*. 3e éd ref. par Clay Minerals Group of the Mineralogical Society. London: Mineralogical Society, 495 p.
- Brindley, G. W. (éd.). 1951. *X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals. Symposium*. London: The Mineralogical Society, 345 p.
- Brunauer, S., P.H. Emmett et E. Teller. 1938. «Adsorption of Gases in Multimolecular Layer». *Journal of American Chemistry Society*, vol. 6, p. 309-319.
- Caillère, Simonne, Stéphane Hénin et Michel Rantureau. 1982. *Minéralogie des argiles : 1-Structure et propriété physico-chimiques*. 2^e éd. ent. ref. Coll. «Actualités scientifiques et agronomiques de l'I.N.R.A.». Paris : Masson, 184 p.
- Canada, ministère de l'Environnement du Canada. 1997. *Les pluies acides au Canada : Rapport d'évaluation de 1997, tome 1 les résultats en bref*. Ottawa : Centre d'édition du gouvernement du Canada : Approvisionnement et Services Canada, 16 p.
- Canada, Ministres fédéraux, provinciaux et territoriaux de l'Énergie et de l'Environnement. 1998. *Stratégie pancanadienne sur les émissions acidifiantes après l'an 2000*. Ottawa : Centre d'édition du gouvernement du Canada : Approvisionnement et Services Canada, 13 p.
- Caty, J.-L. (dir. publ.). 1994. *Géologie du Québec*. Sainte-Foy (Québec) : Les Publications du Québec, 154 p.
- Cosandey, Claude et Mark Robinson. 2000. *Hydrologie Continentale*. Paris: Armand Colin, 360 p.
- Courchesne, François, Jean-Pierre Hallé et Marie-Claude Turmel. 2002. «Bilans élémentaires holocènes et altération des minéraux dans trois sols forestiers du Québec méridional». *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 56, no. 1, p. 5-17.

- Courchesne, F., M.-C. Turmel et P. Beauchemin. 1996. «Magnesium and Potassium release by Weathering in Spodosols: Grain Surface Coating Effects». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 60, p. 1188-1196.
- Cronan, C.S. et D.F. Grigal. 1995. «Use of Ca/Al ratios as Indicators of Stress in Forests Ecosystems». *Journal of Environmental Quality*, vol. 24, p. 209-226.
- de Kimpe, C.R. 1984. «Mineralogical Analyses». In *Analytical Methods Manual 1984*. Canada, ministère de l'Agriculture du Canada, Research Branch. 1984. Sous la direction de B.H. Sheldrick. Coll. «LRRI contribution», no 84-30. Ottawa: Land resource research institute, Supply and Services Canada, p. 196-215.
- Duan, Lei, Jiming Hao, Shaodong Xie, Zhongping Zhou et Xuemei Ye. 2002. «Determining Weathering rates of Soils in China». *Geoderma*, vol. 110, p. 205-225.
- Duchaufour, Philippe. 1991. *Pédologie: sol, végétation, environnement*. 3^e éd. entièrement renouvelé avec 2 planches couleurs. Coll. «Abrégés». Paris: Masson, 289 p.
- Eggenberger, Urs et Daniel Kurz. 2000. «A Soil Acidification Study using the PROFILE Model on two Contrasting Regions in Switzerland». *Chemical Geology*, vol. 170, p. 243-257.
- Federoff, N., C.R. de Kimpe et G. Bourbeau. 1977. «L'altération des minéraux primaires en milieu podzolique en France Atlantique et au Québec». *CATENA*, vol.4, p. 29-40.
- Fenech, G. 1998. «The Canadian Acid Rain Strategy». *Environmental Science & Policy*, vol. 1, p. 261-267.
- Fichter Jörg, Marie-Pierre Turpault, Étienne Dambrine et Jacques Ranger. 1998. «Localization of Base Cations in Particle Size Fractions of Acid Forest Soils (Vosges Mountains, N-E France) ». *Geoderma*, vol.82, p. 295-314.
- Foy, C.D. 1983. «The Physiology of Plant Adaptation to Mineral Stress». *Iowa State Journal of Research*, vol. 57, p. 355-391.
- Foy, C.D. R.L. Chaney et M.C. White. 1978. «The Physiology of Metal Toxicity in Plants». *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 29, p. 511-566.
- Galloway, J.N. 1995. «Acid Deposition: Perspective in Time and Space». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 85, no. 1 (décembre), p. 15-24.
- Goldich, S.S. 1938. «A Study of Rock Weathering». *Journal of Geology*, vol. 47, p. 17-58.
- Griffin, G.M. 1971. «Interpretation of X-ray Diffraction Data». In *Procedures in Sedimentary Petrology*, sous la dir. de R.J. Carver, p. 541-570. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- Hedin, Lars O., Lennart Granat, Gene E. Likens et al. 1994. «Steep Declines in Atmospheric Base Cations in Regions of Europe and North America». *Nature*, vol. 367 (27 January), p.351-354.
- Hendershot, W.H., P. Warfvinge, F. Courchesne et H.U. Sverdrup. 1991. «The Mobile Anion Concept – Time for a Reappraisal? ». *Journal of Environmental Quality*, vol. 20, no. 3, p. 505-509.
- Hidy, George M. 1994. *Atmospheric Sulfur and Nitrogen Oxides: Eastern North American Source-Receptor Relationships*. San Diego, California: Academic Press, 447 p.
- Hodson, M.E. 2002. «Variation in Element Release Rate from Different Mineral Size Fractions from the B Horizon of a Granitic Podzol». *Chemical Geology*, vol.190, p. 91-112.
- Hodson, Mark E., S. J. Langan et S. Meriau. 1998a. «Determination of Mineral Surface Area in Relation to the Calculation of Weathering Rates». *Geoderma*, vol. 83, p. 35-54.
- Hodson, Mark E., Simon J. Langan, Fiona M. Kennedy et Derek C. Bain. 1998b.«Variation in Soil Surface Area in a Chronosequence of Soil from Glen Fchie, Scotland and its Implication for Mineral Weathering Rate Calculations». *Geoderma*, vol. 85, p. 1-18.
- Hodson, Mark E., Simon J. Langan et M. Jeff Wilson. 1997. «A Critical Evaluation of the Use of the PROFILE Model in Calculating Mineral Weathering Rates». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 98, p. 79-104.
- Houle, Daniel, Christian Gagnon, Suzanne Couture et Alain Kemp. 2004. «Recent Recovery of Lake Water Quality in Southern Quebec following Reductions in Sulfur Emissions». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 4, no 2-3 (juin), p. 247-261.
- Houle, Daniel, Raynald Paquin, Claude Camiré, Rock Ouimet et Louis Duchesne. 1997. «Response of the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Quebec) to changes in Precipitation Chemistry (1988-1994) ». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 27, no. 11 (novembre), p. 1813-1821.
- Jeffries, D.S., D.C.L. Lam et M.D. Moran. 2000. «Assessment of changes in Lake pH in southeastern Canada arising from Present Levels and Expected Reductions in Acidic Deposition». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 57, p. 40-49.
- Jersak, Joseph, Ronald Amundson et George Brimhall Jr. 1997. « Trace Metal Geochemistry in Spodosols of the Northeastern United States». *Journal of Environmental Quality*, vol. 26, p. 511-521.
- Jersak, Joseph, Ronald Amundson et George Brimhall Jr. 1995. «A Mass Balance Analysis of Podzolization: Exemples from the Northeastern United States». *Geoderma*, vol. 66, p. 15-42.

Jönsson, Charlotta, Per Warfinge et Harald Sverdrup. 1995. «Uncertainty in Predicting Weathering Rate and Environmental Stress Factors with the PROFILE Model». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 81, p.1-23.

Kahle, Maren, Markus Kleber et Reinhold Jahn. 2002. «Review of XRD-based Quantitative Analyses of Clay Minerals in Soils: The Suitability of Mineral Intensity Factors». *Geoderma*, vol. 109, p. 191-205.

Kirkwood, D.E. et H.W. Nesbitt. 1991. «Formation and Evolution of Soils from an Acidified Watershed: Plastic Lake, Ontario, Canada». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 55, p. 1295-1308.

Klug, H. P., et L. E. Alexander. 1954. *X-ray Diffraction Procedures*. New York : John Wiley and Sons, 716 p.

Kolka, R.K., D.F. Grigal et E.A. Nater. 1996. «Forest Soil Mineral Weathering Rates: use of Multiple Approaches». *Geoderma*, vol. 73, p. 1-21.

Koptsik, G., S. Teveldal, D. Aamild et K. Venn. 1999. «Calculations of Weathering Rate and Soil Solution Chemistry for Forest Soils in the Norwegian-Russian Border Area with the PROFILE Model». *Applied Geochemistry*, vol. 14, p. 173-185.

Langan, S.J., R. Reynolds et D.C. Bain. 1996. «The Calculation of Base Cation Release from Mineral Weathering in soils Derived from Paleozoic Greywackes and Shales in Upland UK». *Geoderma*, vol. 69, p. 275-285.

Laniz, P. V., R. E. Stevens et M. B. Norman. 1964. «Staining of Plagioclase Feldspar and other Minerals with F. D. and C. Red». *U.S. Geological Survey*, no. 2, p.p. 501-B, B152-B153.

Lauriault, Jean. 1988. *Guide d'identification des arbres du Canada*. LaPrairie (Québec) : M.Bouquet, 551 p.

Lichter, J. 1998. «Rates of Weathering and Chemical Depletion in Soils across a Chronosequence of Lake Michigan Sans Dunes». *Geoderma*, vol. 85, p. 255-282.

Likens, G.E., Driscoll C.T. et Buso D.C. 1996. «Long-term Effects of Acid Rain: Response and Recovery of a Forest Ecosystem». *Science*, vol. 272, p. 244-246.

Likens, Gene E. et F. Herbert Bormann. 1995. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Éd. de Robert C. Garber. 2^e éd. New York: Springer-Verlag, 159 p.

Lozet, Jean et Clément Mathieu. 2002. *Dictionnaire des sciences du sol*. 4^e éd. Mise à jour et augmenté. Paris: Tech.& Doc./Lavoisier, 575 p.

- Manion, P.D. 1981. *Tree disease concepts*. Englewoods Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 416 p.
- McKeague, J. A., et J. H. Day. 1966. «Dithionite- and Oxalate-Extractable Fe and Al as Aids in Differentiating Various Classes of Soils». *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 46, p. 13-22.
- Mutwewingabo, B., C.R. de Kimpe, G.A. Bourbeau, R.W. Baril et P. Lajoie. 1975. «Étude comparative de sols des Laurentides, Québec». *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 55, no. 3, p. 363-379.
- Norme CIPW. Calculation of a Norm from a Bulk Chemical Analysis. www.union.edu/PUBLIC/GEODEPT/COURSES/petrology/norms.htm. *Petrology web page*, Geology Department, Union College, Schenectady, New-York, USA. 2006.
- Olsson, Mats et Per-Arne Melkerud. 2000. «Weathering in Three Podzolized Pedons on Glacial Deposits in northern Sweden and central Finland». *Geoderma*, vol. 94, p. 149-161.
- Olsson, Mats et Per-Arne Melkerud. 1989. «Chemical and Mineralogical Changes During Genesis of a Podzol from Till in Southern Sweden». *Geoderma*, vol. 45, p. 267-287.
- Quimet, Rock et Louis Duchesne. 2005. «Base Cation Mineral Weathering and Total Release Rates from Soils in three Calibrated Forest Watersheds in the Canadian Boreal Shield». *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 85, no.2, p. 245-260.
- Quimet, Rock, Louis Duchesne, Daniel Houle et Paul A. Arp. 2001. «Critical Loads and Exceedances of Acid Deposition and Associated Forest Growth in the Northern Hardwood and Boreal Coniferous Forests in Québec, Canada». *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, vol. 1, no. 1-2, p. 119-134.
- Parker, G.G. 1990. «Evaluation of Dry Deposition, Pollutant Damage, and Forest Health with Throughfall studies». Dans Lucier, A.A et Haines, S.G. (éd.) *Mechanisms of Forest Response to Acidic Deposition*. New York: Springer-Verlag, p. 10-61.
- Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. 1996. *Précipitations acides au Québec: état de la situation*. Gouvernement du Québec, Éditeur officiel, 58 p. (disponible sur le web: www.menv.qc.ca/air/pre_acid/index.htm. 2003). 30-06-2003.
- Régnière, Jacques et Rémi Saint-Amant. 2004. *BioSIM 8.0 User's Manual*. Sainte-Foy (Québec) : Natural Ressources Canada, Canadian Forest Service-Quebec, 84 p.
- Reuss, J.O. 1983. «Implications of the Ca-Al Exchange System for the Effect of Acid Precipitations on Soil». *Journal of Environmental Quality*, vol 12, p. 591-595.

Reynolds, B., et P.A. Stevens. 1998. «Assessing Soil Calcium Depletion Following Growth and Harvesting of Sitka Spruce Plantation Forestry in the Acid Sensitive Welsh Uplands». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 2, no. 2-3, p. 345-352.

Robitaille, André et Jean-Pierre Saucier. 1998. *Paysages régionaux du Québec méridional*. Sainte-Foy (Québec) : Les Publications du Québec, 213 p.

Sandén, Per et Per Warfinge éd. 1992. *Modelling Groundwater Response to Acidification: Report from the Swedish Integrated Groundwater Acidification Project*. Coll. «Reports Hydrology», no 5. Lund (Sweden): Lund University: Department of Chemical Engineering, 186 p.

Siever, Raymond. 1952. «X-ray Diffraction Study of Rank Increase in Coal». In *On the Origin and Constitution of Coal: 2nd Conf. Proc* (18-20 juin, 1952). Nova Scotia Department of Mines, Nova Scotia Research Foundation, p. 341-362.

Simard, Julie. 2003. «Retrait glaciaire dans les Laurentides au début de l'holocène». Mémoire de maîtrise en géographie, Montréal, Université du Québec à Montréal, 155 p.

Stutter, Marc, Simon Langan et Malcolm Cresser. 2003. «Weathering and Atmospheric Deposition signatures of Base Cations in Upland Soils of NE Scotland: Their application to Critical Load Assessment». *Geoderma*, vol. 116, p. 301-324.

Sverdrup, Harald. 1996. «Geochemistry, the Key to understanding Environmental Chemistry». *The Science of the Total Environment*, vol. 183, p. 67-87.

Sverdrup, Harald U. 1990. *The Kinetics of Base Cation Release due to Chemical Weathering*. Lund: Lund University press, 245 p.

Sverdrup, H. et P. Warfvinge. 1988. «Weathering of Primary Silicate Minerals in the Natural Soil Environment in Relation to a Chemical Weathering Model». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 38, p. 387-408.

Tomlinson, G.H. 1990. «Die-Back of Red Spruce, Acid deposition and Changes in soil Nutrient Status: A Review». Dans Ulrich, B. et Pankrath, J. (éd.) *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystem. Proceedings of a Workshop held at Göttingen, West Germany, May 16-18, 1982*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, p. 331-338.

Ulrich, B. 1987. «Stability, Elasticity, and Resilience of Terrestrial Ecosystems with Respect to matter balance». Dans Schulze, E.D. et Zwölfer, H. (éd.) *Ecological Studies*. Berlin: Springer-Verlag, p. 11-49.

Ulrich, B. 1983. «A concept of Forest Ecosystem Stability and of Acid Deposition as driving force for Destabilization». Dans Ulrich, B. et Pankrath, J. (éd.) *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystem. Proceedings of a Workshop held at Göttingen, West Germany, May 16-18, 1982*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, p. 1-29.

- Van Der Salm, Caroline. 2001. «Assessment of the Regional Variation in Weathering Rates of Loess and Clay soils in the Netherlands». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 131, p. 217-243.
- Voïnovitch, Igor A. et A. Baron. 1971. *L'analyse minéralogique des sols argileux*. Coll. «Laboratoire central des ponts et chaussées». Paris : Eryolles, 93 p.
- Watmough, Shaun A. et Peter J. Dillon. 2003. «Base Cation and Nitrogen Budgets for seven Forested Catchments in Central Ontario, 1983-1999». *Forest Ecology and Management*, vol. 177, p. 155-177.
- Warfvinge, Per et Harald Sverdrup. 1995. *Critical Loads of Acidity to Swedish Forest Soils: Methods, data and results*. Éd. de Harald Sverdrup. Coll. «Reports in Ecology and Environmental Engineering», Report 5: 1995. Lund (Sweden): Lund University: Department of Chemical Engineering II, 104 p.
- Webmineral.com. Mineralogy Database, X Ray Spacing. <http://webmineral.com/X-Ray.shtml>. 2000-2005.
- Wessenlink, L.G., G. Grosskurth et J.J.M. van Grinsven. 1994. «Measuring and Modelling Mineral Weathering in an Acid Forest Soil, Solling, Germany». Dans Bryant, R.B. et R.W. Arnold (éd.) *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*. Soil Science of America Special Publication 39: Madison, p. 91-110.
- Wilson, M.J. 1986. «Mineral weathering processes in podzol soils on granitic materials and their implications for surface water acidification». *Journal of the Geological Society*, London, vol. 143, p. 691-697.
- Wolt, J.D. 1990. « Effects of Acidic Deposition on the Chemical Form and Bioavailability of Soil Aluminium and Manganese. Dans Lucier, A.A et Haines, S.G. (éd.) *Mechanisms of Forest Response to Acidic Deposition*. New York: Springer-Verlag, p. 62-107.
- Yin, Xiwei et Paul A. Arp. 1993. «Predicting Forest Soil Temperatures from Monthly Air Temperature and Precipitation Records». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 23, p. 2521-2536.