

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mémoire présenté à

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

comme exigence partielle à l'obtention
de la Maîtrise ès Sciences (Eau)

par

MARTIN DUCHESNEAU

ÉCHANGE NEIGE-ATMOSPÈRE ET PROFIL PHYSICO-CHIMIQUE
DE LA NEIGE EN PÉRIODE FROIDE (< 0° C)

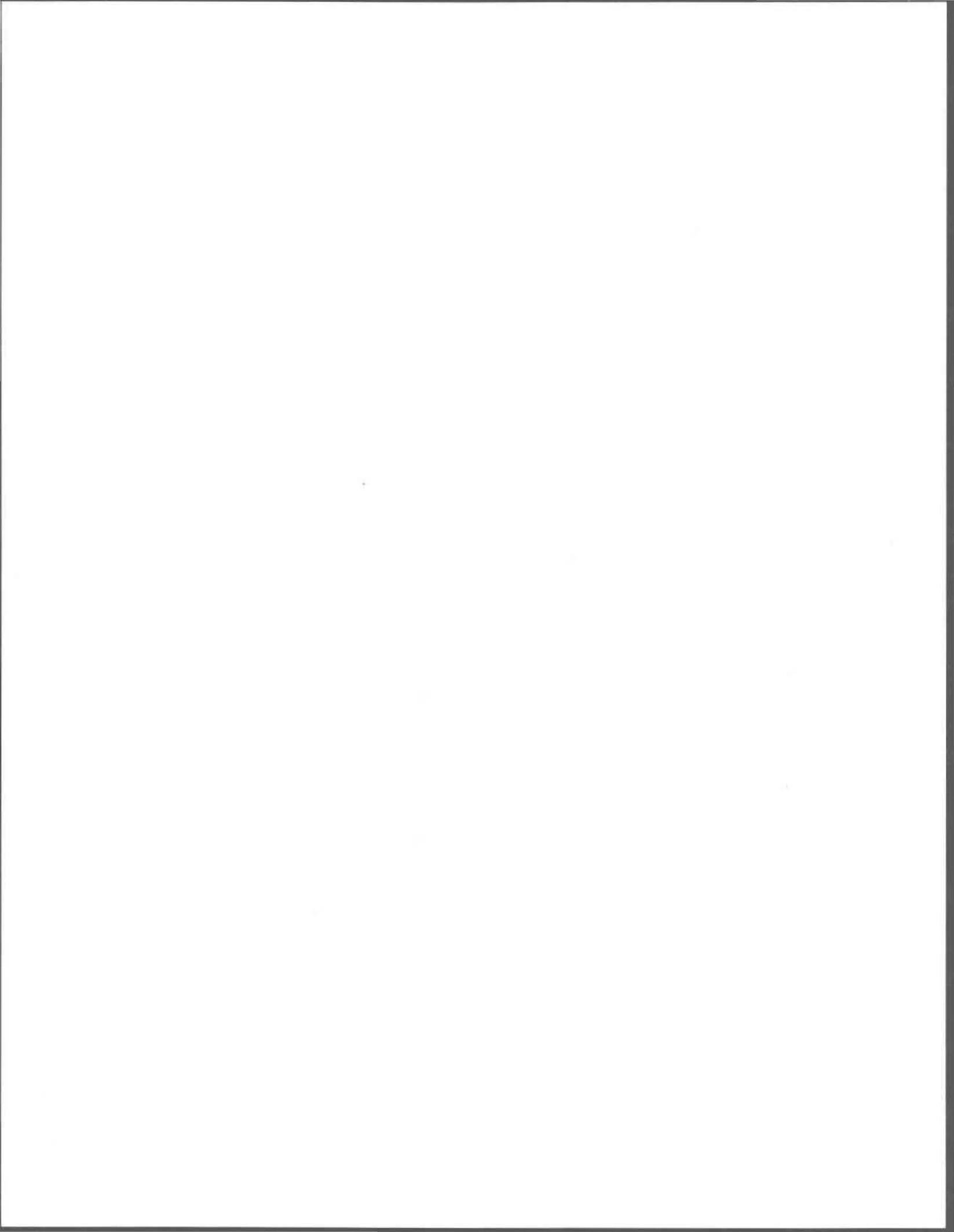
AOÛT 1993



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, monsieur Gérald H. Jones, pour son expertise scientifique et son support matériel tout au long de cette étude.

Je tiens aussi à remercier mes parents et mes deux soeurs pour leur coup de main lors des expériences au lac Laflamme et dans la chambre froide, des mercis aussi à monsieur Claude Laberge pour son aide en statistique, aux Forces Canadiennes pour le matériel qu'ils m'ont prêté généreusement, la Commission Géologique du Canada (Dr R.M. Koerner, Dr R. Dubey et J. Bourgeois) pour leurs conseils et l'Étude du Plateau Continental Polaire (EPCP) d'Énergie, Mines et Ressources Canada pour mes expéditions dans l'Arctique Canadien.



RÉSUMÉ

Cette recherche porte sur l'étude des profils physico-chimiques, sur les interactions possibles à l'interface neige-atmosphère et sur la conceptualisation et la fabrication d'un simulateur physique de couvert nival.

Dans la première partie, les études préliminaires au lac Laflamme visaient le développement de la méthodologie sur le terrain. Notre étude nous a menés à choisir des sacs en mailles de polyéthylène et de polypropylène au lieu de ceux de Nylon qui pourraient biaiser nos résultats. Les résultats nous montrent la présence d'acide nitrique gazeux dans les espaces d'air interstitiels lors du métamorphisme des cristaux de neige.

Dans la deuxième partie, les études étaient séparées en deux étapes; l'étude des profils physico-chimiques et la mesure des flux des espèces chimiques à l'interface neige-atmosphère. Ces études ont été faites sur la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, Territoires du Nord-Ouest.

Nos résultats montrent pour les profils physico-chimiques une variation saisonnière où l'on retrouve les concentrations les plus élevées en hiver et les plus faibles en été. Pour la mesure des flux à l'interface neige-atmosphère, on obtient comme résultat aucune perte d'espèces chimiques vers l'atmosphère mais des gains nets probablement dus aux dépôts secs. On a mesuré la vitesse de dépôt sec du nitrate et du sulfate. Pour le sulfate, on retrouve des vitesses semblables à celles trouvées par d'autres chercheurs. Pour le nitrate, nos vitesses mesurées sont plus faibles. Nous avons attribué cette baisse à une possibilité de réémission d'acide nitrique lors du métamorphisme des cristaux de neige ou à des réactions photochimiques à l'interface neige-atmosphère.

Pour la troisième partie, l'étude portait sur le simulateur de couvert nival au laboratoire. Nos résultats montrent qu'il y a eu du métamorphisme des cristaux de neige lorsqu'on a appliqué un gradient de température de $-30^{\circ} \text{C m}^{-1}$. Les résultats démontrent aussi une possibilité de migration des espèces chimiques dans le couvert nival mais aucune perte vers l'atmosphère.

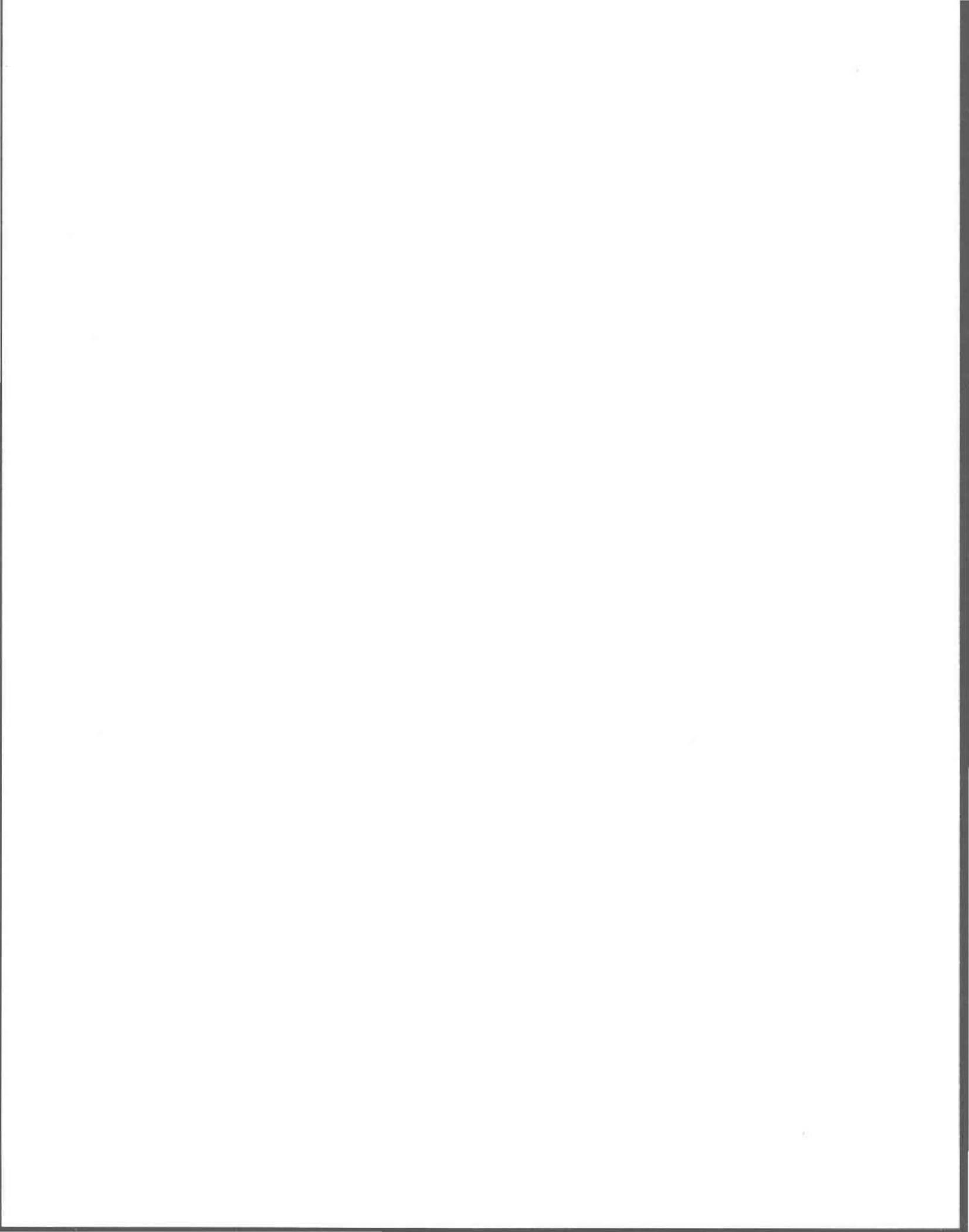


TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ.....	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES ANNEXES	xi
I. INTRODUCTION.....	1
1. PHYSICO-CHIMIE DE LA NEIGE ET DE LA GLACE.....	1
1.1 Dépôts humides.....	2
1.2 Dépôts secs.....	4
1.2.1 Taux de dépôts secs.....	6
1.3 Processus physiques et chimiques dans le couvert ni- val et à l'interface neige-atmosphère.....	7
1.3.1 Métamorphisme.....	8
2. ARCTIQUE CANADIEN	10
2.1 Pollution atmosphérique.....	10
2.2 Profils physico-chimiques de la neige.....	12
II. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	15
1. OBJECTIF AU LAC LAFLAMME	15
2. OBJECTIFS SUR LA CALOTTE DE GLACE AGASSIZ.....	16
3. OBJECTIFS SUR LE SIMULATEUR DE COUVERT NIVAL	17
III. MÉTHODOLOGIE.....	19
1. EXPÉRIENCES AU LAC LAFLAMME.....	19

1.1	Description du site	19
1.2	Homogénéisation de la neige	19
1.3	Emplacement des sacs en mailles	21
1.4	Conservation des échantillons	22
1.5	Fonte des échantillons	22
1.6	Filtration des échantillons.....	23
1.7	Expérience sur l'équilibre des pressions partielles de l'acide nitrique dans la neige.....	23
2.	EXPÉRIENCES SUR LA CALOTTE DE GLACE AGASSIZ.....	24
2.1	Description du site	24
2.2	Mesures du profil physico-chimique.....	26
2.2.1	Prélèvement des échantillons de neige.....	26
2.3	Mesure des flux d'ions à l'interface neige-atmosphère: influence de la radiation solaire	26
2.3.1	Homogénéisation de la neige.....	26
2.3.2	Emplacement des sacs en mailles.....	27
2.4	Conservation des échantillons.....	28
2.5	Fonte des échantillons.....	28
3.	EXPÉRIENCES AVEC LE SIMULATEUR DE COUVERT NIVAL.....	29
3.1	Conception et fabrication du simulateur de couvert nival.....	29
3.2	Système d'analyse d'air	30
3.3	Homogénéisation de la neige	33
3.4	Températures dans le simulateur de couvert nival.....	33

3.5	Circulation de l'air dans le système.....	35
3.6	Prélèvement des échantillons.....	36
3.7	Fonte des échantillons	36
4.	ANALYSES.....	36
4.1	Mesure de conductivité	36
4.2	Mesure de pH.....	37
4.3	Dosage des anions	37
4.4	Dosage des cations	37
4.5	Dosage de l'ammoniaque	38
IV.	RÉSULTATS ET DISCUSSION	45
1.	RÉSULTATS DU LAC LAFLAMME	45
1.1	Bilans ioniques de la neige.....	45
1.2	Mesure des flux d'ions.....	45
1.3	Résultat de l'expérience sur l'équilibre des pressions partielles de l'acide nitrique dans la neige.....	47
1.4	Sacs en mailles de polyéthylène et de polypropylène ...	49
2.	RÉSULTATS DE LA CALOTTE DE GLACE AGASSIZ.....	49
2.1	Stratigraphie des tranchées de neige.....	50
2.2	Profils physico-chimiques.....	50
2.3	Mesures des flux d'ions à l'interface neige- atmosphère.....	59
2.3.1	Expériences de 1990	59
2.3.2	Expériences de 1991	60
2.3.2.2	Vitesse de dépôts secs.....	68
3.	RÉSULTATS DU SIMULATEUR DE COUVERT NIVAL.....	71

3.1 Analyse des filtres en Téflon et en Nylon	71
3.2 Évolution physico-chimique des strates nivales dans le simulateur de couvert nival.....	71
3.3 Échanges neige-atmosphère	74
3.4 Migration dans le couvert nival.....	75
V. CONCLUSION.....	79
VI. BIBLIOGRAPHIE.....	81

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex Autolon 12.	39
TABLEAU 2: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex séries 2000i.	40
TABLEAU 3: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex 300 DX (anions).	41
TABLEAU 4: Caractéristiques d'opération du spectrophotomètre d'ab- sorption atomique à la flamme Varian AA-20.....	42
TABLEAU 5: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex 300 DX (cations).	43
TABLEAU 6: Méthodes d'analyses physico-chimiques des échantillons d'eau de fonte.....	44
TABLEAU 7: Concentrations des ions dans les sacs en Nylon pour les expériences s'échelonnant dues 22 décembre 1988 au 1 février 1989 au lac Laflamme.....	46
TABLEAU 8: Résultats de l'expérience sur l'équilibre des pressions par- tielles de l'acide nitrique dans la neige.....	48
TABLEAU 9: Concentrations des anions dans les sacs en mailles au début (16 mai 1991) et à la fin (22 mai 1991) de l'expé- rience à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere.....	61
TABLEAU 10: Concentrations des cations dans les sacs en mailles au début (16 mai 1991) et à la fin (22 mai 1991) de l'expé- rience à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere.....	62

TABLEAU 11: Apports et flux nets des espèces anioniques calculés à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, mai 1991.	66
TABLEAU 12: Apports et flux nets des espèces cationiques calculés à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, mai 1991.	67
TABLEAU 13: Vitesses de dépôts secs (Vd) calculées à la calotte de glace Agassiz en mai 1991 et celles rapportées dans la littérature; concentration des anions dans l'atmosphère arctique.....	69
TABLEAU 14: Concentrations moyennes des anions à différents niveaux du couvert nival pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 29 janvier au 9 février 1993.....	72
TABLEAU 15: Concentrations moyennes des anions à différents niveaux du couvert nival pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 12 mars au 29 mars 1993...	73
TABLEAU 16: Concentrations des anions au début des expériences dans le simulateur de couvert nival.	74

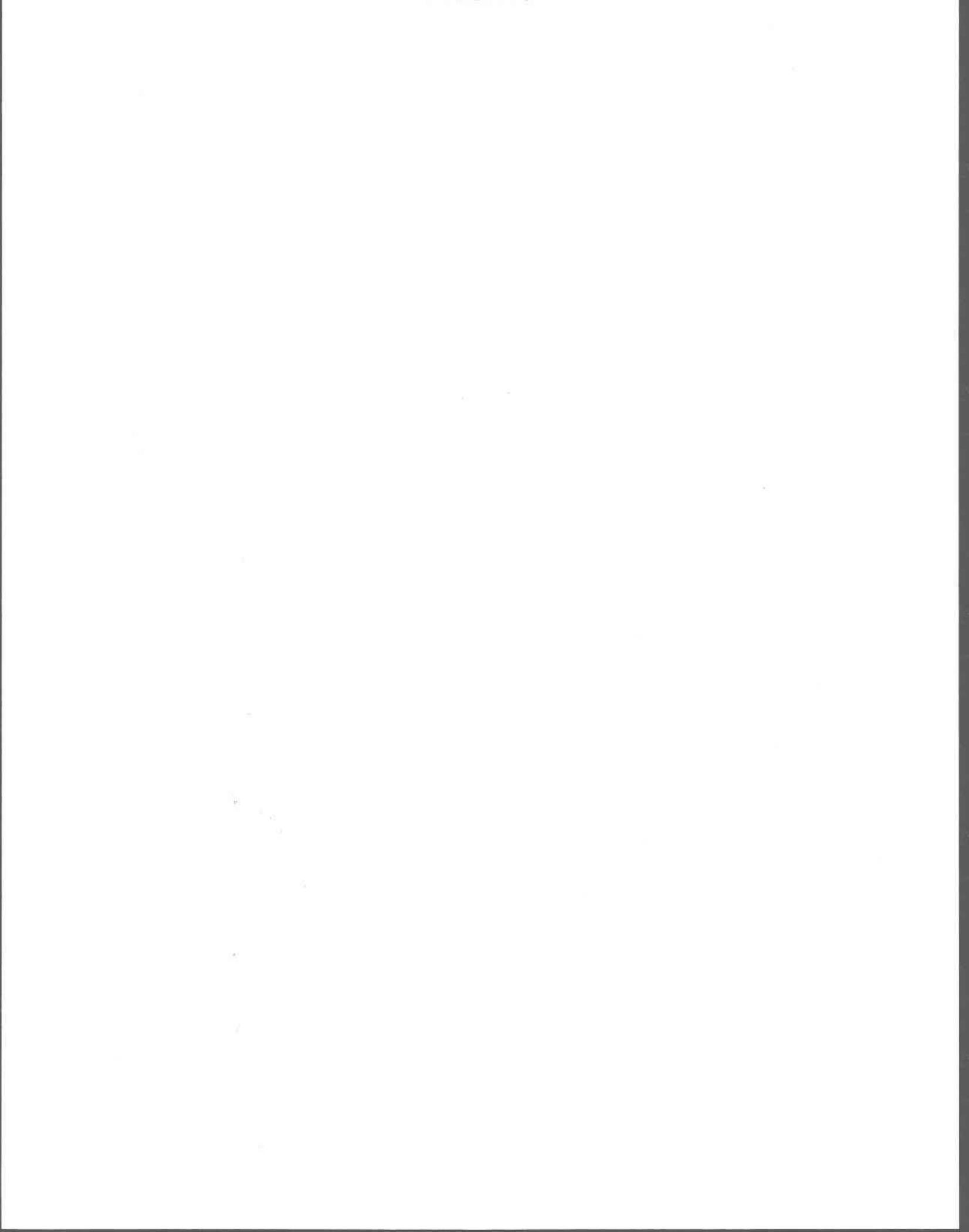
LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: Localisation du bassin versant du lac Laflamme (tiré de Pa- pineau 1988).....	20
FIGURE 2: Localisation de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, Territoires du Nord-Ouest (tiré de la carte 900A, 35e éd., 1985, Principales régions minières du Canada).	25
FIGURE 3: Schéma du simulateur de couvert nival vu de côté.....	31
FIGURE 4: Schéma du simulateur de couvert nival vu de haut.	32
FIGURE 5: Concentrations des anions (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chi- miques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, mai 1990.....	51
FIGURE 6: Concentrations des anions (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chi- miques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au sud du campement, mai 1991.....	52
FIGURE 7: Concentrations des cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils phy- sico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesme- re, site au sud du campement, mai 1991.....	53
FIGURE 8: Concentrations des anions (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chi- miques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au nord du campement, mai 1991.....	55

FIGURE 9: Concentrations des anions (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au nord du campement, mai 1991.....56

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue recueillis dans les tranchées du site au sud du campement pour la mesure du profil physico-chimique en mai 1991.....	87
ANNEXE 2: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue recueillis dans les tranchées du site au nord du campement pour la mesure du profil physico-chimique en mai 1991.....	97
ANNEXE 3: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour la mesure des flux d'ions à l'interface neige-atmosphère en mai 1991.....	107
ANNEXE 4: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue recueillis dans les tranchées du site au nord du campement pour la mesure du profil physico-chimique en mai 1990.....	114
ANNEXE 5: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour la mesure des flux d'ions à l'interface neige-atmosphère en mai 1990.....	119
ANNEXE 6: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 29 janvier au 9 février 1993.....	122
ANNEXE 7: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 12 mars au 29 mars 1993.....	124
ANNEXE 8: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour la mesure des flux d'ions au Lac Laflamme 1988-1989.....	126



I. INTRODUCTION

1. PHYSICO-CHIMIE DE LA NEIGE ET DE LA GLACE

La composition chimique de la neige et de la glace s'avère de plus en plus importante dans les études environnementales et paléoécologiques des régions enneigées circumpolaires et polaires. D'une part, les études sur la chimie de la neige nous permettent de comprendre certains processus physico-chimiques atmosphériques; elles nous renseignent de plus sur l'importance de la neige comme source d'éléments nutritifs dans les cycles biogéochimiques des écosystèmes circumpolaires.

Toutefois, la plupart des recherches entreprises sur la chimie de la neige et de la glace comprenaient seulement les analyses des diverses espèces chimiques; il y a eu que très peu d'études sur la dynamique (cinétique) des processus chimiques de la neige ou de la glace. La question de la dynamique des processus chimiques de la neige et de la glace est extrêmement importante. Car si la prémisse que les espèces chimiques une fois incorporée dans la neige sont stables, s'avère fausse, on peut remettre en question les conclusions de plusieurs études écologiques et paléoécologiques sur la neige et la glace en milieu polaire. Cette thèse aborde cette problématique de la chimie de la neige et de la glace par la voie d'une série d'expériences conçues pour cette fin. Afin de mieux situer le contexte de ces

travaux, les deux sections suivantes résumant l'état des connaissances sur la chimie de la neige et sur les conditions atmosphériques de l'Arctique Canadien comme lieu principal de l'étude.

1.1 Dépôts humides

La pluie, la neige et le brouillard sont considérés comme des dépôts humides. Les espèces chimiques que l'on retrouve dans les cristaux de neige peuvent provenir de trois origines différentes: nucléation, lessivage dans les nuages et lessivage au-dessous des nuages (Davidson 1989).

La nucléation survient par deux méthodes. Une première, est que des nucléis hygroscopiques (particules de sulfates) peuvent servir de centre de croissance de gouttelettes d'eau en surfusion. Les nuages peuvent contenir des gouttelettes d'eau jusqu'à des températures de -30°C . Ce procédé sera donc important même dans les régions polaires. La deuxième, est que si les températures sont suffisamment froides, des gouttelettes d'eau formées par condensation s'évaporent lentement. La vapeur d'eau en résultant se diffuse dans des nucléis non-hygroscopiques (aérosols dérivés de l'érosion de la croûte terrestre) déjà cristallisés. Une fois la nucléation commencée, les nucléis résultant peuvent croître pour former des gouttes d'eau ou des flocons de neige.

Le lessivage dans les nuages se produit lorsque des gaz, des aérosols ou des particules rentrent en contact avec des gouttes d'eau ou des cristaux de neige déjà formés et qu'ils sont adsorbés ("rain-out").

Le lessivage au-dessous des nuages se fait lorsqu'il y a des précipitations. Le mécanisme est le même que le lessivage dans les nuages. Ce lessivage se considère souvent comme un mécanisme de nettoyage de l'atmosphère (Chang 1984) ("wash-out").

Le taux de lessivage des espèces chimiques par la neige est plus grand que celui de la pluie. Il peut être 5 fois plus grand pour les nitrates et les nitrites et 3 fois pour l'ammoniaque (Gilbert et Hayes 1983, Levine et Schwartz 1982). L' $\text{HNO}_3(\text{g})$ se lessive rapidement de l'atmosphère par les précipitations de neige. Ce processus a lieu à une vitesse 5 fois plus grande que l'incorporation d'aérosols de NO_3^- et SO_4^{2-} dans la neige (Huebert et al. 1983). Le taux de lessivage dépendra du type de précipitation et des conditions météorologiques (température, vitesse du vent).

Donc la composition chimique des précipitations va dépendre de l'origine des masses d'air. Les masses d'air provenant de régions fortement industrialisées rendront la neige plus acide en raison de la présence d'acides forts tels que HNO_3 et H_2SO_4 résultant de la combustion de carburants fossiles (production de NO_2 et de SO_2). Les masses d'air maritime se caractérisent par une plus grande concentration de sels marins (Cl^- et Na^+).

1.2 Dépôts secs

Les dépôts secs sont définis comme des apports d'espèces à la surface en l'absence de précipitation. Les dépôts secs peuvent contribuer jusqu'à 80 % des apports totaux dans la neige au sol (Cadle et al. 1987). Dans la région de Québec, par exemple, leurs apports sont équivalents à celui des dépôts humides. Les dépôts sont sous forme d'aérosols, de gaz et de matières particulaires. Toutefois il faut considérer les dépôts secs comme un processus global d'échange neige-atmosphère: des gaz peuvent être adsorbés par le couvert nival et être réémis, tandis que des aérosols ou des matières particulaires peuvent se déposer pour être resuspendus. Donc les dépôts secs sont le résultat de l'équilibre entre les échanges neige-atmosphère.

Les dépôts secs de gaz à l'état de trace représentent un processus complexe impliquant le transport de réactifs (oxydes de soufre et d'azote, oxydants et autres composés chimiques) à la surface du couvert nival, la diffusion vers le couvert nival, l'adsorption et l'absorption à l'interface air-grains de neige et dans certains cas, impliquant une réaction chimique pour produire des composés oxydés. N'importe laquelle de ces étapes peut être limitante pour le processus entier (Bales et al. 1987).

Le taux de dépôts secs s'exprime comme une vitesse de dépôt ou un flux divisé par la concentration atmosphérique à une hauteur de référence. Sur le terrain, la résistance totale au dépôt sec, r , est donnée (dans sa for-

mulation la plus simple) par la somme des résistances de surface, r_s et la résistance aérodynamique, r_a , représentant la résistance au transfert de gaz vers la surface.

$$r = r_s + r_a \quad (\text{s cm}^{-1}) \quad (1)$$

La vitesse de dépôt sec, V_d , sera l'inverse de r .

$$V_d = (r_s + r_a)^{-1} \quad (\text{cm s}^{-1}) \quad (2)$$

La résistance aérodynamique typique peut être déterminée par la vitesse de dépôt sec d'un gaz qui s'adsorbe facilement, exemple HNO_3 sur une surface. Pierson et al. (1986) ont trouvé une vitesse de $0,26 \text{ cm s}^{-1}$ pour HNO_3 pour une surface humide durant des heures de nuit stable. Par contre, une valeur proche de 5 cm s^{-1} s'approprie plus pour des conditions de jours instables (Huebert, 1983). Ces résultats donnent l'étendue de la résistance aérodynamique que l'on peut rencontrer sur le terrain de 5 à $0,2 \text{ cm s}^{-1}$.

Pour un gaz moins soluble comme le SO_2 , la résistance de surface devrait dominer dans la plupart des cas où les conditions atmosphériques sont stables. Dans une étude effectuée dans le nord du Michigan, Cadle et al. (1985) rapportent une vitesse de dépôt sec moyenne de $0,15 \text{ cm s}^{-1}$ pour le SO_2 avec un taux de dépôt élevé à des températures supérieures à -3° C . Les résistances totales dans ces cas sont de $6,7$ et $16,7 \text{ s cm}^{-1}$ res-

pectivement, indiquant clairement l'importance de la résistance de surface pour le SO₂. Des valeurs de Vd élevées pour des températures plus chaudes proches du point de congélation sont dues à un contenu en eau liquide plus élevé dans la neige.

La vitesse de dépôt sec va donc varier selon que la résistance aérodynamique de surface change. Une augmentation de température aura pour effet d'augmenter les vitesses de dépôt tandis qu'un vieillissement de la neige ou une neige métamorphisée complètement entraînera des valeurs de Vd plus petites car la surface des cristaux de neige aura diminué.

1.2.1 Taux de dépôts secs

Nous obtiendrons le taux de dépôt sec à partir de cette équation:

$$F = Vd \times C \times t \times 100 \quad (3)$$

- où
- F flux net ou taux de dépôt sec quotidien ($\mu\text{g m}^{-2} \text{J}^{-1}$);
 - C concentration atmosphérique du composé chimique ($\mu\text{g m}^{-3}$);
 - Vd vitesse de dépôt sec (cm s^{-1});
 - t temps en secondes pendant 24 heures (J).

1.3 Processus physiques et chimiques dans le couvert nival et à l'interface neige-atmosphère

Jusqu'à tout dernièrement, les chercheurs étaient de l'avis qu'il y avait conservation des espèces chimiques une fois incorporés dans le couvert nival. Une recherche dans la littérature révèle, par contre, que cette pré-misse de la conservation des espèces dans le couvert nival ne s'est jamais démontrée par des expériences conçues à cette fin. De récents travaux ont démontré toutefois que d'autres processus physiques et météorologiques pouvaient provoquer des changements dans la composition chimique des cristaux. Par exemple, le vent induit des changements dans la composition de la neige en mouvement (Pomeroy et al. 1991). D'autres chercheurs (Neubauer et Heumann 1988) ont aussi suggéré que les espèces azotées de la surface du couvert nival pourraient subir des transformations photochimiques ($\text{HNO}_3 \rightarrow \text{NO}_2$) à la lumière du jour ou par l'interaction entre ces composés et les photo-oxydants (O_3 , H_2O_2) présents dans la neige (Nef-tel et al. 1987).

De plus, la présence de la vapeur HNO_3 dans les espaces intersti-tiels du couvert nival et le mouvement de la vapeur d'eau entre les cristaux pendant les processus de métamorphisme (Colbeck 1987) pourraient aussi amener une perte de HNO_3 due à un gradient de concentration de cette es-pèce entre la neige et l'atmosphère à l'interface. Des pertes pourraient sur-venir en raison de fontes géothermiques (Jones et Stein 1990) et de plus, sous certaines conditions météorologiques, des pertes de gaz et d'aérosols

peuvent survenir à la surface du couvert nival (Delmas et Jones 1987). Il peut y avoir des pertes aussi vers le sol par migration sans qu'il y ait de fonte (Jeffries et Snyder 1981). La perte d'espèces chimiques pourrait aussi survenir du couvert nival durant des périodes froides attribuables aux rejets d'aérosols et de gaz durant le métamorphisme de la neige (Jones et Bisson 1984). D'autres auteurs ont rapporté qu'il n'y avait aucune perte ou gain des espèces chimiques dans le couvert nival. Toutefois, une migration verticale des ions NO_3^- et SO_4^{2-} entre les strates de neige peut se produire sous l'influence du métamorphisme constructif (Hogan et al. 1985). Finalement, certains auteurs ont considéré que la perte de NO_3^- qu'ils ont observée dans les strates du couvert nival en période froide serait aussi le résultat du transport et de la réémission de HNO_3 durant le métamorphisme constructif (Jones et Laberge 1988).

1.3.1 Métamorphisme

Du point de vue physique, le métamorphisme des cristaux de neige en grains de neige en période froide pourrait représenter le principal processus influençant la composition chimique de la neige. Les cristaux de neige ont un rapport surface sur volume (S/V) très élevé ce qui les rend thermodynamiquement instables. Les cristaux auront tendance à atteindre l'équilibre en diminuant ce rapport, la forme idéale serait une sphère où le rapport S/V est au minimum (Jones et Stein 1990).

L'arrondissement des cristaux de neige, pour donner des grains de neige, s'accomplit par la sublimation en vapeur d'eau depuis la surface convexe des cristaux de neige qui conduit à la condensation de ces vapeurs d'eau à la surface concave. Les gros grains de neige vont croître aux dépens des plus petits grains de neige dans leurs environnements immédiats. En même temps, des ponts de glace vont se former aux points de contacts des cristaux de neige ("sintering"). Ce procédé s'appelle "métamorphisme destructif " car il détruit la forme initiale des cristaux de neige. Ce procédé a lieu seulement lorsque la température de la neige est uniforme. La vitesse de métamorphisme est assez rapide (24-48 h) près de 0° C et complètement nulle à - 40°C.

Si un gradient de température s'établit dans le couvert nival, la vapeur d'eau va être transportée des régions plus chaudes du couvert nival aux régions plus froides, où la recristallisation aura lieu. Ce procédé s'appelle " métamorphisme constructif " (Colbeck 1987).

Le processus de métamorphisme pourrait donc donner lieu au rejet des aérosols adsorbés à la surface des cristaux de neige ainsi qu'à la ré-émission des gaz adsorbés. Une possibilité lors du métamorphisme est que des aérosols et de la matière particulaire (de densité plus élevée que l'air) se redistribuent vers des cristaux de neige inférieurs (i.e. près de l'interface neige-sol) et que des gaz (de densité plus faible que l'air) s'expulsent par compaction vers des cristaux supérieurs (i.e. près de l'interface neige-air).

Une autre possibilité est que les aérosols, la matière particulaire et les gaz se redistribuent à l'intérieur même des grains de neige; Mulvaney et al. (1988) prétendent que les aérosols pourraient être redistribués comme une fine couche (film) à l'intérieur des grains de neige, surtout dans les interfaces à triple jonction. Plusieurs autres possibilités de redistribution existent; par contre, aucune étude à ce jour n'a porté sur la détermination du degré de transformation ou de redistribution des espèces chimiques dans la neige dû à ces deux processus de métamorphisme de la neige.

2. ARCTIQUE CANADIEN

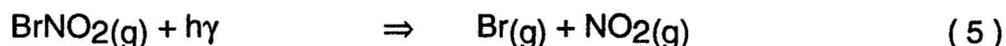
2.1 Pollution atmosphérique

Depuis le milieu des années 1970, la pollution atmosphérique dans l'Arctique Canadien a été beaucoup étudiée (Barrie et Barrie 1990, Barrie 1986). Cette pollution atmosphérique résulte du transport circumpolaire à longue distance des polluants à partir de l'Amérique du Nord, de l'Europe et plus particulièrement de la Sibérie. Les polluants ayant un taux de résidence dans l'atmosphère plus élevé durant la période où il fait noir et où les températures sont plus basses. Cette pollution s'est accrue depuis les années 1950 à cause de l'activité industrielle croissante.

Les recherches se sont surtout concentrées sur la période de mars à mai où l'on passe de la nuit complète au jour complet dans l'Arctique Canadien (Finlayson-Pitts et al. 1990, Barrie et al. 1988, Barrie et al. 1985). Du-

rant cette période, la composition atmosphérique subit un changement important dû aux processus photochimiques. L'ozone, le brome, les oxydes de soufre (Barrie et Hoff 1985) et les oxydes d'azote (Barrie et al. 1989) en particulier seront affectés par ces processus photochimiques.

Par exemple, de récentes études ont démontré qu'à Alert (82,5° Nord, 62,3° Ouest), Île d'Ellesmere, la concentration d'ozone au niveau du sol tombait de 30-40 ppb à presque 0 ppb en l'espace de quelques heures à quelques jours. En même temps, la concentration du bromure croissait, dont 50 % et plus de cette croissance s'attribue à des gaz tel que HBr (Finlayson-Pitts et al. 1990, Barrie et al. 1988, Sturges et Barrie 1988). Une des explications proposées serait que le brome venant de source marine (NaBr(s)) détruirait l'ozone selon les réactions chimiques suivantes:



L'étude cinétique faite par Finlayson-Pitts et al. (1990) est capable d'expliquer la baisse d'ozone en quelques heures et l'apparition du bromure. Mais aucune étude ne mentionne le dépôt du brome (ex.: HBr) dans la neige de l'Arctique, seulement de sa présence dans l'air. Donc, est-ce que le brome (ex.: HBr) serait impliqué dans d'autres réactions ou diffuserait plus haut dans l'atmosphère?

2.2 Profils physico-chimiques de la neige

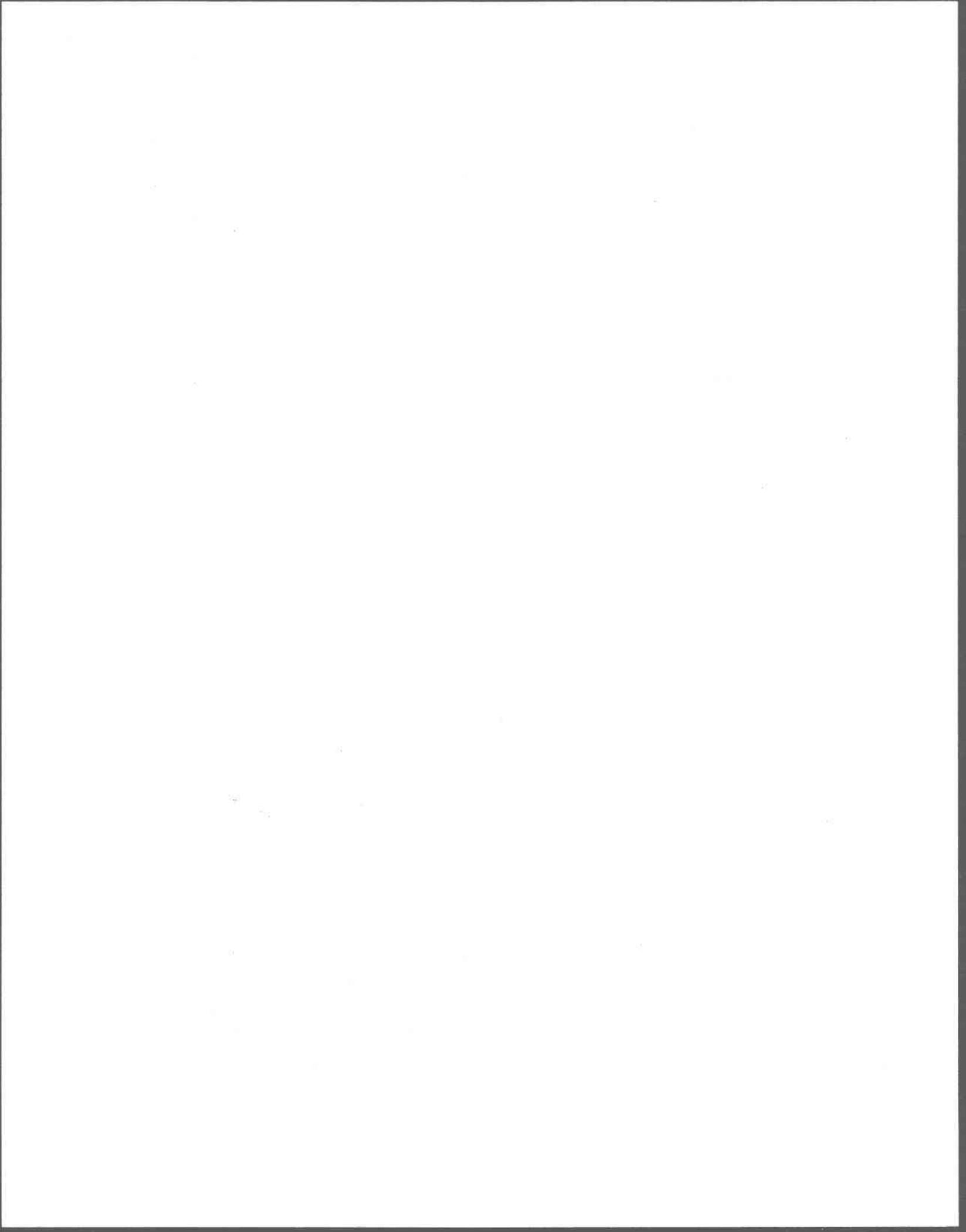
Tel que mentionné ci-haut, les glaciers sont une source majeure d'informations sur l'histoire de la pollution atmosphérique dans l'Arctique (Wolff et Peel 1985). Car les concentrations trouvées dans la neige dépendent de la concentration atmosphérique originelle constituée des aérosols et des gaz. Donc, les glaciers renfermeront des informations importantes portant sur les changements climatiques, les événements volcaniques, les activités solaires et aussi des effets de l'activité de l'homme. Ces informations peuvent dater de plusieurs milliers d'années à plusieurs dizaines de milliers d'années dépendant de l'âge du glacier.

L'étude faite par Koerner et Fischer (1982) sur la calotte de glace Agassiz avec une carotte de glace prise de la surface jusqu'à la base du glacier de 377 m de long démontre un accroissement de l'acidité de la neige depuis les 25 dernières années. Ils en concluent que cette augmentation d'acidité de la neige est due à l'augmentation de l'acidité dans l'atmosphère au-dessus du glacier, et que cet accroissement d'acidité atmosphérique serait probablement dû à l'augmentation de l'acidité des sources anthropogéniques.

D'autres carottes de neige de 10 m de long ont aussi été prises. Les résultats démontrent que la conductivité, ainsi que l'acidité, subit une variation saisonnière. Des concentrations plus élevées se produisent vers la fin

de l'hiver et le début du printemps. Une variation saisonnière similaire se retrouve aussi au Groenland (Langway et al. 1977). Ces fluctuations se produisent parallèlement aux variations de la pollution atmosphérique qui atteignent leur maximum d'intensité de décembre à avril de chaque année.

D'autres études démontrent l'accroissement de polluants organiques (organochlorés et BPC; Gregor et Gummer 1989) dans l'Arctique Canadien, ces polluants qui ne peuvent à eux seuls s'expliquer par la présence de sources locales (ex: source marine). La seule source raisonnable de ces composants organiques serait le transport atmosphérique à longue distance. Ces composants qui s'accumulent durant l'hiver risquent de se retrouver dans les rivières et les lacs pendant la période de fonte. L'accumulation globale de ces composés toxiques par les biota reste inconnue, mais devrait être significative due à la très grande superficie géographique impliquée et les caractéristiques de fonte rapide dans l'Arctique. Donc l'impact majeur de ces polluants organiques sera sur les indigènes qui se nourrissent majoritairement de produits naturels.



II. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les travaux expérimentaux du terrain ont été entrepris à deux sites; le lac Laflamme, Québec et la calotte de glace Agassiz, Territoires du Nord-Ouest. Les études préliminaires au lac Laflamme visaient principalement le développement de la méthodologie des expériences sur le terrain (voir chapitre III, section 1) tout en poursuivant la validation de deux hypothèses sur les processus physico-chimiques dans le couvert nival.

1. OBJECTIF AU LAC LAFLAMME

Cette étude visa à valider deux hypothèses sur les processus responsables de la perte d'une espèce chimique (NO_3^-) dans le couvert nival en périodes froides. Le choix de NO_3^- relève de son importance dans les processus physico-chimiques atmosphériques et dans le bilan nutritif de neige du cycle biogéochimique de N. La première hypothèse stipule que l'acide nitrique se libère sous forme de vapeur pendant le métamorphisme physique des cristaux de neige. Cette hypothèse est justifiable à des températures basses où il n'y a pas de mince couche d'eau à la surface des cristaux de neige. Sinon l'acide nitrique se réabsorberait par cette couche d'eau. Par la suite, il y a une translocation de cette espèce chimique vers le sol ou vers l'atmosphère. Cette migration se lierait aux réactions avec d'autres aérosols et matières particulaires, à la pression partielle élevée du CO_2 en provenance du sol ou aux gradients verticaux de physico-chimie et de tem-

pérature. Ces derniers seraient le résultat d'adsorption de HNO_3 sur la végétation à la surface du sol et les concentrations de HNO_3 à l'interface neige-atmosphère.

La deuxième hypothèse postule que les réactions photochimiques provoquées par l'irradiation solaire sur la surface des cristaux de neige dégradent HNO_3 en gaz ayant une faible solubilité dans la glace, et donc volatiles. Le produit majeur de cette réaction serait NO_2 (Neubauer et Heumann, 1988). Par rapport à la première hypothèse, ce processus serait surtout limité à la surface du couvert nival.

Cette étude s'inscrit dans une suite logique des travaux de Jones (1988) sur l'évolution physico-chimique du couvert nival au lac Laflamme. L'objectif fut donc le suivant:

1. Déterminer la direction des flux de HNO_3 dans le profil vertical du couvert nival.

2. OBJECTIFS SUR LA CALOTTE DE GLACE AGASSIZ

Les expériences faites sur la calotte de glace Agassiz sont en continuité avec celles entreprises au lac Laflamme. Ce site a été choisi car il y a très peu de fonte (aucune durant le mois d'étude concerné), qu'il y a ensoleillement sur 24 heures (conditions d'irradiation solaire très élevée) et aucune contamination possible par la végétation. Beaucoup de travaux portent

sur la qualité de l'air et des aérosols dans l'Arctique Canadien, et sur l'acidité et la conductivité du couvert nival mais très peu sur les autres espèces ioniques trouvées dans le couvert nival. Le projet vise donc les objectifs suivants:

1. Déterminer la variabilité saisonnière des concentrations des espèces résultant d'acidité forte (SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^-) dans le profil physico-chimique de la calotte glaciaire;
2. Mesurer les flux de ces anions du couvert de neige sous diverses conditions d'irradiation solaire, et ceci, afin de dépister des mécanismes physico-chimiques reliés aux processus autres que celui des dépôts secs.

3. OBJECTIFS SUR LE SIMULATEUR DE COUVERT NIVAL

Les études en laboratoire ont l'avantage de permettre de contrôler certains facteurs physiques et chimiques (lumière, intensité et qualité du spectre, gradients de température, composition atmosphérique, qualité et quantité des précipitations, qualité de la neige, etc.) ce qui est très difficile sinon impossible à obtenir pour les études sur le terrain. Ces études en laboratoire permettront de mieux comprendre certains mécanismes en les contrôlant. Ainsi, ils nous aideront à mieux expliquer certains phénomènes de la nature et à mieux orienter nos recherches sur le terrain. Les expé-

riences préliminaires sur le simulateur de couvert nival visaient principalement le développement de la méthodologie. Les objectifs au laboratoire furent les suivants:

1. Conceptualiser et fabriquer un simulateur de couvert nival;
2. Étudier le flux d' HNO_3 gazeux à l'interface neige-atmosphère sous des conditions contrôlées avec l'aide du simulateur de couvert nival.

L'originalité de toutes ces recherches (section 1 à 3) devrait nous permettre d'acquérir des connaissances plus précises sur ces processus ce qui nous mènerait au développement de modèles améliorés sur la simulation de la qualité de l'air au-dessus des régions boréales et de l'Arctique Canadien et au développement de modèles de simulation de la composition du couvert nival en périodes froides ainsi que des eaux de fonte pendant le choc acide printanier (Stein et al. 1990).

III. MÉTHODOLOGIE

1. EXPÉRIENCES AU LAC LAFLAMME

1.1 Description du site

Le site expérimental se situe à la station météorologique CAPMoN dans le bassin versant du lac Laflamme (47° 19' Nord, 71° 07' Ouest). Le site se trouve dans la forêt Montmorency dans le parc des Laurentides à 80 km au nord de la ville de Québec (figure 1). Le site est sur un sommet dans un endroit dégagé à 200 mètres de la forêt. La forêt est dominée par des sapins baumiers avec quelques bouleaux à papier et épinettes blanches.

Dans cette région, la température moyenne annuelle est de 0,2° C (-15° C en janvier; 15° C en juillet). La moyenne des précipitations annuelles pour la période de 1981 à 1985 est de 1,3 m dont 34 % tombe sous forme de neige (Papineau 1987).

1.2 Homogénéisation de la neige

On a recueilli la neige (fraîchement tombée) de la dernière précipitation. L'homogénéisation de la neige a été fait dans un contenant en plastique par agitation mécanique.

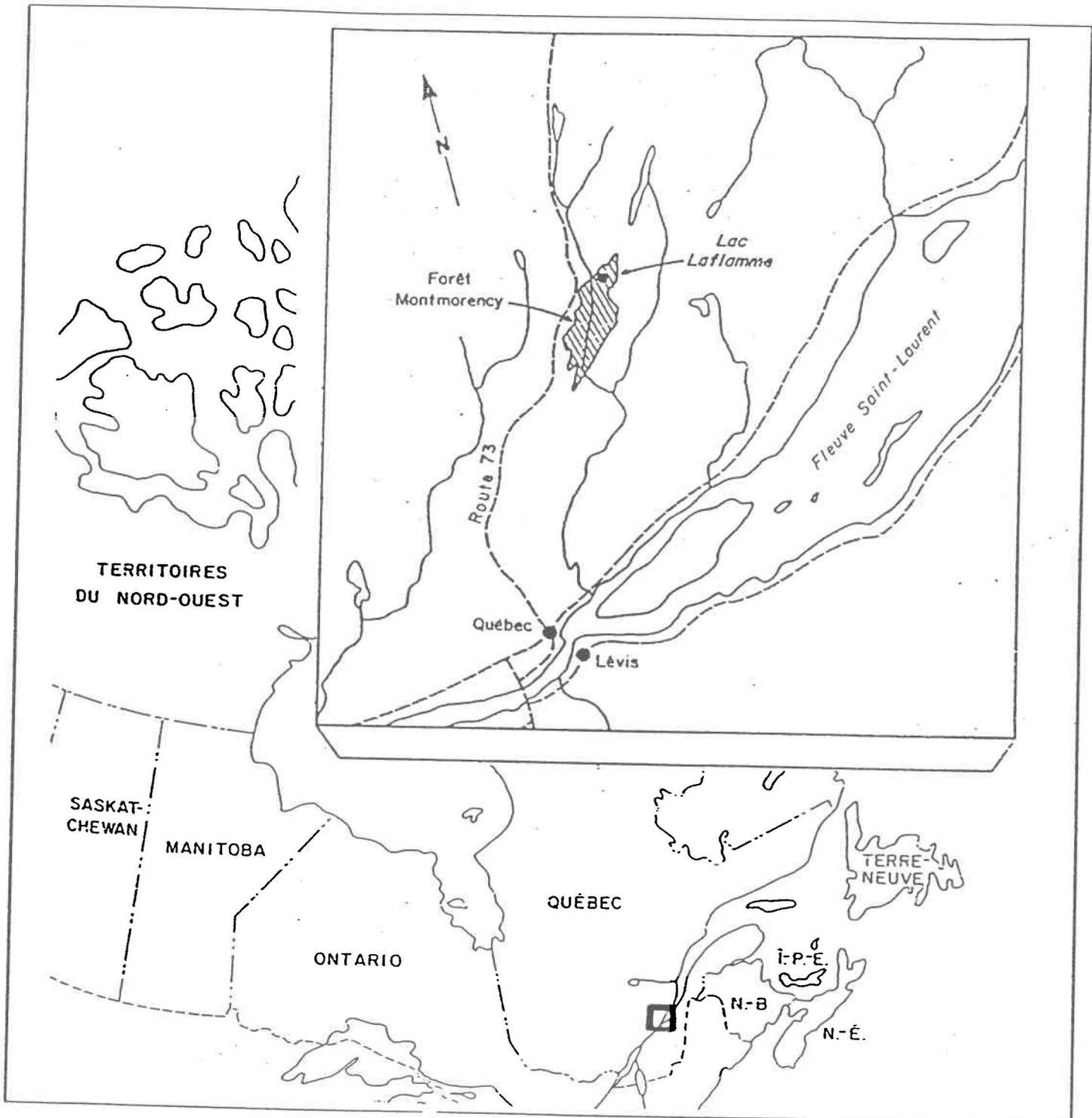


FIGURE 1: Localisation du bassin versant du lac Laflamme (tiré de Papi-neau 1988).

Avec une pelle en plastique, tout en portant des gants en plastique, la neige homogénéisée fut mise dans des sacs en mailles de Nyltex (fibre de Nylon) de 200 μm . Les sacs en mailles de forme carrée (20 cm X 20 cm) se fabriquent à partir d'une toile de mailles Nyltex taillée. Les sacs en mailles avec la neige homogénéisée ont ensuite été pesés et leurs masses notées pour vérifier à la fin de l'expérience le bilan hydrologique, c'est-à-dire vérifié s'il y a eu des gains ou des pertes d'eau. La masse de neige dans chaque sac a été d'environ 200 à 400 g. Des échantillons de neige homogénéisée ont aussi été recueillis et mis dans des sacs en plastiques scellés hermétiquement.

Ces échantillons dans les sacs en plastiques nous indiquent la concentration du début des ions dans les sacs en mailles de Nyltex. À la fin de l'expérience, on comparera les concentrations du début (sacs en plastiques scellés) et celles de la fin (sacs en mailles de Nyltex) par une analyse statistique (T Test, niveau de confiance 95 %). On verra donc s'il y a eu un gain et/ou une perte significative des ions dans les sacs en maille de Nyltex au cours de l'expérience.

1.3 Emplacement des sacs en mailles

Des tranchées de neige de 30 cm de profond furent creusées, les sacs en mailles avec la neige homogénéisée ont été placés à l'intérieur et la tranchée recouverte de neige, ceci afin d'empêcher qu'il y ait des dépôts secs qui pourraient masquer la perte d'ions.

A la fin des expériences, une à deux semaines plus tard, les sacs en mailles avec la neige homogénéisée ont été pesés et la neige homogénéisée dans les sacs en mailles fut mise dans des sacs en plastiques scellés hermétiquement. Cette expérience a été fait à trois reprises sur les périodes du 22 décembre au 1 février 1989.

1.4 Conservation des échantillons

Les échantillons de neige homogénéisée ont été transportés dans nos laboratoires de Québec et conservés dans une chambre froide à une température de - 10° C.

1.5 Fonte des échantillons

Les échantillons de neige homogénéisée dans les sacs en plastiques ont été transférés dans des bouteilles de polypropylène de 2 L. Ces bouteilles ainsi que toutes les autres bouteilles de polypropylène avaient été lavées avec une solution savonneuse, rincées à l'eau déminéralisée plusieurs fois, trempées dans une solution d'acide nitrique de 15 % pendant 24 heures, rincées à l'eau déminéralisée plusieurs fois encore, trempées dans de l'eau déminéralisée pendant 24 heures et rincées en dernier lieu avec de l'eau ultra pure (18 Ω). Les bouteilles de 2 L ont été placées dans un évier rempli d'eau tiède pour faire fondre la neige, une attention particulière a été prise pour que la température des eaux de fonte de la neige homogénéisée ne dépasse pas trop le point de congélation (0° C).

1.6 Filtration des échantillons

Les échantillons des eaux de fonte de la neige homogénéisée ont été filtrés tout de suite en utilisant un système de filtration Gelman sur des filtres de polycarbonate Nucleopore de 47 mm de diamètre et de 0,45 μm de porosité. Le système de filtration ainsi que les filtres avaient été rincés avec de l'eau ultra pure.

Les échantillons d'eau filtrée ont été mis dans des bouteilles de Nalgene de 60 mL pour l'analyse des anions, dans des cuvettes pour l'analyse des cations majeurs et de l'ammoniaque. Les échantillons pour analyse des cations majeurs ont été acidifiés à 0,5 % v/v HNO_3 et ceux pour l'ammoniaque ont été acidifiés à 0,2 % v/v H_2SO_4 . Les échantillons ont été conservés dans un réfrigérateur à 4° C en attendant d'être analysés.

1.7 Expérience sur l'équilibre des pressions partielles de l'acide nitrique dans la neige

Une expérience a été faite au lac Laflamme en prenant de la neige à des niveaux différents dans le couvert nival, donc de concentration différente. Chaque échantillon de neige a été placé dans un sac en mailles en Nyltex. Les deux sacs en mailles ont été placés dans un sac de plastique scellé et placé ensuite dans le couvert nival et recueilli deux semaines après pour analyse. Des échantillons témoins ont aussi été pris pour fin de comparaison.

L'expérience avait pour hypothèse de vérifier lors du métamorphisme des cristaux de neige, s'il y a une perte de HNO_3 gazeux, s'il n'y a pas une forme d'équilibre entre les deux échantillons de neige de concentrations différentes. Donc, l'échantillon de neige ayant une plus forte concentration de HNO_3 aurait une baisse de sa concentration en HNO_3 et l'échantillon ayant une plus faible concentration aurait une hausse de sa concentration en HNO_3 par un équilibre des pressions partielles de HNO_3 gazeux lors du métamorphisme des cristaux de neige.

2. EXPÉRIENCES SUR LA CALOTTE DE GLACE AGASSIZ

2.1 Description du site

Le site expérimental se situe au sommet de la calotte de glace Agassiz (81° Nord, 73° Ouest) sur l'île d'Ellesmere dans les Territoires du Nord-Ouest (figure 2). La calotte de glace Agassiz se trouve à 240 km au sud de la station météorologique d'Alert.

A cette localisation, les fontes d'été n'influencent que 3 % de la superficie de l'accumulation annuelle. L'accumulation moyenne annuelle des précipitations est de 50 cm. En 1990, le site expérimental se situait à 1 km au nord du campement sur un terrain légèrement incliné. En 1991, il y avait deux sites expérimentaux, un situé à 1,5 km au nord du campement et l'autre à 2,0 km au sud du campement sur des terrains relativement plats.

2.2 Mesures du profil physico-chimique

2.2.1 Prélèvement des échantillons de neige

La superficie des sites d'échantillonnage était de 400 m² (20 m X 20 m). Les tranchées de profondeur variant de 1 m à 1,5 m ont été creusées avec une pelle en aluminium propre. Les échantillons de neige de 5 cm d'épaisseur ont été pris à différents niveaux dans les parois de chaque tranchée. Avant de recueillir les échantillons de neige, la paroi de la tranchée a été grattée de quelques centimètres avec une pelle de polyéthylène pour enlever toute contamination qui aurait pu être apportée en creusant la tranchée. Les échantillons de neige ont été recueillis avec la pelle en polyéthylène et mises dans des sacs de plastiques stérilisés (Whirl-Pack).

La stratigraphie des tranchées a été prise afin de déterminer la profondeur des accumulations annuelles.

2.3 Mesure des flux d'ions à l'interface neige-atmosphère: influence de la radiation solaire

2.3.1 Homogénéisation de la neige

On a recueilli la neige (fraîchement tombée) de la dernière précipitation (2 à 3 cm d'épaisseur pour la couche échantillonnée). Cette neige fut homogénéisée dans des sacs en plastiques par agitation mécanique.

Avec une autre pelle de polyéthylène, tout en portant des gants en plastique, la neige homogénéisée fut mise dans des sacs en mailles (surface de $0,0225 \text{ m}^2$) de polypropylène et de polyéthylène dont la maille variait de $200 \mu\text{m}$ à $650 \mu\text{m}$. Les sacs en mailles avec la neige homogénéisée ont été ensuite pesés et leurs masses notées pour vérifier à la fin de l'expérience le bilan hydrologique. La masse de neige dans chaque sac a été d'environ 100 à 150 g. Des échantillons témoins de neige homogénéisée ont aussi été recueillis et mises dans des sacs de plastiques stérilisés (Whirl-Pack).

2.3.2 Emplacement des sacs en mailles

Les sacs en mailles ont été placés dans trois différents lieux avoisinants. Dans le premier lieu (site ouvert), on a placé les sacs en mailles à l'interface neige-atmosphère; le lieu était complètement ouvert à la radiation solaire.

Dans le deuxième lieu (site couvert), on a placé les sacs en mailles à l'interface neige-atmosphère mais recouvert d'une toile opaque ne laissant pas pénétrer aucune radiation solaire incidente. La toile opaque était constituée d'une toile en Nylon kaki recouverte d'une toile en Nylon blanche reflétant la radiation solaire afin d'empêcher que la toile en Nylon kaki se réchauffe et fasse fondre la neige en dessous.

Dans le troisième lieu (site transparent), on a placé les sacs en mailles à l'interface neige-atmosphère mais recouvert d'une toile transparente laissant pénétrer la lumière du visible. Ce dernier site nous servait comme expérience de contrôle vis-à-vis du deuxième site; ceci afin de compenser pour l'utilisation d'une toile dont la présence seule pourrait causer des effets n'ayant aucun lien avec l'irradiation solaire. Les toiles étaient suspendues à 0,5 m du couvert nival pour faciliter la circulation d'air.

A la fin des expériences, où il n'y a eu aucune précipitation, que les conditions d'irradiation solaire sont restées les mêmes et que la température a varié de - 10° C à - 25° C, les sacs en mailles contenant la neige homogénéisée ont été pesés et la neige transférée des sacs en mailles dans des sacs de plastiques stériles (Whirl-Pack).

2.4 Conservation des échantillons

Les échantillons de neige homogénéisée furent conservés dans des glacières sur la calotte de glace Agassiz et transportés dans nos laboratoires de Québec et rangés dans une chambre froide à une température de - 10° C.

2.5 Fonte des échantillons

Les échantillons de neige homogénéisée ont fondu à la température de la pièce dans leur propre sac de plastique stérile (Whirl-Pack). Après la

prise d'un certain volume d'eau pour l'analyse des anions, les échantillons ont été congelés avant de refondre pour l'analyse des cations. Par rapport aux expériences du la Laflamme, les échantillons de neige homogénéisée fondus n'ont pas été filtrés parce qu'il n'y avait pas de matières particulières (végétation). Ils n'ont pas été acidifiés pour leur conservation car ils étaient recongelés immédiatement. De plus, par rapport à la méthode d'absorption atomique, les échantillons pour la chromatographie ionique des cations n'ont pas besoin d'être acidifiés.

3. EXPÉRIENCES AVEC LE SIMULATEUR DE COUVERT NIVAL

3.1 Conception et fabrication du simulateur de couvert nival

La conception du simulateur de couvert nival devrait répondre à deux exigences:

1. l'application d'un gradient vertical de température dans le couvert;
2. la libre circulation de l'air à l'interface neige-atmosphère à l'intérieur du simulateur.

Pour l'application du gradient de température, on a utilisé deux bains réfrigérants pouvant être réglés à des températures différentes l'une de l'autre. Pour la circulation de l'air à l'intérieur du système, on a percé deux en

trées dans le bain réfrigérant du haut et inséré deux tubes en Téflon pour permettre l'entrée et la sortie de l'air dans le tube interne.

Pour la partie centrale du simulateur, elle est constituée de deux tubes concentriques: un tube externe et un tube interne. Le tube interne est fait en PVC recouvert à l'intérieur d'une feuille de Téflon. C'est dans cette partie que les expériences seront faites. Dix trous furent percés dans le tube interne pour y insérer les thermistors qui mesureront les températures à l'intérieur du tube interne pour la mesure du gradient de température appliqué. Le tube externe est fait en PVC, on a utilisé ce tube externe pour empêcher la conduction thermique du tube interne vers l'extérieur; pour cela on a rempli l'espace entre les deux tubes de neige. Donc le gradient de température sera aussi appliqué dans cet espace empêchant toute perte de chaleur dans le tube interne.

Lors des expériences, tout le simulateur fut recouvert d'une laine minérale et de feuilles de mousse synthétique (styrofoam) pour bien isoler le simulateur et ainsi avoir un meilleur gradient de température à l'intérieur (voir les figures 3 et 4 pour la vue de haut et de côté du simulateur de couvert nival).

3.2 Système d'analyse d'air

Le système par cassette d'air Gelman ("filter pack") a été utilisé pour l'analyse de l'air. Le système par cassette d'air était constitué de deux filtres,



FIGURE 3: Schéma du simulateur de couvert nival vu de côté.

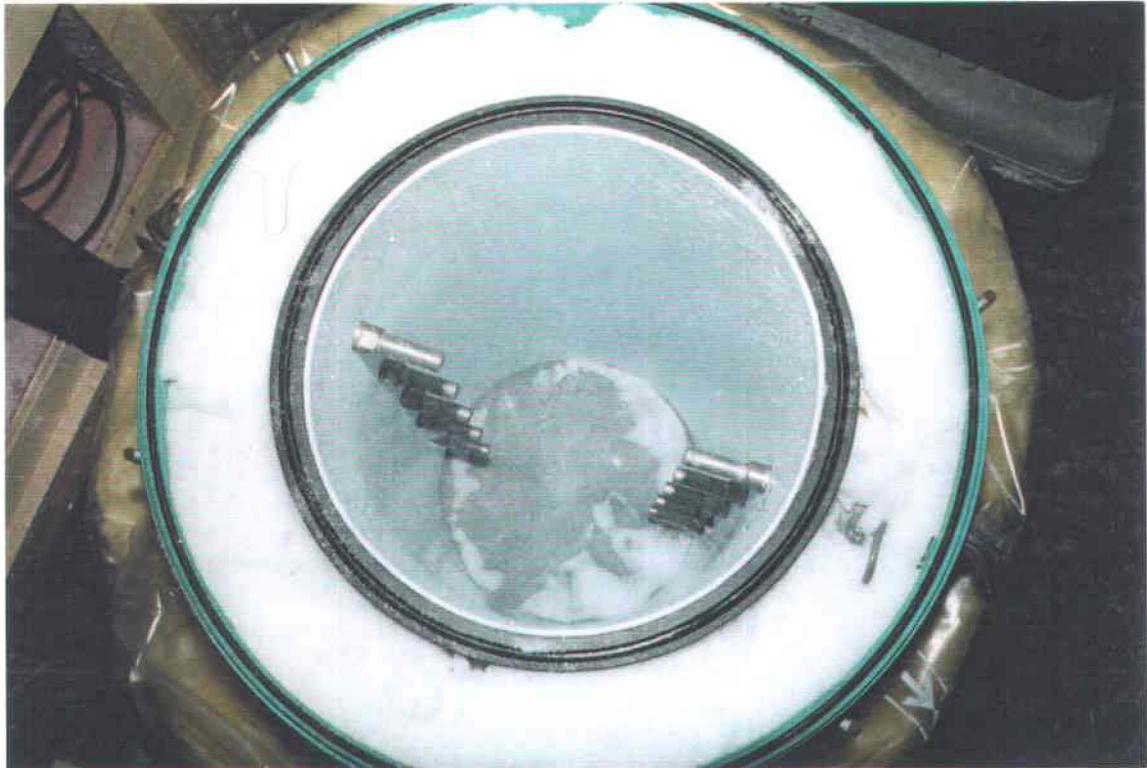


FIGURE 4: Schéma du simulateur de couvert nival vu de haut.

le premier étant un filtre de Téflon (Teflo) de 47 mm de diamètre et de 1 μm de porosité servant à recueillir les aérosols et la matière particulaire et le deuxième étant un filtre de Nylon (Nylasorb) de 47 mm de diamètre et de 1 μm de porosité servant à recueillir l'acide nitrique gazeux.

A la fin de l'expérience, les filtres ont été retirés de la cassette avec des pinces et placées dans une solution de 10 mL de KOH 0,005 M.

3.3 Homogénéisation de la neige

On a recueilli la neige (fraîchement tombée) de la dernière précipitation. Cette neige fut homogénéisée, dans une glacière propre et préalablement rincée avec de la neige, par agitation mécanique.

Avec une pelle en plastique, tout en portant des gants en plastique, la neige homogénéisée fut mise dans le simulateur de couvert nival. Des échantillons de neige homogénéisée ont aussi été recueillis et mis dans des sacs de plastiques stériles (Whirl-Pack).

3.4 Températures dans le simulateur de couvert nival

Le gradient de température dans le simulateur de couvert nival a pu être appliqué grâce à deux bains thermostatés Julabo F30-VC à température réglable.

Les deux bains thermostatés ont été placés dans une boîte en bois isolée avec de la mousse synthétique afin que la température à l'intérieur de la boîte de bois soit dans les conditions recommandées par le fabricant.

Trois expériences ont été entreprises dans la chambre froide avec le simulateur de couvert nival. La première expérience était préliminaire, elle avait pour objet de constater le gradient de température à l'intérieur du simulateur de couvert nival. Les résultats ont été concluants, on pouvait y lire une température de -6°C à 5 cm de hauteur et de -20°C à 50 cm de hauteur du couvert de neige à l'intérieur du simulateur. Donc il y avait un gradient de température de -31°C par mètre de hauteur de neige ($-14^{\circ}\text{C} / 0,45\text{ m}$). Ce gradient de température a été obtenu en 24 heures.

Pour la deuxième expérience, la température des bains thermostatés étaient de -2°C et -28°C pour les bains réfrigérants du bas et du haut respectivement. Les températures à l'intérieur du simulateur de couvert nival étaient en moyenne de $-5,8^{\circ}\text{C}$ à 5 cm de hauteur et à $-19,45^{\circ}\text{C}$ à 50 cm de hauteur de neige. Donc il y avait un gradient de température de -30°C par mètre de hauteur de neige.

Pour la troisième expérience, la température des bains thermostatés étaient de -1°C et -28°C pour les bains réfrigérants du bas et du haut respectivement. Les températures à l'intérieur du simulateur de couvert nival

étaient en moyenne de -3°C à 5 cm de hauteur et à -20°C à 50 cm de hauteur de neige. Donc il y avait un gradient de température de -34°C par mètre de hauteur de neige.

3.5 Circulation de l'air dans le système

La circulation d'air était faite grâce à une bonbonne d'air médical. Les tubes utilisés étaient en Téflon ainsi que les raccords de tube. Deux cassettes d'air ont été utilisées pour l'analyse de l'air. A partir de la bonbonne d'air, la ligne était divisée en deux, une allant au simulateur de couvert nival, l'autre ligne étant terminée par une cassette d'air. La deuxième cassette d'air était située à la sortie d'air du simulateur de couvert nival. Un débitmètre d'air Roger Gilmont F1300 a été placé à la fin de la deuxième cassette d'air pour mesurer le débit d'air passant dans le système.

Pour la deuxième expérience, qui a duré 10 jours, $6,38\text{ m}^3$ d'air a circulé à travers le système. Donc il y avait un flux moyen de $0,638\text{ m}^3$ par jour ou de 0,44 L par minute.

Pour la troisième expérience, qui a duré 26 jours, $22,33\text{ m}^3$ d'air a circulé à travers le système. Donc il y avait un flux moyen de $0,86\text{ m}^3$ par jour ou de 0,60 L par minute.

3.6 Prélèvement des échantillons

Les échantillons de neige furent prélevés avec une pelle en polyéthylène et mis dans des sacs de plastiques stérilisés (Whirl-Pack). Les prélèvements se sont faits par niveau; de 6 à 10 échantillons de neige recueillis pour une strate de 10 cm d'épaisseur de neige dans le simulateur.

3.7 Fonte des échantillons

Les échantillons de neige homogénéisée ont été fondus à la température de la pièce dans leur propre sac de plastique stérile (Whirl-Pack). Les échantillons de neige homogénéisée fondus n'ont pas été filtrés ni acidifiés pour leur conservation pour les mêmes raisons citées plus haut (échantillons de neige de la calotte de glace Agassiz).

4. ANALYSES

4.1 Mesure de conductivité

Les mesures de conductivité furent prises immédiatement après la fonte des échantillons avec un Radiomètre, modèle CDM 2e. Les mesures furent prises avec des échantillons non-filtrés à 25° C.

4.2 Mesure de pH

Les mesures de pH furent prises tout de suite après la mesure de conductivité avec un pH-mètre Radiomètre, modèle PHM 26. L'appareil fut calibré avec deux solutions certifiées (Fischer Scientific) de pH de $7,00 \pm 0,01$ et $4,00 \pm 0,01$. Les mesures furent prises avec des échantillons non-filtrés à 25°C .

4.3 Dosage des anions

Le dosage des anions a été fait en utilisant plusieurs appareils de chromatographies ioniques. Pour les expériences au lac Laflamme on retrouve les caractéristiques d'opération au Tableau 1. Pour les expériences sur la calotte de glace Agassiz en 1990 on retrouve les caractéristiques d'opération au Tableau 2. Le dosage fut fait à Ottawa à la Commission Géologique du Canada qui nous a permis d'utiliser leur chromatographe ionique. Pour les expériences sur la calotte de glace Agassiz en 1991 et les expériences avec le simulateur de couvert nival on retrouve les caractéristiques d'opération au Tableau 3. Toutes les analyses furent faites en deçà de 24 heures après la fonte des échantillons.

4.4 Dosage des cations

Le dosage des cations a été fait par deux méthodes, soit par spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme (échantillons du lac Laflam-

me), soit par chromatographie ionique (échantillons de la calotte de glace Agassiz). Le Tableau 4 montre les caractéristiques d'opération pour la spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme. Les analyses furent faites en deçà de trois mois. Le Tableau 5 montre les caractéristiques d'opération pour la chromatographie ionique. Les analyses furent faites en deçà de 6 heures après la fonte des échantillons.

4.5 Dosage de l'ammoniaque

Le dosage de l'ammoniaque a été fait par deux méthodes, soit par colorimétrie (auto-analyseur Technicon II, méthode de l'indiphénol sodium nitroprusside; échantillons du lac Laflamme), soit par chromatographie ionique (échantillons de la calotte de glace Agassiz, voir Tableau 5).

Il est à noter que pour toutes les analyses faites par chromatographies ioniques sur les neiges provenant de Agassiz, les standards ont été refaits journallement. Des analyses précédentes ont montré une baisse de concentration des standards de faible concentration après seulement 24 heures.

Le Tableau 6 résume les différentes méthodes d'analyses physico-chimiques utilisées.

TABLEAU 1: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex Autolon 12.

Ions dosés	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻
Boucle d'injection	455 µL
Pré-colonne de séparation	Dionex HPIC AG3
Colonne de séparation	Dionex HPIC AS3
Colonne de suppression	
Éluant	2,2 mM Na ₂ CO ₃ , 2,8 mM NaHCO ₃
Débit de l'éluant	2,0 mL min ⁻¹
Régénérant	25 mN H ₂ SO ₄
Débit du régénérant	3,0 mL min ⁻¹
Injection	Automatique
Détecteur	Cellule conductimétrique
Intégrateur	Shimadzu CR-3A
Compensation de température	1,7

TABLEAU 2: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex séries 2000i.

Ions dosés	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻
Boucle d'injection	250 µL
Pré-colonne de séparation	Dionex HPIC AG4A
Colonne de séparation	Dionex HPIC AS4
Colonne de suppression	Anion micromembrane (AMMS)
Éluant	1,8 mM Na ₂ CO ₃ , 1,7 mM NaHCO ₃
Débit de l'éluant	2,0 mL min ⁻¹
Régénérateur	25 mN H ₂ SO ₄
Débit du régénérateur	3,0 mL min ⁻¹
Injection	Seringue
Détecteur	Cellule conductimétrique
Intégrateur	Manuel, hauteur de pics
Compensation de température	1,7

TABLEAU 3: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex 300 DX (anions).

Ions dosés	Cl ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻
Boucle d'injection	315 µL
Pré-colonne de séparation	Dionex HPIC AG4A
Colonne de séparation	Dionex HPIC AS4
Colonne de suppression	Anion micromembrane (AMMS)
Éluant	1,8 mM Na ₂ CO ₃ , 1,7 mM NaHCO ₃
Débit de l'éluant	2,0 mL min ⁻¹
Régénérant	25 mN H ₂ SO ₄
Débit du régénérant	3,0 mL min ⁻¹
Injection	Automatique
Détecteur	Cellule conductimétrique
Intégrateur	Automatique
Compensation de température	1,7

TABLEAU 4: Caractéristiques d'opération du spectrophotomètre d'absorption atomique à la flamme Varian AA-20.

Ions dosés	Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺
Longueur d'onde; fente	
Na ⁺	589,0 nm; 0,25 nm
K ⁺	766,5 nm; 1,0 nm
Mg ²⁺	285,2 nm; 0,5 nm
Ca ²⁺	422,7 nm; 0,5 nm
Combustible; comburant	
Na ⁺ , K ⁺	acétylène; air
Mg ²⁺ , Ca ²⁺	acétylène; oxyde nitreux
Débit combustible; débit comburant	
Na ⁺ , K ⁺	1,5; 4,5
Mg ²⁺ , Ca ²⁺	3,0; 3,5

TABLEAU 5: Caractéristiques d'opération du chromatographe ionique Dionex 300 DX (cations).

Ions dosés	Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺
Boucle d'injection	315 µL
Pré-colonne de séparation	DIONEX HPIC CG10
Colonne de séparation	DIONEX HPIC CS10
Colonne de suppression	Cation micromembrane (CMMS)
Éluant	60 mM HCl, 6 mM DAP
Débit de l'éluant	1,0 mL min ⁻¹
Régénérant	0,1 M TBAOH
Débit du régénérant	
Injection	Automatique
Détecteur	Cellule conductimétrique
Intégrateur	Automatique
Compensation de température	1,7

TABLEAU 6: Méthodes d'analyses physico-chimiques des échantillons d'eau de fonte.

PARAMÈTRES	MÉTHODOLOGIE	TYPE D'APPAREIL
Conductivité	Electrométrique	Conductivimètre Radiomètre, modèle CDM 2e
pH	Electrométrique	pH-mètre Radiomètre, modèle PHM 26
Anions (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻)	Chromatographie ionique	Chromatographe ionique Dionex Autolon 12
(Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻)		Dionex séries 2000i
(Cl ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻)		Dionex 300 DX
Cations (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ et Ca ²⁺)	Absorption atomique	Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme Varian AA-20
	Chromatographie ionique	Dionex 300 DX
Ammoniaque (NH ₄ ⁺)	Colorimétrique	Auto-analyseur Technicon II
	Chromatographie ionique	Dionex 300 DX

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. RÉSULTATS DU LAC LAFLAMME

1.1 Bilans ioniques de la neige

En regardant les données complètes des expériences au Lac Laflamme (voir Annexe 8), les écarts entre le rapport des sommes des anions sur la somme des cations (A / C) sont minimales, l'écart n'est rarement plus que 10 % et ils sont semblables à ceux d'autres études.

On peut donc considérer que tous les ions majeurs ont été dosés, ce qui respecte le principe d'électroneutralité des solutions aqueuses.

1.2 Mesure des flux d'ions

Le Tableau 7 résume les valeurs moyennes des concentrations de H^+ et NO_3^- pour les sacs en mailles en " Nyltex " au début et à la fin des expériences. A la fin des expériences, on a observé que la neige avait durci et qu'une croûte de neige de deux à trois cm d'épaisseur était collée au sac. On a observé aussi un changement de la structure des cristaux de neige, donc un métamorphisme des cristaux de neige.

TABLEAU 7: Concentrations des ions dans les sacs en Nylon pour les expériences s'échelonnant dues 22 décembre 1988 au 1 février 1989 au lac Laflamme.

Ion	Maille	Expérience due 22/12/88 au 09/01/89			Expérience due 09/01/89 au 18/01/89			Expérience due 18/01/89 au 01/02/89		
		Concentration (1)		T Test (2)	Concentration (1)		T Test (2)	Concentration (1)		T Test (2)
		Début $\mu\text{eq L}^{-1}$	Fin $\mu\text{eq L}^{-1}$		Début $\mu\text{eq L}^{-1}$	Fin $\mu\text{eq L}^{-1}$		Début $\mu\text{eq L}^{-1}$	Fin $\mu\text{eq L}^{-1}$	
H ⁺	Nylon	40.1 ± 5.9	32.1 ± 3.7	OUI	45.0 ± 2.0	38.3 ± 6.2	OUI	35.7 ± 1.8	23.2 ± 6.5	OUI
NO ₃ ⁻	Nylon	40.6 ± 0.8	34.1 ± 0.8	OUI	29.7 ± 0.6	24.5 ± 0.6	OUI	38.1 ± 0.7	26.3 ± 2.1	OUI

(1) Concentration des valeurs moyennes avec écarts-types au début et à la fin

(2) T Test au niveau de confiance de 95 %; différence significative entre la concentration du début et de la fin (OUI) et différence non-significative entre la concentration du début et de la fin (NON)

Suite à une analyse statistique (T Test; niveau de confiance 95 %) de ces valeurs, les résultats démontrent une baisse significative des ions H^+ et NO_3^- entre le début et la fin de l'expérience. Les autres ions (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et NH_4^+) n'ont montré aucune baisse significative, certains ions avaient une augmentation significative entre le début et la fin des expériences (Cl^- , Na^+ et K^+) qui pourrait être due au processus de dépôts secs.

Comme les baisses sont semblables entre les deux ions (en terme de micro-équivalence), on peut conclure qu'il y a eu une perte de HNO_3 , probablement de HNO_3 sous forme gazeuse lors du métamorphisme des cristaux de neige.

1.3 Résultat de l'expérience sur l'équilibre des pressions partielles de l'acide nitrique dans la neige

Le Tableau 8 montre les résultats de l'expérience (voir chapitre III, section 1.7). On s'aperçoit qu'il y a eu une baisse de H^+ et NO_3^- dans les deux échantillons de neige, ce qui est contraire aux résultats attendus.

Donc les sacs en mailles en " Nytex " ne sont pas neutres, ils influencent la concentration des ions dans la neige. On sait que pour les analyses de l'air, spécialement pour l'acide nitrique gazeux, on utilise des filtres en Nylon. Alors les sacs en mailles en " Nytex " qui sont faits en Nylon pour

TABLEAU 8: Résultats de l'expérience sur l'équilibre des pressions partielles de l'acide nitrique dans la neige.

Sac en mailles	Ions	Début $\mu\text{eq L}^{-1}$	Fin $\mu\text{eq L}^{-1}$
1	H ⁺	71,24	26,92
(sur le dessus)	NO ₃ ⁻	59,93	32,84
2	H ⁺	44,67	12,30
(sous le dessous)	NO ₃ ⁻	36,51	21,43

raient biaiser les résultats en adsorbant les vapeurs HNO₃. Ceci aurait diminué la pression partielle de HNO₃ gazeux pour provoquer un flux de HNO₃ des cristaux de neige vers les espaces d'air interstitiels.

L'expérience a été refaite en laboratoire pour confirmer les premiers résultats. On est arrivé au même résultat, c'est-à-dire une baisse des concentrations de H⁺ et NO₃⁻. Pour vérifier si de l'acide nitrique gazeux était adsorbé par les sacs en mailles en Nylon, on a placé des morceaux du sac dans une solution de KOH 0,005 M (solution utilisée pour extraire l'acide nitrique gazeux adsorbé dans les filtres en Nylon, voir chapitre III section 3.2). Les analyses ont montré que l'acide nitrique était adsorbé par les sacs en mailles en Nylon.

En conclusion, on ne peut confirmer la perte de HNO_3 gazeux des échantillons de neige vers l'atmosphère lors du métamorphisme des cristaux de neige. Mais on peut conclure aussi que lors du métamorphisme des cristaux de neige, il y a de l'acide nitrique gazeux qui est désorbé et qui se trouve dans les espaces d'air interstitiels. En milieu non perturbé cet acide nitrique pourrait donc migrer vers des strates de neige en concentration plus faible ou se diffuser vers l'atmosphère. Donc, il pourrait y avoir une migration de l'acide nitrique dans le couvert nival.

1.4 Sacs en mailles de polyéthylène et de polypropylène

Suite à nos expériences préliminaires (voir chapitre III, section 1.7), il fallait trouver un autre matériel qui resterait inerte dans le couvert nival. On a décidé d'utiliser des sacs en mailles de polyéthylène et de polypropylène. On a placé des morceaux de ces sacs dans des échantillons de neige en milieu scellé. Les analyses n'ont montré aucune perte de NO_3^- dans l'échantillon de neige et aucune adsorption de NO_3^- sur les morceaux de polyéthylène et de polypropylène.

2. RÉSULTATS DE LA CALOTTE DE GLACE AGASSIZ

Les sacs en mailles de polyéthylène et en polypropylène ont été utilisés à la place de ceux en Nylon pour faire les principales expériences sur le terrain à la calotte de glace Agassiz.

2.1 Stratigraphie des tranchées de neige

La stratigraphie des tranchées montre les différentes couches d'accumulation de la neige au cours du temps. Ceci nous a aidés pour sélectionner les profondeurs à échantillonner pour étudier la variation saisonnière. Les couches annuelles sont déterminées par une couche de glace moyenne qui survient à l'été durant la période de fonte. Au-dessus de cette couche de glace, on retrouve une neige moins compacte et ayant de plus gros grains de neige qui est notre neige d'été recueillie. Au-dessus de cette neige d'été, on retrouve des couches plus compactes et de grains plus petits qui représentent notre neige d'hiver échantillonnée.

2.2 Profils physico-chimiques

La figure 5 démontre les valeurs moyennes (voir Annexe 4 pour les données complètes) des anions à différentes profondeurs pour les résultats des tranchées de mai 1990. Les profondeurs à 10, 15, 40, 52, 95 et 115 cm représentent des neiges d'hiver-printemps tandis que les profondeurs à 20, 80 et 100 cm sont des neiges d'été-automne.

La figure 6 démontre les valeurs moyennes des anions et la figure 7 démontre les valeurs moyennes des cations à différentes profondeurs pour les résultats des tranchées de mai 1991 au sud du campement (voir Anne-

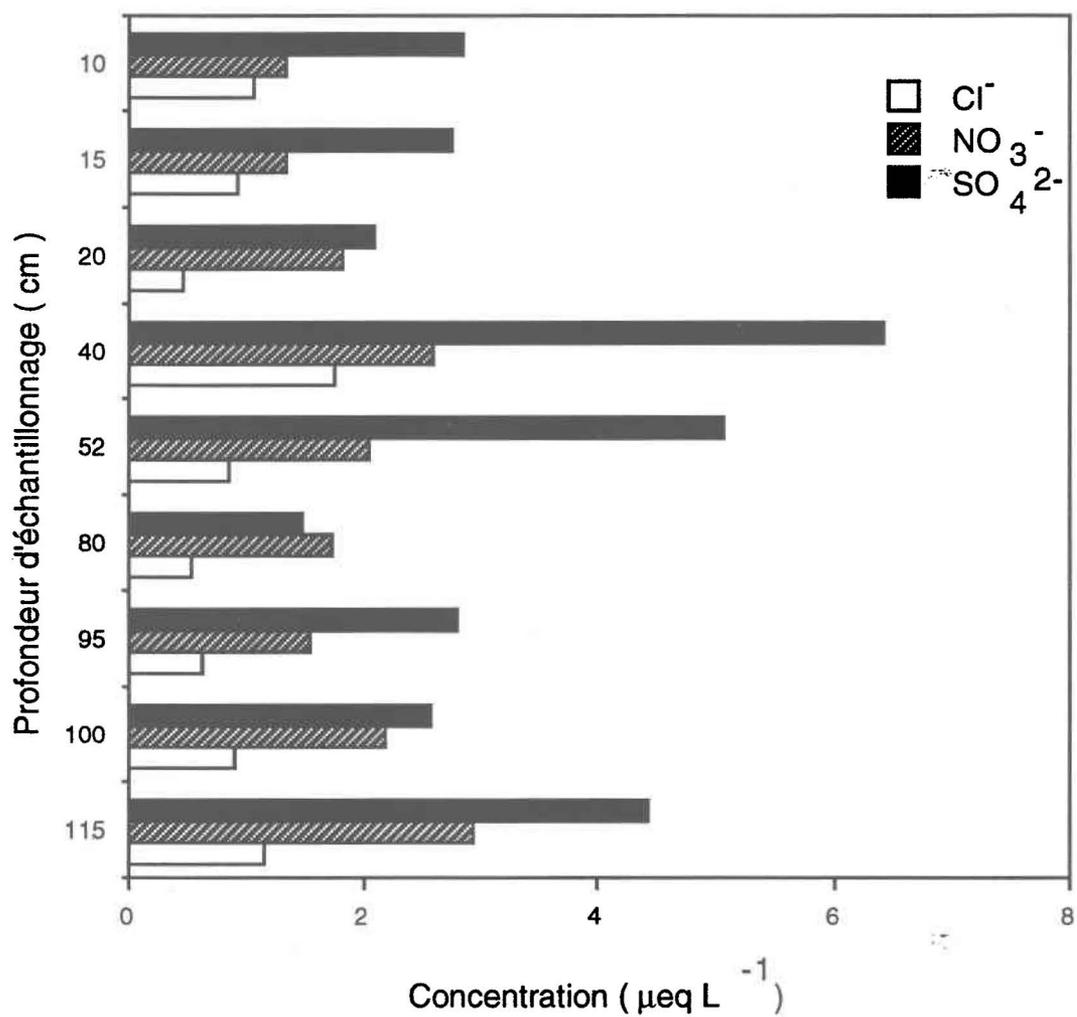


FIGURE 5: Concentrations des anions (Cl⁻, NO₃⁻ et SO₄²⁻; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, mai 1990 (Profondeur d'échantillonnage à titre indicatif seulement).

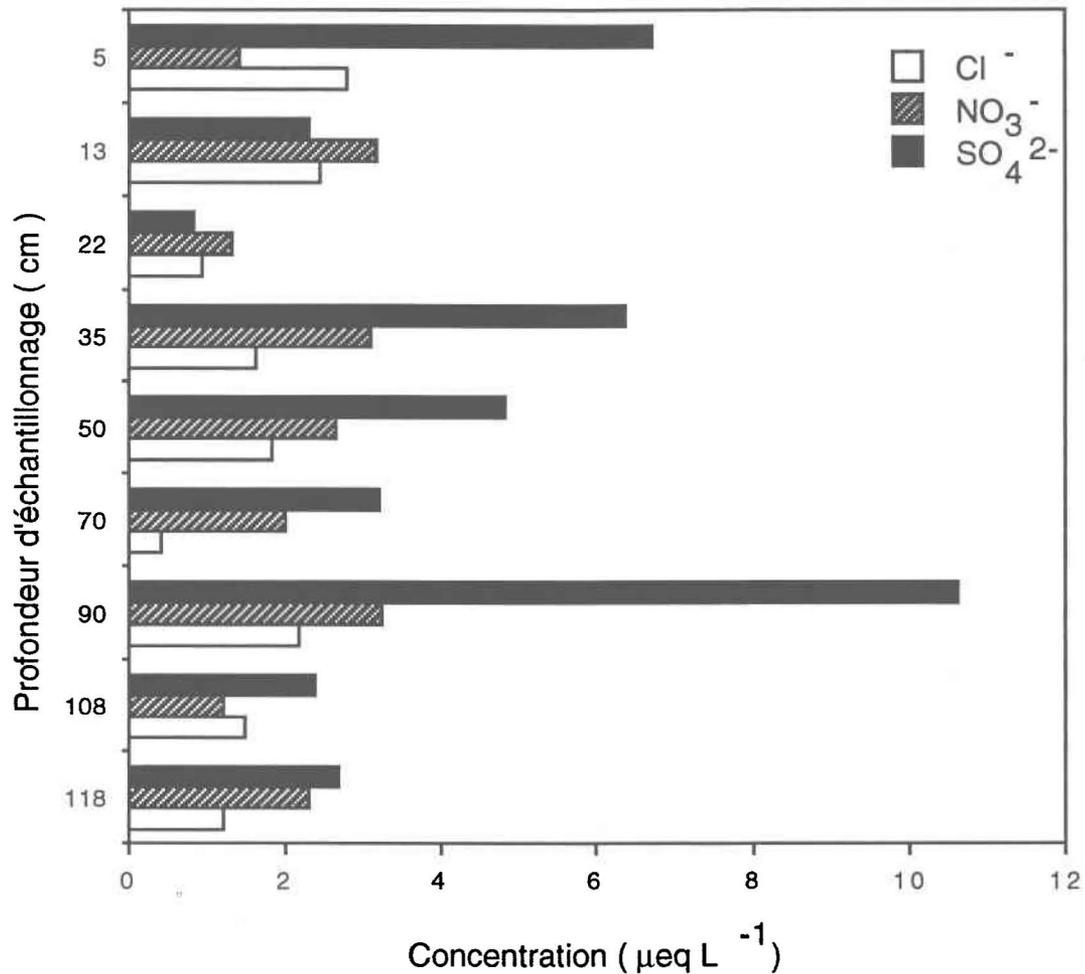


FIGURE 6: Concentrations des anions (Cl⁻, NO₃⁻ et SO₄²⁻ ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au sud du campement, mai 1991(Profondeur d'échantillonnage à titre indicatif seulement).

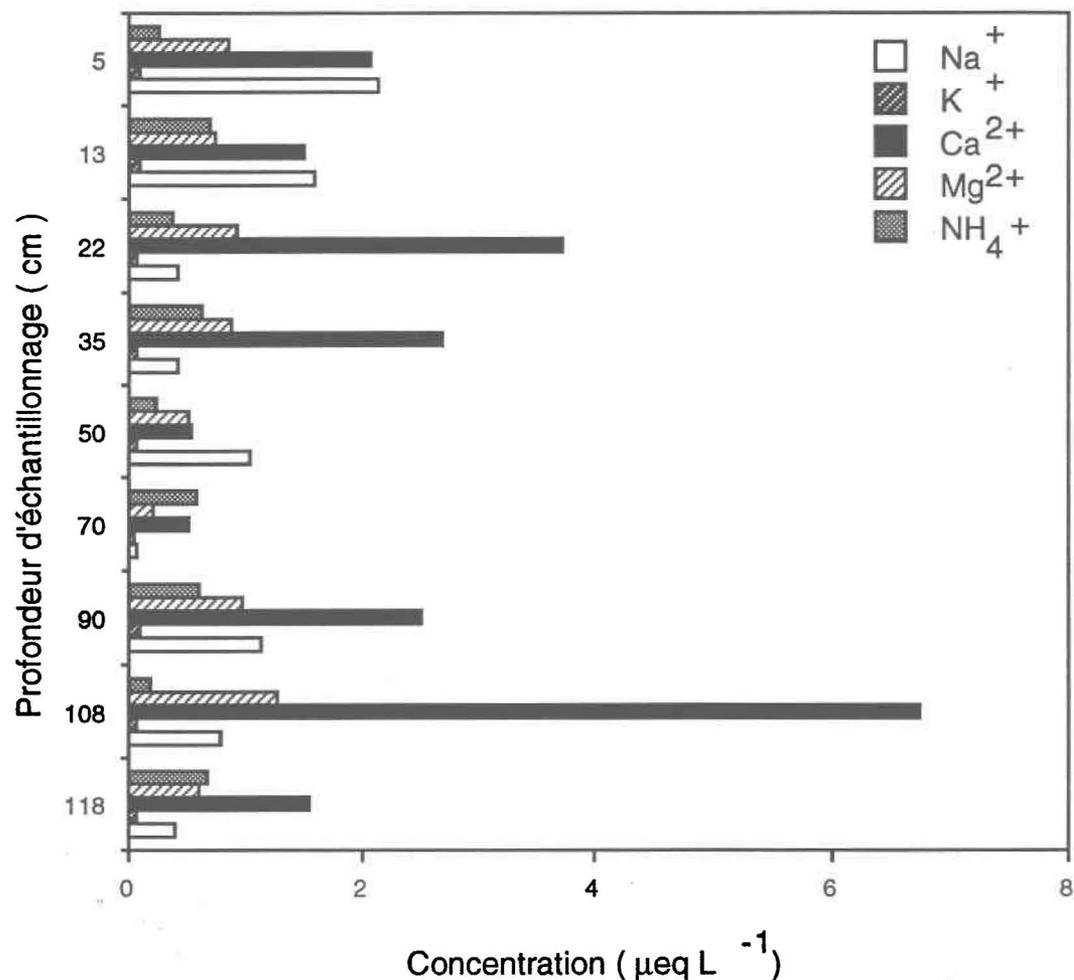


FIGURE 7: Concentrations des cations (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺ et Ca²⁺; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au sud du campement, mai 1991(Profondeur d'échantillonnage à titre indicatif seulement).

xe 1 pour les données complètes). Les profondeurs à 5, 13, 35, 50, 90 cm représentent des neiges d'hiver-printemps tandis que les profondeurs à 22, 70, 108 et 118 cm sont des neiges d'été-automne.

La figure 8 démontre les valeurs moyennes des anions et la figure 9 démontre les valeurs moyennes des cations à différentes profondeurs pour les résultats des tranchées de mai 1991 au nord du campement (voir Annexe 2 pour les données complètes). Les profondeurs à 5, 12, 32, 40 cm représentent des neiges d'hiver-printemps tandis que les profondeurs à 20 et 50 cm sont des neiges d'été-automne.

On s'aperçoit, par rapport aux concentrations trouvées au Lac Laflamme, que les concentrations sont plus faibles. Ce résultat est prévisible puisque le site est plus loin des sources industrielles que le lac Laflamme, donc comme le taux de résidence dans l'air des polluants ne varie guère, un plus faible pourcentage des polluants atteindra la calotte de glace Agassiz que le lac Laflamme.

Les résultats démontrent, en général, des concentrations plus fortes des anions dans la neige d'hiver que dans celle d'été. En été, le rapport de $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ est plus faible qu'en hiver, cela pourrait être dû à une plus forte oxydation des NO_x en NO_3^- que du SO_2 en SO_4^{2-} ou que l'origine des masses d'air soit changée et que celle-ci ait un taux de NO_3^- plus élevé que de SO_4^{2-} (comme en hiver au lac Laflamme, voir Annexe 8). Le SO_4^{2-} est l'espèce dominante pour les anions surtout l'hiver (concentrations deux fois

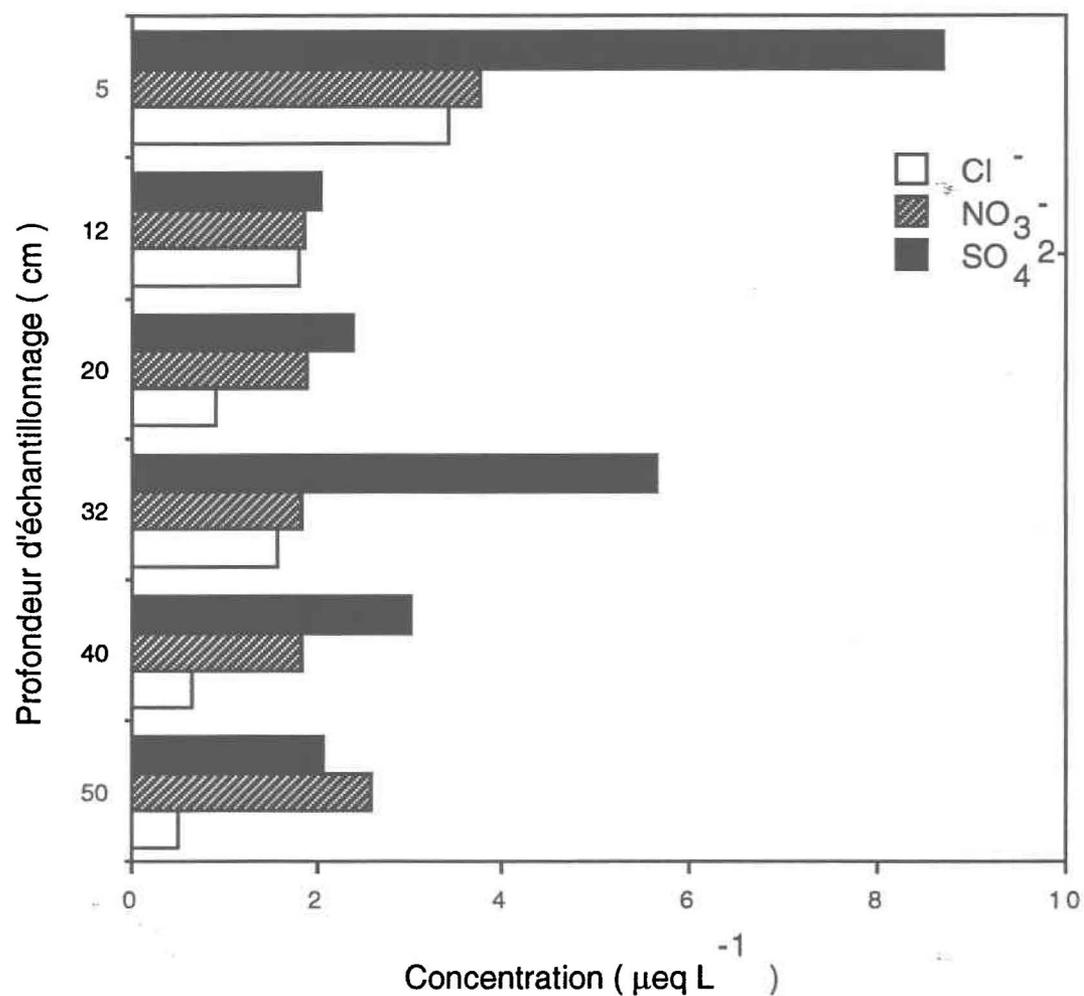


FIGURE 8: Concentrations des anions (Cl⁻, NO₃⁻ et SO₄²⁻ ; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au nord du campement, mai 1991(Profondeur d'échantillonnage à titre indicatif seulement).

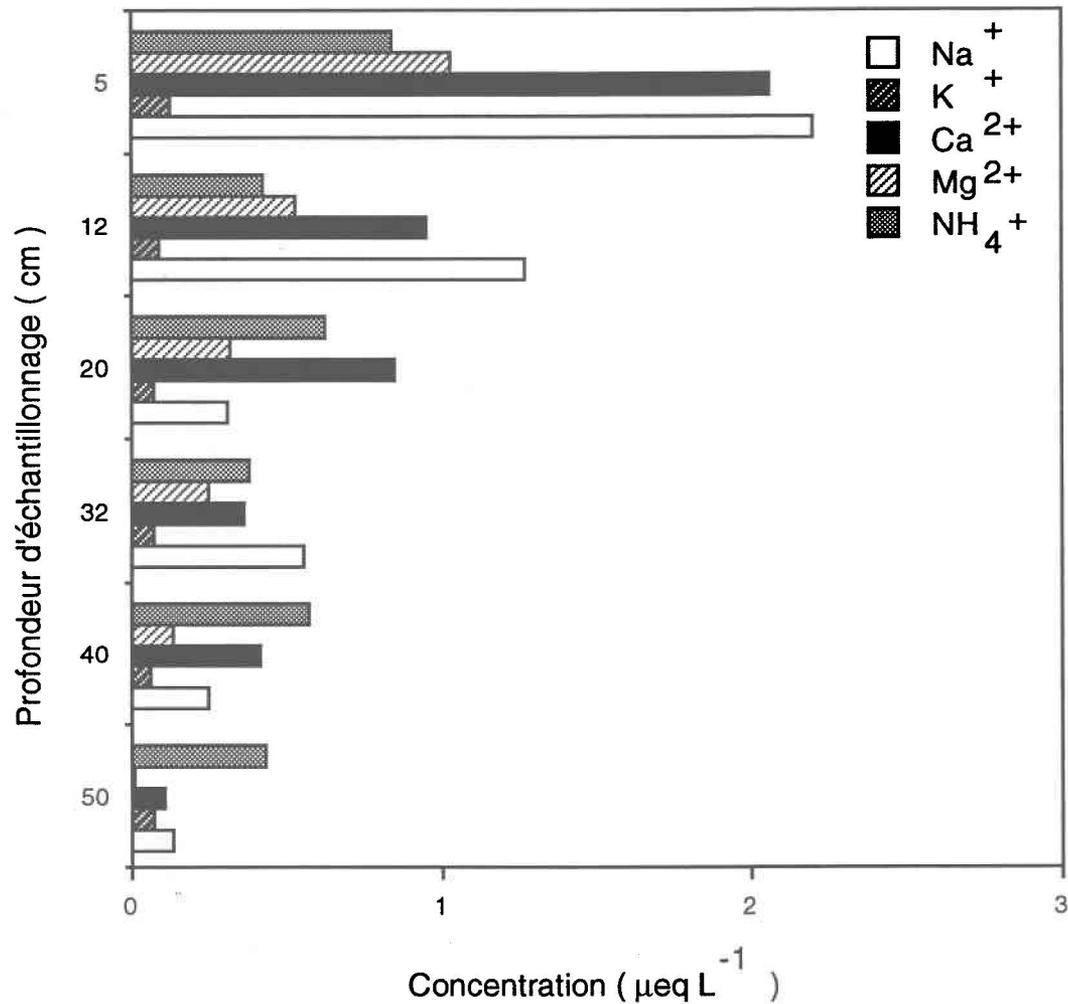


FIGURE 9: Concentrations des anions (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺ et Ca²⁺; valeurs moyennes de 20 tranchées) à partir des profils physico-chimiques de la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, site au nord du campement, mai 1991 (Profondeur d'échantillonnage à titre indicatif seulement).

plus élevées que les autres anions) tandis que pendant l'été, sa concentration est semblable à celle du NO_3^- . Le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ indique que plus de 95 % du SO_4^{2-} est d'origine non-marine.

Pour les cations, en général, les résultats démontrent des concentrations plus fortes dans la neige d'hiver que dans celle d'été. Pour les ions Na^+ , K^+ et Mg^{2+} , ils sont généralement associés avec le Cl^- (origine: sels marins en aérosols), les résultats démontrent qu'ils suivent la même variabilité saisonnière que le Cl^- , c'est-à-dire des concentrations plus fortes en hiver que l'été. Ces données suggèrent que les ions Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Cl^- sont de mêmes origines; principalement des sels marins en aérosols. Toutefois, le rapport $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ (environ 2/1) est beaucoup plus petit que celui de la composition d'eau de mer (environ 7/1). Il paraît donc qu'en dépit d'une variation concomitante de Na^+ et Mg^{2+} qu'une partie importante du Mg^{2+} soit d'origine terrestre, en l'occurrence les affleurements de roches à proximité du glacier.

Pour le Ca^{2+} et le NH_4^+ , leurs variabilités saisonnières ne sont pas semblables aux autres cations. On observe, surtout pour le Ca^{2+} , des concentrations en été parfois plus grandes que celles en hiver. On en conclut que leurs origines sont différentes des autres cations. L'origine du Ca^{2+} pourrait être les matières particulaires poussées par le vent: des recherches ont démontré que les matières particulaires avaient deux pics d'intensité maximum, un l'hiver et l'autre l'été dans l'Arctique Canadien (Barrie et Barrie, 1990). Pour le NH_4^+ , il provient principalement d'origine anthropique

(Barrie et Barrie, 1990) et s'associe fortement avec le SO_4^{2-} dans les aérosols de 0,5 - 2 μm , donc il devrait avoir la même variabilité saisonnière que le NO_3^- et le SO_4^{2-} . Toutefois nos résultats ne démontrent pas cette variabilité. Donc est-ce qu'on pourrait l'expliquer par un changement des masses d'air en provenance des régions au sud de l'Arctique ou par le fait que l'excès du NH_4^+ en été proviendrait de l'émission de NH_3 provenant de l'activité agricole?

Nos résultats sont conformes à ceux de l'étude de Koerner et Fischer (1982) sur la variabilité saisonnière des espèces ioniques. Ces résultats sont aussi en accord avec d'autres recherches (Barrie et Bottenheim, 1990) sur la composition atmosphérique de cette région. Ces auteurs ont observé une plus forte concentration de SO_4^{2-} et de NO_3^- dans l'air en hiver provenant en grande partie de l'activité industrielle du Nord de l'Eurasie tandis qu'en été les concentrations sont plus faibles. Ils ont expliqué les fortes concentrations en SO_4^{2-} en mars et avril par l'oxydation du SO_2 en SO_4^{2-} lors du changement subit entre la nuit complète et le jour complet en quelques semaines sans grand changement dans les conditions météorologiques. Le SO_4^{2-} et le NO_3^- sont, donc, d'origine eurasiennne donnant une très forte concentration dans les neiges déposées en mars et avril.

Les résultats suggèrent qu'il y a quatre origines différentes des espèces ioniques trouvées dans la neige. Il y a ceux d'origines marines (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Cl^-), de matière particulaire ou d'origine terrestre (Ca^{2+} et Mg^{2+}), d'origines anthropiques (NO_3^- et SO_4^{2-}) et de réactions photochi-

miques (NO_3^- et SO_4^{2-}). Ces résultats démontrent que la neige reflète généralement la composition saisonnière des aérosols atmosphériques tels que rapportés par Barrie et Hoff (1985).

Le profil physico-chimique, toutefois, ne nous renseigne pas sur l'évolution physico-chimique qui aurait pu se produire pendant la saison une fois la neige déposée au sol.

2.3 Mesures des flux d'ions à l'interface neige-atmosphère

Afin d'étudier l'évolution physico-chimique de la neige au sol, nous avons utilisé la méthodologie développée au lac Laflamme. Nous sommes conscients que cette méthodologie de mesures des flux à l'interface neige-atmosphère en utilisant la neige homogénéisée dans des sacs en mailles ne représente qu'approximativement la situation réelle d'interaction neige-atmosphère. Nous considérons, toutefois, que le rapport des surfaces neige/fibre plastique dans les sacs en mailles est assez élevé afin de minimiser des effets de masquage de la neige par le plastique pendant l'expérience.

2.3.1 Expériences de 1990

Les résultats de l'expérience de 1990 (voir Annexe 5) ne seront pas discutés car au site recouvert d'une toile opaque, les échantillons de neige ont fondu durant la dernière journée quand des conditions météorologiques ont provoqué la chute de la toile. Ceci a entraîné une perte de 20 % d'eau

en moyenne pour les échantillons en sacs, donc rendant les comparaisons entre le site ouvert à la radiation solaire et celui recouvert d'une toile opaque impossible.

2.3.2 Expériences de 1991

Le Tableau 9 résume les valeurs moyennes des concentrations de Cl^- , Br^- , NO_3^- et SO_4^{2-} et le Tableau 10 résume les valeurs moyennes des concentrations de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et NH_4^+ (voir Annexe 3 pour les données complètes) au début (16 mai) et à la fin (22 mai 1991) de l'expérience pour le site ouvert à la radiation solaire, le site recouvert d'une toile transparente laissant passer la lumière du visible et le site recouvert d'une toile opaque.

Il y a eu plusieurs neiges de compositions chimiques différentes homogénéisées à cause de beaucoup de neige demandée et le faible volume des sacs en plastiques. Ceci explique le fait que la composition chimique des neiges homogénéisées au début des trois sites est différente.

L'utilisation du système de chromatographie ionique 300 DX nous a permis d'étudier la dynamique du bromure. En effet, les concentrations de bromure mesurées dans la neige ($2,3 \mu\text{g L}^{-1}$) sont très faibles comparées à celles du chlorure ($70 \mu\text{g L}^{-1}$), du nitrate ($420 \mu\text{g L}^{-1}$) et du sulfate (430

TABLEAU 9: Concentrations des anions dans les sacs en mailles au début (16 mai 1991) et à la fin (22 mai 1991) de l'expérience à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere

Ion	Maille (1)	Site couvert (4)			Site transparent (5)			Site découvert (6)		
		Concentration (2)		T Test (3)	Concentration (2)		T Test (3)	Concentration (2)		T Test (3)
		Début $\mu\text{g L}^{-1}$	Fin $\mu\text{g L}^{-1}$		Début $\mu\text{g L}^{-1}$	Fin $\mu\text{g L}^{-1}$		Début $\mu\text{g L}^{-1}$	Fin $\mu\text{g L}^{-1}$	
Cl ⁻	PE	67.7 ± 1.6	80.4 ± 4.2	OUI	60.0 ± 1.6	85.4 ± 16	OUI	71.7 ± 2.4	102.5 ± 9.1	OUI
	PP	61.5 ± 5.1	92.8 ± 7.9	OUI	65.7 ± 9.1	73.4 ± 5.6	OUI	64.2 ± 2.1	70.3 ± 1.5	OUI
Br ⁻	PE	2.28 ± 0.11	2.64 ± 0.12	OUI	2.22 ± 0.13	2.63 ± .21	OUI	2.16 ± 0.09	2.59 ± 0.1	OUI
	PP	2.28 ± 0.08	2.93 ± 0.16	OUI	2.30 ± 0.19	2.55 ± 0.16	OUI	2.08 ± 0.11	2.30 ± 0.08	OUI
NO ₃ ⁻	PE	426.8 ± 7.9	443.1 ± 5.2	OUI	439.4 ± 2.5	451.0 ± 7.8	OUI	409.2 ± 8.1	417.7 ± 6.4	NON
	PP	431.7 ± 4.4	452.1 ± 12	OUI	427.6 ± 2.8	447.0 ± 6.8	OUI	409.0 ± 16	420.5 ± 11	NON
SO ₄ ²⁻	PE	396.5 ± 33	433.4 ± 29	OUI	324.4 ± 18	382.6 ± 14	OUI	506.8 ± 31	555.9 ± 26	OUI
	PP	360.4 ± 45	441.7 ± 51	OUI	378.3 ± 33	405.3 ± 14	OUI	437.5 ± 60	480.4 ± 36	NON

(1) Sacs en mailles de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP).

(2) Concentration des valeurs moyennes avec écarts-types au début et à la fin de l'expérience.

(3) T Test au niveau de confiance de 95 %; différence significative entre la concentration du début et de la fin (OUI) et différence non-significative entre la concentration du début et de la fin (NON).

(4) Site couvert; site recouvert d'une toile opaque.

(5) Site transparent; site recouvert d'une toile transparente.

(6) Site découvert; site ouvert à la radiation solaire.

TABLEAU 10: Concentrations des cations dans les sacs en mailles au début (16 mai 1991) et à la fin (22 mai 1991) de l'expérience à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere

Ion	Maille (1)	Site couvert (4)			Site transparent (5)			Site découvert (6)		
		Concentration (2)		T Test (3)	Concentration (2)		T Test (3)	Concentration (2)		T Test (3)
		Début $\mu\text{g L}^{-1}$	Fin $\mu\text{g L}^{-1}$		Début $\mu\text{g L}^{-1}$	Fin $\mu\text{g L}^{-1}$		Début $\mu\text{g L}^{-1}$	Fin $\mu\text{g L}^{-1}$	
Na ⁺	PE	13.0 ± 1.0	18.8 ± 0.7	OUI	15.4 ± 3.0	23.7 ± 5.9	OUI	18.5 ± 0.6	27.3 ± 3.0	OUI
	PP	11.0 ± 2.4	23.1 ± 2.9	OUI	16.8 ± 1.7	18.6 ± 2.9	OUI	17.2 ± 1.3	19.8 ± 0.7	OUI
K ⁺	PE	3.86 ± 0.59	3.91 ± 0.43	NON	0.76 ± 1.0	0.99 ± 0.58	NON	0.98 ± 0.61	0.78 ± 0.35	NON
	PP	3.54 ± 0.68	4.53 ± 0.74	NON	0.65 ± 0.79	0.68 ± 0.56	NON	1.5 ± 1.2	1.16 ± 0.49	NON
Ca ²⁺	PE	60.2 ± 7.2	287.7 ± 21	OUI	30.9 ± 5.8	347 ± 98	OUI	61.9 ± 3.9	416 ± 50	OUI
	PP	50.4 ± 7.6	451 ± 42	OUI	54.3 ± 9.1	289 ± 162	OUI	68 ± 16	163 ± 17	OUI
Mg ²⁺	PE	10.1 ± 0.4	38.8 ± 9.4	OUI	18.0 ± 1.1	56.7 ± 29.6	OUI	17.9 ± 1.0	86.1 ± 17.7	OUI
	PP	8.1 ± 0.8	88 ± 13	OUI	18.7 ± 0.6	47 ± 27	OUI	8.1 ± 0.6	21.6 ± 1.6	OUI
NH ₄ ⁺	PE	26.4 ± 2.4	27.0 ± 2.6	NON	29.1 ± 3.5	35.9 ± 3.5	OUI	27.1 ± 5.8	35.4 ± 6.0	OUI
	PP	26.8 ± 2.5	27.7 ± 2.2	NON	28.9 ± 1.4	36.3 ± 4.1	OUI	27.1 ± 1.7	37.3 ± 2.1	OUI

(1) Sacs en mailles de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP)

(2) Concentration des valeurs moyennes avec écarts-types au début et à la fin

(3) T Test au niveau de confiance de 95 %; différence significative entre la concentration du début et de la fin (OUI) et différence non-significative entre la concentration du début et de la fin (NON)

(4) Site couvert; site recouvert d'une toile opaque.

(5) Site transparent; site recouvert d'une toile transparente.

(6) Site découvert; site ouvert à la radiation solaire.

$\mu\text{g L}^{-1}$) ce qui pourrait expliquer qu'elles n'ont pas été détectées dans les autres recherches. Un test colorimétrique confirme la présence du bromure dans la neige telle que mesurée par chromatographie ionique.

Suite à une analyse statistique (T Test; niveau de confiance 95 %) de ces valeurs, les résultats démontrent en presque totalité une augmentation significative des espèces ioniques entre le début et la fin de l'expérience.

Pour le Cl^- et le Br^- (voir Tableau 9), les augmentations sont significatives pour les trois sites.

Pour le NO_3^- (voir Tableau 9), les augmentations sont significatives pour le site recouvert d'une toile opaque et le site recouvert d'une toile transparente. L'augmentation est non-significative pour le site ouvert à la radiation solaire autant pour les sacs en mailles de polyéthylène qu'en polypropylène.

Pour le SO_4^{2-} (voir Tableau 9) les augmentations sont significatives pour les trois sites sauf pour le site ouvert à la radiation solaire pour les sacs en mailles de polypropylène. Statistiquement, l'augmentation est non-significative à cause des écarts-types trop grands des deux valeurs moyennes, mais le Tableau 9 démontre qu'il y a une augmentation appréciable par rapport aux deux autres sites.

Pour le Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} (voir Tableau 10), les augmentations sont significatives pour les trois sites.

Pour le K^+ , il n'y a aucune augmentation significative; les concentrations étaient très faibles (près de la limite de détection du chromatographe ionique).

Pour le NH_4^+ (voir Tableau 10), les augmentations sont significatives pour le site recouvert d'une toile transparente et le site ouvert à la radiation solaire. Pour le site recouvert d'une toile opaque, les augmentations sont non-significatives autant pour les sacs en mailles de polyéthylène que de polypropylène.

2.3.2.1 Apports et flux nets

L'apport total se calcule par l'équation suivante:

$$A = \Delta[C] \times V \quad (4)$$

- où
- A apport total de l'espèce anionique (μg);
 - $\Delta[C]$ différence de concentration entre la fin et le début de l'expérience ($\mu\text{g L}^{-1}$);
 - V volume de neige fondu (L).

Le flux net se calcule par l'équation suivante:

$$F_n = \frac{A}{S \times t} \quad (5)$$

- où F_n flux net de l'espèce anionique ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$);
 A apport total de l'espèce anionique (μg);
 S superficie de neige exposée à l'atmosphère (m^2);
 t temps total de l'expérience (s).

Le Tableau 11 nous montre les augmentations en apport total et le flux net des espèces anioniques et le Tableau 12 celui des espèces cationiques.

Ces apports représentent des apports nets d'ions vers le couvert de neige par le processus de dépôts secs plus les transformations de ces espèces chimiques dues à d'autres processus à l'interface neige-atmosphère pendant l'expérience. Dans le cas de NO_3^- au site ouvert à la radiation solaire, la différence entre les flux à ce site-ci et ceux recouverts d'une toile opaque et d'une toile transparente est attribuée à l'influence de la lumière (voir ci-dessous) car l'exposition de la surface de neige à l'air ambiant ne diffère guère dans les deux cas.

TABLEAU 11: Apports et flux nets des espèces anioniques calculés à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, mai 1991.

Espèces anioniques	Apport $\mu\text{g L}^{-1}$	Flux net $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Site(1)
Cl ⁻	1,26 - 3,13	1,08 - 2,68 x 10 ⁻⁴	SR
	0,77 - 2,54	0,66 - 2,18 x 10 ⁻⁴	ST
	0,61 - 3,08	0,52 - 2,64 x 10 ⁻⁴	SO
Br ⁻	0,036 - 0,065	3,09 - 5,57 x 10 ⁻⁶	SR
	0,025 - 0,041	2,14 - 3,52 x 10 ⁻⁶	ST
	0,022 - 0,043	1,89 - 3,69 x 10 ⁻⁶	SO
NO ₃ ⁻	1,63 - 2,04	1,40 - 1,75 x 10 ⁻⁴	SR
	1,16 - 1,94	0,99 - 1,66 x 10 ⁻⁴	ST
	0,85 - 1,15	0,73 - 0,98 x 10 ⁻⁴	SO
SO ₄ ²⁻	3,69 - 8,13	3,16 - 6,97 x 10 ⁻⁴	SR
	2,70 - 5,82	2,31 - 4,99 x 10 ⁻⁴	ST
	4,29 - 4,91	3,68 - 4,21 x 10 ⁻⁴	SO

(1) SR, site recouvert d'une toile opaque; ST, site recouvert d'une toile transparente; SO, site ouvert à la radiation solaire.

TABLEAU 12: Apports et flux nets des espèces cationiques calculés à la calotte de glace Agassiz, Île d'Ellesmere, mai 1991.

Espèces anioniques	Apport $\mu\text{g L}^{-1}$	Flux net $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Site(1)
Na ⁺	5,88 - 12,66	$0,50 - 1,09 \times 10^{-4}$	SR
	1,86 - 8,34	$0,16 - 0,72 \times 10^{-4}$	ST
	2,62 - 8,75	$0,22 - 0,75 \times 10^{-4}$	SO
Ca ²⁺	227,54 - 400,16	$1,95 - 3,43 \times 10^{-3}$	SR
	234,95 - 315,72	$2,01 - 2,71 \times 10^{-3}$	ST
	95,39 - 354,30	$0,82 - 3,04 \times 10^{-3}$	SO
Mg ²⁺	28,70 - 80,26	$2,47 - 6,88 \times 10^{-4}$	SR
	28,61 - 38,71	$2,45 - 3,32 \times 10^{-4}$	ST
	3,43 - 68,25	$0,29 - 5,85 \times 10^{-4}$	SO
NH ₄ ⁺	0,59 - 0,82	$0,51 - 0,70 \times 10^{-5}$	SR
	6,78 - 7,47	$5,81 - 6,40 \times 10^{-5}$	ST
	8,32 - 10,19	$7,13 - 8,74 \times 10^{-5}$	SO

(1) SR, site recouvert d'une toile opaque; ST, site recouvert d'une toile transparente; SO, site ouvert à la radiation solaire.

Dans le cas de NH_4^+ au site recouvert d'une toile opaque, la différence entre les flux à ce site-ci et les deux autres pourrait être attribuée à l'influence de la lumière. On pourrait expliquer ce processus par l'oxydation possible du NH_4^+ par des oxydants (ex. H_2O_2) au site recouvert d'une toile opaque. Pour les deux autres sites, la vitesse d'oxydation serait beaucoup moindre car les oxydants seraient aussi photolysés par la lumière (Neftel et al., 1987; Sigg et al., 1987), donc des dépôts nets plus élevés pour le site ouvert à la radiation solaire et le site recouvert d'une toile transparente que celui recouvert d'une toile opaque. Pour les autres espèces ioniques, les apports sont semblables entre les trois sites.

Pour le Ca^{2+} , ces flux élevés s'expliquent par le fait qu'en mai 1991, les montagnes avoisinantes du glacier étaient à nues (non-recouvertes de neiges) et que le Ca^{2+} origine principalement de matières particulaires en aérosols. Donc le Ca^{2+} aura été transporté facilement par le vent pour se déposer sur le glacier.

2.3.2.2 Vitesse de dépôts secs

Le Tableau 13 reproduit les valeurs de V_d pour le NO_3^- et le SO_4^{2-} que nous avons obtenues en utilisant des valeurs de concentrations atmosphériques de l'étude de Barrie et Hoff (1985) portant sur l'analyse de la qualité de l'air arctique pendant six ans. Nous n'avons pu mesurer la qualité

TABLEAU 13: Vitesses de dépôts secs (Vd) calculées à la calotte de glace Agassiz en mai 1991 et celles rapportées dans la littérature; concentration des anions dans l'atmosphère arctique.

Anions	Vd mesurées(1) cm s ⁻¹	Vd littérature(2) cm s ⁻¹	C(3) µg m ⁻³
NO ₃ ⁻	0,19 - 0,23 (SR)	1,0	0,075
	0,13 - 0,22 (ST)		
	0,10 - 0,13 (SO)		
SO ₄ ²⁻	0,063 - 0,14 (SR)	0,1	0,500
	0,046 - 0,10 (ST)		
	0,074 - 0,084 (SO)		

(1) SR, site recouvert d'une toile opaque; ST, site recouvert d'une toile transparente; SO, site ouvert à la radiation solaire.

(2) Valeur moyenne; Dasch et Cadle, 1985; Cadle *et al.*, 1985; Johansson et Granat, 1986.

(3) Concentrations atmosphériques tirées de Barrie et Hoff 1985.

de l'air durant les expériences, c'est pourquoi nous prenons leurs valeurs en supposant qu'elles seraient du même ordre de grandeur que celles durant nos expériences.

Nous n'avons pas calculé V_d pour les autres ions car nous n'avons pas trouvé dans la littérature des valeurs de concentrations atmosphériques totales pour ces espèces.

Les valeurs de V_d de SO_4^{2-} sont en accord avec celles rapportées dans la littérature, et ceci, pour les trois sites. Pour NO_3^- , les valeurs de V_d mesurées sont nettement plus faibles que celles de la littérature pour les trois sites. A priori, ces constats pourraient être le résultat des caractéristiques ou des processus physico-chimiques à l'interface neige-atmosphère. En ce qui concerne les caractéristiques physiques de la neige par rapport au processus de dépôts secs, nous croyons qu'ils sont similaires à la neige d'autres régions puisque le taux de dépôt sec de SO_4^{2-} ne diffère guère de ceux rapportés pour cette espèce dans d'autres milieux nivaux. Toutefois, sous les conditions météorologiques arctiques (température et irradiation solaire), des processus tels qu'une réémission de HNO_3 lors du métamorphisme des cristaux de neige ou une transformation photochimique de cette espèce pourraient se produire.

Les valeurs non-significatives de V_d de $0,097 - 0,13 \text{ cm s}^{-1}$ au site ouvert à la radiation solaire par rapport à celles significatives de $0,19 - 0,23 \text{ cm s}^{-1}$ pour le site recouvert d'une toile opaque pourraient être expliquées par un processus photochimique (l'acide nitrique se transformerait par l'effet de la radiation solaire en oxyde nitrique " NO_2 " ; Neubauer et Heumann, 1988) au site découvert. Ces observations renforcent notre proposition de la présence des processus autres que ceux des dépôts secs, c'est-à-dire les

réactions photochimiques impliquant des espèces azotées à l'interface neige-atmosphère sous l'influence de la radiation solaire. Toutefois, l'hypothèse ne peut-être validée que par des méthodes indépendantes de mesures photochimiques " in situ " ou au laboratoire.

3. RÉSULTATS DU SIMULATEUR DE COUVERT NIVAL

Afin de discriminer entre les processus physico-chimiques initiés par la lumière de ceux qui se produisent sans lumière sur les espèces azotées NO_3^- et NH_4^+ , nous avons utilisé le simulateur de couvert nival en noirceur.

3.1 Analyse des filtres en Téflon et en Nylon

Les analyses faites sur les filtres en Nylon et en Téflon à la fin des expériences n'ont montré aucune substance chimique adsorbée sur les filtres dans les deux expériences (2 et 3). On assume alors qu'il n'y a pas eu de perte de HNO_3 vers l'atmosphère.

3.2 Évolution physico-chimique des strates nivales dans le simulateur de couvert nival

Les Tableaux 14 et 15 montrent la concentration moyenne des anions à différents niveaux du couvert nival suite aux deux dernières expé-

TABLEAU 14: Concentrations moyennes des anions à différents niveaux du couvert nival pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 29 janvier au 9 février 1993.

[Cl ⁻] mg L ⁻¹	[NO ₃ ⁻] mg L ⁻¹	[SO ₄ ²⁻] mg L ⁻¹	Strate
5,96	6,37	1,83	Strate 1 supérieure
5,82	6,22	1,94	Strate 2
5,93	6,09	1,94	Strate 3
6,03	6,10	1,94	Strate 4
6,02	6,16	1,95	Strate 5
5,30	5,94	1,92	Strate 6 inférieure

TABLEAU 15: Concentrations moyennes des anions à différents niveaux du couvert nival pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 12 mars au 29 mars 1993.

[Cl ⁻] mg L ⁻¹	[NO ₃ ⁻] mg L ⁻¹	[SO ₄ ²⁻] mg L ⁻¹	Strate
3,66	1,51	1,15	Strate 1 supérieure
3,57	1,52	1,16	Strate 2
3,33	1,52	1,17	Strate 3
2,96	1,47	1,20	Strate 4
3,62	1,58	1,24	Strate 5 inférieure

riences sur le simulateur de couvert nival (voir Annexe 6 et 7 pour les données complètes). Chaque strate représente environ 10 cm de neige contenue à l'intérieur du simulateur, la strate 1 étant toujours celle au-dessus, donc à la température la plus basse. Les concentrations de départ des anions sont montrées au Tableau 16.

TABLEAU 16: Concentrations des anions au début des expériences dans le simulateur de couvert nival.

Dates des expériences sur le simulateur de couvert nival	Cl ⁻ mg L ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg L ⁻¹
29 janvier au 9 février 1993	5,94	6,15	1,91
12 mars au 29 mars 1993	3,52	1,49	1,17

A la fin des deux expériences, nous avons observé un changement dans la structure des cristaux de neige, de flocons de neige, ils étaient transformés en grains arrondis liés entre eux. Donc le métamorphisme de la neige a eu lieu dans le simulateur de couvert nival sous l'influence du gradient de température. De plus, nous avons remarqué un dépôt de givre sous le dessous du couvercle du réfrigérant du haut. L'origine de ce givre aurait pu être le résultat d'une condensation de vapeur d'eau à partir des apports d'air médical ou la perte de vapeur d'eau de la surface de la neige. Nous en sommes venus à la conclusion que la formation de givre relève surtout des apports d'air médical, car nous n'avons pas observé une diminution de la hauteur de neige dans le simulateur. (Éric Brun, communication personnelle).

3.3 Échanges neige-atmosphère

Pour le Tableau 14, on constate après une analyse statistique (T Test; niveau de confiance 95 %) qu'il n'y a aucune perte d'espèces chimi-

d'air n'ont rien révélé. Nous observons une migration de la strate 1 vers la strate 2 pour le SO_4^{2-} et une migration de tous les anions de la strate 6 vers la strate 5, les autres strates sont restées stables.

Pour le Tableau 15, on constate après une analyse statistique (T Test; niveau de confiance 95 %) qu'il n'y a aucune perte d'anions vers l'atmosphère de la strate 1 ce qui confirme les résultats de la première expérience. Nous observons une migration de la strate 3 vers la strate 2 et ensuite vers la strate 1 pour le Cl^- , une migration de la strate 1 vers la strate 2 et de la strate 4 vers la strate 3 pour le NO_3^- , une migration de la strate 3 vers la strate 4 pour le SO_4^{2-} et une migration de tous les anions de la strate 4 vers la strate 5.

3.4 Migration dans le couvert nival

Afin de discuter de la migration dans le couvert nival (entre les strates), il faudrait distinguer la migration réelle des espèces chimiques de la migration apparente.

Les migrations réelles des espèces chimiques sous formes gazeuses une fois désorbées des cristaux de neige peuvent se faire par diffusion ou convection avant d'être capté par d'autres cristaux. Dans le cas de couvert nival en milieu naturel, les deux processus pourraient être actifs. Dans notre simulateur de couvert nival, seulement la diffusion sera active. En ce qui concerne la migration des ions désorbés des cristaux de neige, elle peut se

faire par l'effet phorétique dû à la diffusion de vapeur d'eau ou par gravité dépendant de la grandeur de l'aérosol rejeté; ou par déplacement sous l'influence des charges électrostatiques. Dans le cas du couvert nival en milieu naturel, ce processus serait surtout actif à l'interface neige-atmosphère (sublimation, vent). Dans le cas du simulateur de couvert nival, nous croyons que ces processus soient peu en évidence et qu'il y aurait très peu de migration avant que les espèces chimiques soient captées de nouveau par d'autres cristaux.

Par opposition à la migration réelle, il y aura une migration apparente des espèces chimiques s'il y a eu une migration de vapeur d'eau seulement entre les strates. Donc une strate qui perdrait de l'eau par la diffusion de vapeur verra ses concentrations augmentées tandis que l'autre qui gagnerait l'eau par cristallisation de vapeur d'eau en provenance de la première verra les siennes diminuées sans que sa charge chimique soit changée. Dans le cas d'une migration apparente, chaque espèce démontrerait le même comportement.

Dans le cas d'une migration réelle, les taux de migration pourraient fortement varier selon le degré d'adsorption de l'espèce et sa nature gazeuse ou ionique. Une migration réelle pourrait donc se manifester par une augmentation inégale des espèces chimiques dans des strates juxtaposées. Par contre, une migration apparente donnerait toujours une augmentation ou une diminution égale pour toutes les espèces.

Pour les deux expériences, il y a une migration dans la strate inférieure dont l'ampleur est plus grande que les migrations dans les autres strates. On devait s'attendre à ce résultat s'il y avait migration apparente dans le couvert nival; car on retrouve à ce plus bas niveau la température la moins froide, les plus grandes pressions de vapeurs d'eau et le degré de diffusion le plus élevé de vapeur d'eau vers les strates au-dessus. Par contre, s'il y a une migration réelle, on s'attend à l'observer plus en évidence dans la dernière strate car la vitesse de métamorphisme des cristaux de neige est la plus élevée.

Toutefois, la direction des flux entre la dernière strate et celle au-dessus s'oppose pour les deux expériences; pour la première expérience, une migration de la strate inférieure vers la strate supérieure et le contraire pour la deuxième expérience. A ce stade-ci, on ne peut pas expliquer ce changement de flux n'ayant aucune information sur l'évolution plus précise des déplacements des espèces chimiques pendant la période expérimentale.

Même si la vitesse de métamorphisme et le degré de diffusion de vapeur d'eau sont moins élevés aux strates supérieures, il existe une possibilité de migration des ions que nous observons aussi dans les deux expériences.

On ne peut pas conclure si les migrations dominantes sont réelles ou apparentes à partir d'une analyse de transfert de vapeur d'eau à l'intérieur du couvert nival, la densité des strates n'ayant pas été prise. L'analyse des

différents taux de migration entre la dernière strate et celle au-dessus (expérience #1 Cl^- , $18 \mu\text{eq L}^{-1}$; NO_3^- , $3,4 \mu\text{eq L}^{-1}$; SO_4^{2-} , $0,2 \mu\text{eq L}^{-1}$ | expérience #2 Cl^- , $1,8 \mu\text{eq L}^{-1}$; NO_3^- , $1,5 \mu\text{eq L}^{-1}$; SO_4^{2-} , $1,4 \mu\text{eq L}^{-1}$) suggère fortement la prédominance de la migration réelle de ces espèces chimiques à l'intérieur du couvert nival. Pour les autres migrations reportées aux strates supérieures, on peut conclure qu'elles sont réelles puisque seulement quelques espèces chimiques ont migré et non la totalité.

On constate donc qu'il y a une possibilité de migration des anions dans le couvert nival lors du processus de métamorphisme des cristaux de neige mais qu'aucune perte n'a lieu vers l'atmosphère. La perte possible d'ions vers l'atmosphère ne peut-être expliquée à elle seule par le processus de métamorphisme des cristaux de neige. Des recherches futures avec le simulateur de couvert nival pourraient porter sur la photochimie et l'utilisation de peroxydes dans l'air passant dans le système d'air.

V. CONCLUSION

Au lac Laflamme, bien que les sacs en mailles en Nylon n'étaient pas inertes, on voit que lors du métamorphisme des cristaux de neige, il y a désorption d'acide nitrique gazeux. Cet acide nitrique gazeux pourrait migrer dans le couvert nival ou être réémis vers l'atmosphère.

Sur la calotte de glace Agassiz, les profils physico-chimiques des tranchées de neige ont montré une variabilité saisonnière, des pics maximums en hiver et des pics minimums en été, ce qui confirme d'autres études faites dans les environs (Koerner et Fisher 1982, Barrie et Bottenheim 1990).

Pour la mesure des flux d'ions à l'interface neige-atmosphère, nous avons observé que des gains d'ions résultant de dépôts secs. La vitesse de dépôt sec calculée pour le SO_4^{2-} correspond à celles rapportées dans la littérature. Par contre, la vitesse de dépôt sec calculée pour le NO_3^- est plus faible que celles rapportées. De plus, on a observé un flux plus faible de NO_3^- au site ouvert à la radiation solaire par rapport à ceux du site couvert d'une toile transparente et du site couvert d'une toile opaque. D'autres études sur ce phénomène doivent être entreprises afin de déterminer directement si les processus photochimiques pourraient jouer un rôle dans la dynamique de NO_3^- à l'interface neige-atmosphère.

On a découvert du bromure dans la neige lors de cette étude. On doit étudier sa variation saisonnière dans le couvert nival car cette espèce chimique serait impliquée lors de la diminution de l'ozone dans l'atmosphère de l'Arctique Canadien (Finlayson-Pitts et al. 1990).

Pour le simulateur de couvert nival, nous avons observé une migration réelle des ions dans le couvert lors du métamorphisme des cristaux de neige. Par contre, on n'a observé aucune perte d'acide nitrique vers l'atmosphère. On en conclut qu'il n'y a pas de perte d'acide nitrique vers l'atmosphère en l'absence de lumière. Toutefois, les études sur le terrain démontrent que la lumière peut jouer un rôle dans la dynamique de NO_3^- à l'interface neige-atmosphère (résultats du glacier Agassiz). Afin de vérifier ce phénomène, on doit étudier l'influence de la lumière sur la neige dans le simulateur de couvert nival ayant une source d'irradiation lumineuse.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- BALES, R.C., VALDEZ, M.P., DAWSON, G.A. et D.A. STANLEY (1987), Physical and chemical factors controlling gaseous deposition of SO₂ to snow, *Seasonal snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology*, H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas (éditeurs), publié par Reidel Publishing Company, pp. 289-297.
- BARRIE, L.A. (1986), Arctic air pollution: an overview of current knowledge, *Atmos. Environ.*, Vol. 20, pp. 643-663.
- BARRIE, L.A. et M.J BARRIE (1990), Chemical components of lower tropospheric aerosols in the high Arctic: six years of observations, *J. of Atmos. Chem.*, Vol. 11, pp. 211-226.
- BARRIE, L.A. et J.W. BOTTENHEIM (1990), Sulphur and nitrogen in the arctic atmosphere, *Pollution of the Arctic atmosphere*, W. Sturges (éditeurs), New-York, Elsevier Press, 53 pages.
- BARRIE, L.A., BOTTENHEIM, J.W., SCHNELL, R.C., CRUTZEN, P.J. et R.A. RASMUSSEN (1988), Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere, *Nature*, Vol. 334, pp. 138-141.
- BARRIE, L.A., DEN HARTOG, G., BOTTENHEIM, J.W. et S. LANDSBERGER, (1989), Anthropogenic aerosols and gases in the lower troposphere at Alert Canada in April 1986, *J. of Atmos. Chem.*, Vol. 9, pp. 101-127.
- BARRIE, L.A. et R.M. HOFF (1985), Five years of air chemistry observations in the Canadian Arctic, *Atmos. Environ.*, Vol. 19, pp. 1995-2010.
- BARRIE, L.A., KOERNER, R.M. et D. FISHER (1985), Twentieth century trends in Arctic air pollution revealed by conductivity and acidity observations in snow and ice in the Canadian high Arctic, *Atmos. Environ.*, Vol. 19, No. 12, pp. 2055-2063.
- CADLE, S.H., DASCH, J.M. et R.V. KOPPLE (1987), Composition and runoff in northern Michigan, *Environmental Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 295-299.
- CADLE, S.H., DASCH, J.M. et P.A. MULAWA (1985), Atmospheric concentrations and the deposition velocity to snow of nitric acid, sulfur dioxide and various particulate species, *Atmos. Environ.*, Vol. 19, No. 11, pp. 1819-1827.

- CHANG, T.Y. (1984), Rain and snow scavenging of HNO₃ vapor in the atmosphere, Atmos. Environ., Vol. 18, No. 1, pp. 191-197.
- COLBECK, S.C. (1987), Snow metamorphism and classification, Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, and Hydrology, H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas (éditeurs). D. Reidel, Dordrecht, NATO-ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, 211, pp. 1-36.
- DASCH, J.M. et S.H. CADLE (1985), Wet and dry deposition monitoring in southeastern Michigan, Atmos. Environ., Vol. 19, No. 5, pp. 789-796.
- DAVIDSON, C.I. (1989), Mechanisms of wet and dry deposition of atmospheric contaminants to snow surfaces, The Environmental Records in Glaciers and Ice Sheets, H. Oeschger et C.C. Langway Jr. (éditeurs), publié par John Wiley & Sons Ltd., pp. 29-51.
- DELMAS, V. et H.G. JONES (1987), Wind as a factor in the direct measurement of the dry deposition of acid pollutants to snow covers, Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, and Hydrology, H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas (éditeurs). D. Reidel, Dordrecht, NATO-ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, 211, pp. 321-335.
- FINLAYSON-PITTS, B.J., LIVINGSTON, F.E. et H.N. BERKO (1990), Ozone destruction and bromine photochemistry at ground level in the Arctic spring, Nature, Vol. 343, pp. 622-625.
- GILBERT, S.R. et J.V. HAYES (1983), Differential rain and snow scavenging efficiency implied by ionic concentration differences in winter precipitation", Precipitation Scavenging, Dry Deposition, and Resuspension, Vol. 2, H.R. Pruppacher, R.G. Semonin and W.G.N. Slinn (éditeurs), publié par Elsevier Science Publishing Co., Inc., pp. 249-264.
- GREGOR, D.J. et W.D. GUMMER (1989), Evidence of atmospheric transport and deposition of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in Canadian Arctic snow, Environ. Sci. Technol., Vol. 23, No. 5, pp. 561-565.
- HOGAN, A.W., BARNARD, S., WOLFE, D., DUBOIS, M. et A.M. PITANELLI (1985), Chemical migration in mid latitude snowpack, Proceedings of the 42nd Annual Meeting, Eastern Snow Conference, Montréal, Québec, 6 et 7 juin 1985, pp. 243-354.

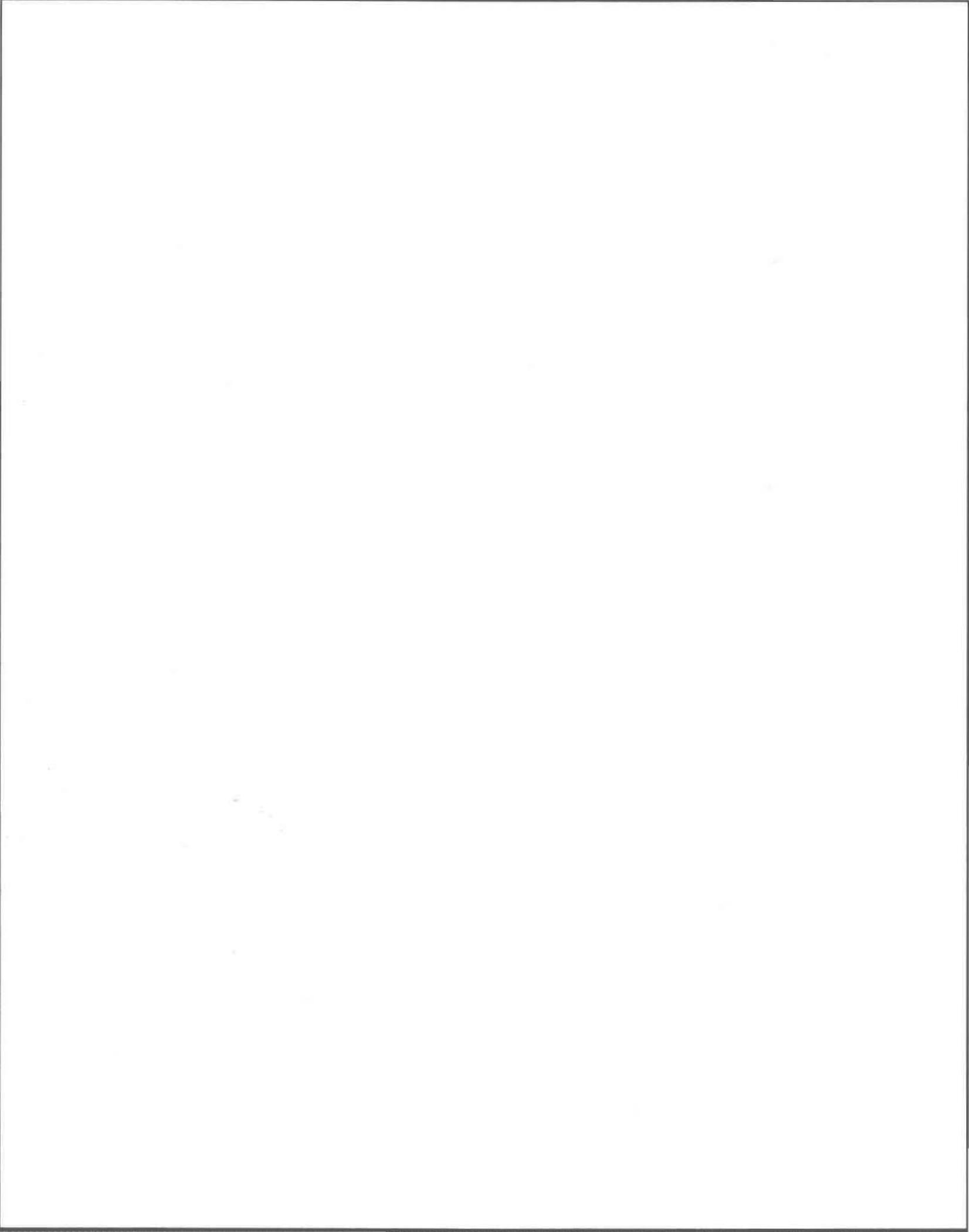
- HUEBERT, B.J. (1983), Measurements of the dry-deposition flux of nitric acid vapor to grasslands and forest, Precipitation Scavenging, Dry Deposition, and Resuspension, Vol. 2, H.R. Pruppacher, R.G. Semonin and W.G.N. Slinn (éditeurs), publié par Elsevier Science Publishing Co., Inc., pp. 785-794.
- HUEBERT, B.J., FEHSENFELD, F.C., NORTON, R.B. et D. ALBRITTON (1983), The scavenging of nitric acid vapor by snow, Precipitation Scavenging, Dry Deposition, and Resuspension, Vol. 2, H.R. Pruppacher, R.G. Semonin and W.G.N. Slinn (éditeurs), publié par Elsevier Science Publishing Co., Inc., pp. 293-302.
- JEFFRIES, D.S. et W.R. SNYDER (1981), Variations in the chemical composition of the snowpack and associated meltwaters in central Ontario, Proceedings of the Eastern Snow Conference, 38 Annual Meeting, Syracuse, N.Y., pp. 11-22.
- JOHANSSON C. et L. GRANAT (1986), An experimental study of the dry deposition of gaseous nitric acid to snow, Atmos. Environ., Vol. 20, No. 6, pp. 1165-1170.
- JONES, H.G. (1988), Nitrate, sulfate and hydrogen fluxes through a boreal forest snowpack during the spring melt period, Verh. Internat. Verein. Limnol., Vol. 23, pp. 2286-2290.
- JONES, H.G. et M. BISSON (1984), Physical and chemical evolution of snowpacks on the Canadian Shield (winter 1979-1980), Verh. Internat. Verein. Limnol., Vol. 22, pp. 1786-1792.
- JONES, H.G. et C. LABERGE (1988), Nitrate losses from snow strata in snowpacks under cold (< 0° C) conditions, Hydrology of Alpine Watersheds, AGU fall meeting, San Francisco, décembre 1988, Abstract EOS, Vol. 69, (H32C-06), pp. 1202 .
- JONES, H.G. et J. STEIN (1990), Hydrogeochemistry of snow and snow-melt in catchment hydrology, Process Studies in Hillslope Hydrology, M.G. Anderson et T.P. Burt (éditeurs), publié par John Wiley & Sons Ltd, pp. 255-297.
- KOERNER, R.M. et D. FISHER (1982), Acid snow in the Canadian high Arctic, Nature, Vol. 295, pp. 137-140.

- LANGWAY, C.C., KLOUDA, G.A., HERRON, M.M. et J.H. CRAGIN (1977), Seasonal variations of chemical constituents in annual layers of Greenland deep ice deposits, Symposium Isotopes and Impurities in Snow and Ice, Grenoble, France, 1975, IASH publication No. 118, pp. 302-306.
- LEVINE, S.Z. et S.E. SCHARWITZ (1982), In-cloud and below-cloud scavenging of nitric acid vapor, Atmos. Environ., Vol. 16, No. 7, pp. 1725-1734.
- MULVANEY, R., WOLFF, E.W. et K. OATES (1988), Sulfuric acid at grain boundaries in Antarctic ice, Nature, Vol. 331, pp. 247-249.
- NEFTEL, A., SIGG, A. et P. JACOB (1987), H₂O₂ in solid precipitation, Physical-chemical Behavior of Atmospheric Pollutants, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, pp. 45-57.
- NEUBAEUR, J. et K.G. HEUMANN (1988), Nitrate trace determinations in snow and firn core samples of ice shelves at the Weddell Sea, Antarctica, Atmos. Environ., Vol. 22, No. 3, pp. 537-545.
- PAPINEAU, M. (1988), Les études du bilan ionique du lac Laflamme en 1985 et 1986, Environnement Canada, Direction des Eaux Intérieures, Québec, 105 pages.
- PAPINEAU, M. (1987), Effects of acid precipitation on a boreal forest ecosystem: ion budgets and change in water chemistry for the Laflamme lake watershed, Environnement Canada, Direction des Eaux Intérieures, Québec, 108 pages.
- PIERSON, W.R., BRACHACZEK, W.W., GORSE, R.A., JAPAR, S.M. et G.M. NORBECK (1986), On the acidity of dew, J. Geophys. Res., Vol. 91, pp. 4083-4096.
- POMEROY, J.W., DAVIES, T.D. et M. TRANTER (1991), The impact of blowing snow on snow chemistry, Seasonal Snowpacks, Processes of Compositional Changes, T.D. Davies, M. Tranter et H.G. Jones (éditeurs), Springer Verlag NATO-ASI Series G: Ecological Sciences, 28, pp.71-114.
- SIGG, A., NEFTEL, A. et F. ZIRCHER (1987), Chemical transformation in a snowcover at Weissfluhjoch, Switzerland. Situated at 2 500 m.a.s.l., Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology, a NATO-ASI Les Arcs, France 13-24 July 1986, Editeurs H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas, Reidel Publishing Company, pp. 269-280.

STEIN, J., JONES, H.G., LEVESQUE, D., GAMACHE, S., DUCHESNEAU, M., LABERGE, G. et W. SOCHANSKA (1990), Portrait régional de la qualité des eaux de fonte, Rapport de recherche préparé pour la Direction Générale des Eaux Intérieures Environnement Canada.

STURGES, W.T. et L.A. BARRIE (1988), Chlorine, bromine and iodine in Arctic aerosols, Atmos. Environ., Vol. 22, No. 6, pp. 1179-1194.

WOLFF, E.W. et D.A. PEEL (1985), The record of global pollution in polar snow and ice, Nature, Vol. 313, pp. 535-540.



ANNEXE 1: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue recueillis dans les tranchées du site au sud du campement pour la mesure du profil physico-chimique en mai 1991.

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
1	5	14,3		54,5	105,0	3,8	1,3	26,0	6,2	5,3
	13	203,0		300,6	195,6	103,6	5,4	67,4	21,5	18,8
	22	62,1		99,9	80,5	14,7	2,3	901,9	104,3	8,4
	35	48,3		180,6	374,8	10,5	3,0	103,5	22,8	9,3
	50	125,2		76,7	234,1	52,6	3,0	48,5	15,3	2,2
	70	17,4		124,3	98,5	0,2	1,1	11,4	2,8	8,3
	90	83,4		181,8	838,0	32,6	3,3	76,8	18,5	14,8
	108	41,7		85,6	143,2	14,0	2,6	461,8	36,1	3,8
	118	26,7		94,6	94,0	8,0	3,7	43,7	6,1	4,4
2	5	22,5		52,0	116,7	7,5	1,4	20,6	4,3	6,3
	13	159,5		349,4	191,8	62,2	4,4	57,3	13,6	26,2
	22	30,0		116,5	91,9	4,5	1,6	99,7	17,1	15,3
	35	43,4		132,2	110,6	6,6	1,6	23,8	5,0	5,6
	50	137,1		79,6	224,7	62,8	3,3	31,7	12,9	3,2
	70	16,9		119,1	51,0	0,3	1,2	12,9	3,0	6,2
	90	64,8		175,2	574,0	28,9	2,7	25,7	8,6	9,7
	108	42,2		56,2	76,6	15,0	1,7	120,6	13,9	3,5
	118	49,7		205,3	179,5	8,0	2,2	60,0	10,7	16,9

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
3	5	120,5		76,9	646,4	69,4	4,6	112,7	7,2	7,1
	13	32,9		46,5	63,7					
	22	29,7		86,7	40,4	7,9	2,3	14,4	4,2	5,9
	35	53,2		217,5	285,7	12,2	2,7	118,8	18,3	12,1
	50	27,7		152,4	241,5	12,1	2,2	6,4	4,1	8,2
	70	15,5		113,3	106,6	1,5	2,0	9,5	3,6	10,5
	90	86,1		267,3	685,7	39,6	3,8	39,8	11,0	10,9
	108	40,6		72,9	125,1	18,9	3,2	369,2	26,4	3,6
	118	36,8		147,7	78,8	9,5	2,5	28,5	6,5	9,3
4	5	111,6		71,0	534,9	62,2	4,6	113,9	6,0	6,8
	13	40,4		167,7	85,6	12,4	2,6	23,7	5,8	9,2
	22	26,4		66,4	41,1	7,1	2,2	20,8	5,8	5,2
	35	55,3	1,48	212,3	251,5					
	50	43,4	0,95	200,3	297,4	18,6	2,5	8,5	5,1	5,7
	70	20,3		171,5	111,1					
	90	48,4		312,6	1086	20,2	3,9	43,3	9,2	18,1
	108	45,8		84,8	148,9	21,2	3,4	410,5	33,8	3,8
	118	46,2		147,0	142,5	11,8	2,7	40,0	7,2	15,4

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
5	5	180,0		142,2	431,5	102,1	5,0	41,4	14,5	4,6
	13	86,5		270,5	144,1	27,2	3,2	39,8	9,0	20,2
	22	19,5		62,1	28,1	3,4	1,9	12,3	5,0	5,2
	35	58,0		289,6	178,7	7,0	2,4	43,9	8,2	17,8
	50	97,8		325,1	382,9	32,3	2,5	5,6	7,8	3,0
	70	17,1		122,1	60,6	0,7	1,8	5,2	4,7	4,5
	90	71,6		236,9	493,0	18,4	3,0	56,5	10,3	10,3
	108	44,5		49,2	121,3	21,2	2,6	42,1	7,6	2,0
	118	48,0		165,8	128,2	11,5	2,9	57,4	9,8	14,2
6	5	157,4		138,5	413,7	83,3	4,0	46,4	13,4	2,6
	13	58,0		49,7	12,4	3,3	1,8	5,2	4,2	3,4
	22	47,8		129,5	57,2	15,2	2,1	18,0	6,2	6,3
	35	63,3		354,4	179,7	10,2	3,8	38,1	7,4	14,7
	50	66,5		148,4	318,7	27,6	2,8	11,9	7,0	3,4
	70	17,0		117,9	91,8	1,3	2,0	7,8	4,2	6,8
	90	66,0	3,16	219,6	372,7	17,9	2,8	46,9	8,8	12,4
	108	131,5		41,7	40,3	18,2	2,3	75,8	8,9	2,6
	118	22,9		50,0	48,6	8,2	2,0	66,6	8,0	2,7

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
7	5	38,3		82,5	220,0	12,2	4,0	40,5	6,8	7,1
	13	238,7		336,8	190,2	111,2	7,6	38,5	16,8	25,0
	22	12,8		45,9	23,1		2,7	16,6	3,1	6,1
	35	114,6		166,9	540,6	27,5	5,0	53,4	12,6	12,4
	50	29,0		145,9	245,0	10,8	3,6	12,9	4,3	5,8
	70	13,8		80,2	319,7		3,3	10,8	2,7	14,2
	90	32,8		205,6	170,2		3,1	28,3	5,2	13,2
	108	79,3		44,7	104,4	29,1	4,0	19,2	7,0	2,5
	118	88,3		243,5	462,0	24,9	5,0	54,7	15,6	32,4
8	5	102,8		58,5	227,8	41,9	4,4	55,9	14,4	5,4
	13	123,5		322,3	184,5	32,2	4,9	56,8	12,2	26,1
	22	15,7		51,0	22,6		2,6	18,0	4,4	6,4
	35	51,6	2,10	206,8	247,1	8,4	3,6	100,1	13,8	13,8
	50	27,0		220,8	189,6	7,2	3,3	8,0	3,0	5,0
	70	11,5		75,3	302,7		3,0	10,9	2,8	11,0
	90	123,1		295,4	561,6	39,7	5,2	105,1	24,4	13,6
	108	94,9		47,7	78,3	36,6	4,3	13,8	8,5	4,3
	118	28,1		83,4	31,2		3,5	12,0	4,1	10,9

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
9	5	118,0		80,3	268,4	56,6	4,4	44,8	11,0	
	13	83,8		278,9	131,6	23,5	3,3	37,2	8,3	12,9
	22	10,1		54,2	16,9		2,1	10,2		6,3
	35	25,5		94,3	86,1	6,4	2,4	15,5	5,2	4,3
	50	66,4		237,8	217,5	20,2	3,0	5,2		3,5
	70	8,1		125,9	346,2		2,6	7,6		11,1
	90	56,4		121,7	386,8	17,2	3,7	23,6	6,3	7,1
	108	37,8		93,7	111,3	14,2	3,2	120,9	11,0	3,8
	118	64,1		183,0	191,0	18,6	3,8	32,3	7,9	14,1
10	5	142,1		92,6	353,8	65,5	4,7	30,3	10,9	
	13	45,4		196,3	91,3	13,0	3,1	39,1	7,2	7,3
	22	13,0		52,6	15,4	4,4	2,2	16,9	5,2	3,7
	35	39,5		92,7	189,9	12,9	3,6	60,3	9,1	4,7
	50	161,3		283,2	389,2	47,3	5,6	11,1	15,1	8,0
	70	4,2		72,1	325,4		2,7	10,4		9,6
	90	49,0		126,4	389,4	16,7	3,4	26,1	7,1	7,0
	108	36,9		98,4	108,6	13,2	2,8	118,6	12,0	4,6
	118	5,1		90,4	5,6		2,4			7,0

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
11	5	91,3		114,5	305,4	34,8	3,6	38,1	8,2	7,5
	13	36,1		63,6	84,8	13,7	3,0	14,2	5,2	4,0
	22	149,4		213,6	109,5	80,3	4,8	26,8	13,2	10,8
	35	45,7		214,8	242,2	9,8	3,4	87,5	12,4	14,4
	50	114,7		156,6	347,7	36,6	3,8		7,6	
	70	5,7		69,3	75,4	4,8	2,8	33,0	5,6	7,6
	90	11,7		82,6	21,2	4,9	2,5			5,5
	108	142,4		51,5	257,5	64,7	3,8	48,5	13,6	
	118	21,2		45,2	32,5	9,5	2,9	46,0	6,6	3,1
12	5	62,5		108,2	284,7	21,2	3,3	33,8	7,3	4,2
	13	4,4		71,2	30,0		2,4	13,3		6,5
	22	5,7		14,2	7,4		2,6	21,3	5,0	6,6
	35	64,1		196,2	213,4					
	50	171,1		94,6	213,4	85,9	4,6	22,5	14,6	
	70	7,2		73,8	187,4	4,6	3,0	25,1	4,9	7,7
	90	82,8		221,0	614,2	32,2	4,5	43,9	12,2	15,6
	108	29,6		83,3	123,9	11,5	3,0	124,2	17,7	4,6
	118	50,6		208,6	73,2	7,6	3,3	41,0	7,3	9,3

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
13	5	165,2		106,8	448,4	87,5	5,2	44,3	18,8	5,8
	13	32,2		147,6	65,8	8,1	2,8	31,3	5,9	6,6
	22	9,3		47,5	10,3		2,5	20,6		6,8
	35	43,3		146,6	198,4	9,8	2,8	92,9	15,1	7,6
	50	43,1		204,8	272,0	16,9	3,1	10,8	6,0	6,2
	70	7,3		108,8	147,4		3,5	9,5		10,8
	90	37,9		301,4	331,2	9,7	3,5	47,7	9,1	10,9
	108	70,4		135,4	206,5	23,4	3,9	124,0	22,5	4,1
	118	3,2		28,7	2,7		2,4	16,1		7,9
14	5	136,8		120,8	390,8	66,5	4,6	45,7	17,2	6,4
	13	45,4		184,6	77,6	11,6	3,4	33,2	6,8	8,3
	22	28,9		77,4	27,2	8,7	3,2	23,8	5,8	4,3
	35	54,6		226,2	231,8	9,0	2,9	68,9	17,9	12,6
	50	25,4		221,0	196,4	8,7	2,7	7,7		3,7
	70	8,5		117,0	147,8		2,9	13,8		11,6
	90	52,5		180,7	448,6	14,4	3,8	43,4	9,5	11,1
	108	51,8		133,4	158,0	18,5	3,3	116,0	26,2	7,1
	118	3,2		54,6	5,2		3,0	15,4		7,0

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
15	5	20,4		45,7	61,8	8,9	2,9	15,9	5,2	4,2
	13	184,1		328,3	181,3	77,0	6,2	59,1	20,0	20,0
	22	9,6		47,5	10,3		3,2	21,8		6,4
	35	52,4		218,1	241,3	9,4	3,2	107,0	19,6	11,1
	50	6,6		74,1	36,1		2,9			7,2
	70	7,5		111,1	81,2		2,6	13,3		10,0
	90	83,1		214,8	575,6	31,8	4,2	38,9	12,5	13,9
	108	10,7		56,7	58,9	5,1	2,5	96,2	12,2	3,9
	118	66,0		188,4	280,1	7,0	2,6	13,3	5,4	13,2
16	5	13,4		73,5	118,0	4,7	1,7	7,4	3,5	3,1
	13	232,6		288,2	185,2	192,0	7,5	31,8	20,6	16,2
	22	6,8		44,1	5,3	2,4	1,6	11,3	3,8	2,4
	35	165,9		166,9	516,0	37,6	5,8	28,7	18,2	8,3
	50	8,7		76,3	70,2	3,4	1,1	7,7	3,5	2,0
	70	10,7		124,1	254,7	3,0	2,5	7,8	3,3	12,8
	90	71,6		129,5	382,0	23,9	2,9	15,8	9,2	6,7
	108	15,5		28,7	23,4	5,6	2,0	30,5	5,9	0,8
	118	64,2		223,3	196,0	12,3	3,3	30,3	11,1	14,3

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
17	5	79,7		81,4	479,6	32,7	3,3	33,6	12,6	5,5
	13	69,6		261,5	140,2	16,0	2,9	20,6	11,1	13,0
	22	25,5		77,3	41,4	5,2	1,5	12,8	5,4	4,1
	35	38,2		148,8	87,5	2,9	2,3	9,7	4,7	19,6
	50	30,2		136,1	195,6	7,9	1,9	4,4	4,4	3,6
	70	19,6		158,9	247,9	3,3	1,9	8,1	3,7	12,4
	90	143,5		225,9	548,1	49,8	4,0	138,4	24,4	7,4
	108	24,9		67,3	80,6	6,6	1,7	101,7	10,6	2,8
	118	57,3		161,5	215,2	10,0	2,5	32,5	9,2	19,5
18	5	230,2		141,4	456,9	161,2	4,9	28,4	19,5	
	13	18,8		100,8	51,1	3,0	1,7	8,1	2,6	3,7
	22	48,7		102,6	48,2	3,0	1,5	8,4	3,6	4,5
	35	32,0		136,3	114,2	11,0	1,8	10,6	6,1	3,2
	50	24,8		175,4	175,0	6,0	1,7	2,7	3,4	4,8
	70	40,4		342,9	123,1	2,0	1,6	4,6	2,8	33,4
	90	162,0		216,7	364,2	56,9	3,8	160,8	25,1	5,2
	108	38,7		101,5	121,2	8,5	1,8	145,0	12,3	3,1
	118	46,3		101,5	58,9	11,6	2,2	6,7	10,0	3,9

Annexe 1: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ µg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
19	5	80,6		61,6	255,0	26,0	2,5	21,5	8,9	3,9
	13	15,4		89,2	49,6	3,0	1,0	7,5	3,3	9,7
	22	65,5		135,8	59,7	15,3	1,9	13,5	8,8	4,9
	35	65,1		248,0	279,0		4,1	102,2	12,4	16,2
	50	46,3		101,1	182,5	11,3	1,3	5,6	5,6	2,7
	70	17,4		139,2	96,5	1,9	1,8	3,4	2,8	10,5
	90	152,1		175,3	877,5	45,8	4,3	13,7	14,0	15,1
	108	50,3		75,0	149,0	13,8	2,5	158,2	19,1	2,5
	118	89,1		235,8	236,5	17,2	2,7	12,0	11,0	24,7
20	5	82,8		56,7	310,8	27,9	2,5	22,4	8,9	1,9
	13	11,6		72,6	58,8	2,4	1,3	2,3	2,6	3,2
	22	36,7		81,1	42,3	9,4	2,1	15,8	6,3	6,0
	35	39,6		190,6	1537	3,4	2,8	11,7	5,1	31,9
	50	40,0		159,4	208,7	9,0	1,6	2,7	4,2	3,2
	70	16,9		125,0	102,7	2,9	2,2	1,2	2,9	9,6
	90	57,2		131,9	476,2	12,3	2,9	29,2	8,7	10,0
	108	12,6		75,3	29,4	2,3	1,2	3,4	3,2	5,0
	118	46,3		205,2	107,4	4,2	1,9	11,2	6,2	6,7

ANNEXE 2: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue recueillis dans les tranchées du site au nord du campement pour la mesure du profil physico-chimique en mai 1991.

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
1	5	103,7	1,22	100,2	570,6	53,7	4,2	61,2	15,0	6,8
	12	108,9		186,4	112,9	51,8	3,6	23,7	8,9	8,7
	20	26,2		104,1	93,7	4,8	2,3	12,8	3,6	6,0
	32	37,8		119,2	222,4	14,0	2,1		2,6	3,8
	40	16,0		92,4	130,2	4,6	1,5	8,2		8,3
	50	19,5		113,4	114,7	2,4	2,6			9,2
2	5	74,0	1,08	234,1	194,3	22,7	3,0	26,7	5,8	11,4
	12	97,6		174,1	100,8	47,6	3,5	22,6	8,4	7,7
	20	17,3		65,9	59,7	2,2	2,2	12,3	2,4	5,6
	32	37,4		121,9	157,6	12,5	2,3	2,8	3,5	3,6
	40	23,8		148,7	114,7	3,6	2,1	9,6		13,4
	50	17,8		114,9	56,9	1,9	2,0			5,4

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
3	5	204,7		165,9	484,1	103,4	6,3	27,1	16,7	10,6
	12	65,0		174,4	133,3	26,2	3,1	15,8	5,3	10,9
	20	12,8		27,4	19,3	3,5	1,8	12,6	2,6	4,2
	32	27,5		81,5	102,7	8,1	2,4	6,8	2,5	5,2
	40	31,7		201,5	272,2	4,5	2,5	7,5		20,1
	50	19,2		122,2	76,4	2,2	2,2			6,3
4	5	81,2		217,4	267,8	27,4	3,6	28,4	7,3	11,9
	12	49,3		109,9	57,0	17,7	3,4	16,1	5,2	7,6
	20	10,9		37,2	13,1	2,0	2,0	8,4	2,4	4,4
	32	53,5		87,8	220,9	19,9	2,4	6,5	4,4	7,7
	40	11,7		53,4	49,4	2,0	1,9	7,9	2,4	4,4
	50	19,7		103,6	116,4	2,8	2,2			8,7

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
						μg L ⁻¹				
5	5	114,2		251,2	350,6	4,1	2,0	6,5		8,4
	12	38,1		84,7	66,2	22,9	2,8	25,4	6,4	7,7
	20	16,6		34,3	23,1	4,8	2,2	16,7	3,5	6,1
	32	106,9	1,80	129,9	438,8		1,7			11,5
	40	19,0		93,3	121,8	4,9	2,4	18,1	3,8	9,5
	50	19,2		115,2	115,0	2,2	2,4			8,0
6	5	147,0		228,0	657,1	68,4	5,4	83,8	23,0	20,8
	12	202,8		266,0	341,1	101,4	6,8	26,0	16,4	21,7
	20	27,9		58,8	49,7	4,0	2,6	12,4	3,4	4,5
	32	57,2	1,34	127,3	268,6		1,8			7,0
	40	20,1		85,0	220,6	6,3	1,9	19,2	4,3	10,6
	50	19,9		115,4	80,0	4,0	2,3			14,1

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
7	5	196,8		255,2	649,1	99,4	7,0	121,0	34,1	20,7
	12	81,4		54,1	30,7	14,2	2,5	18,4	5,1	5,6
	20	30,0		112,1	98,1	7,4	2,4	32,7	6,4	18,4
	32	126,5		124,4	317,0	54,9	3,6	21,1	10,2	
	40	38,0		115,3	124,2	12,3	2,2	4,2	3,2	10,9
	50	21,7		136,8	58,0	2,5	1,6			8,3
8	5	173,3		306,8	502,4	62,3	5,6	57,3	17,0	27,0
	12	25,9		49,8	52,3	8,8	1,9	17,2	4,0	8,0
	20	18,9		76,5	56,4	2,9	1,6	18,0	3,7	9,6
	32	95,3	3,09	149,4	413,8					
	40	80,3		95,0	217,1	29,3	3,1	12,6	6,9	11,0
	50	19,8		122,8	111,2					

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
9	5	132,0		295,4	250,4	48,4	4,9	41,4	12,5	29,6
	12	17,7		34,2	26,1	7,1	2,1	16,8	4,2	5,3
	20	22,0		91,7	83,0	5,3	1,6	14,4	4,2	12,4
	32	17,7		91,7	244,2	4,9	2,2	5,8	3,1	9,7
	40	16,6		130,9	95,4	1,9	2,0	3,6		18,5
	50	16,0		121,3	72,1	2,3	2,0			16,5
10	5	164,3		325,9	442,3	62,0	6,0	49,9	15,4	30,9
	12	41,4		88,0	128,1	16,1	2,5	16,9	5,5	8,5
	20	34,0		106,6	114,6	9,8	2,4	16,8	5,0	10,8
	32	134,7		247,5	747,7	27,1	3,2	45,0	11,4	16,5
	40	19,9		98,9	124,8	5,2	2,2	8,0	2,9	12,9
	50	19,1		113,7	103,5	2,1	2,1	3,3		11,7

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
11	5	67,2	0,99	182,1	226,4	25,6	3,6	26,0	5,8	8,1
	12	58,7		112,0	66,4	24,7	3,1	13,6	4,0	5,3
	20	24,2	1,20	119,8	105,5	4,3	2,7	12,7	2,3	11,4
	32	29,4	1,10	91,3	357,5	13,7	2,8	7,0	2,7	7,2
	40	10,8		89,7	82,2	3,2	2,3	5,6	1,3	7,7
	50	15,0	0,87	84,0	224,1	6,4	3,0	7,0	1,5	5,6
12	5	94,4	1,28	259,8	344,7	35,8	4,6	37,5	9,0	13,4
	12	45,9		97,8	58,3	20,2	3,1	19,6	4,6	3,6
	20	31,9	1,00	118,0	84,4	4,1	2,2	11,2	2,1	8,1
	32	17,0		79,4	292,5	8,0	2,6	4,7		4,8
	40	23,2		207,0	86,0		1,7	4,3		12,5
	50	17,7	1,02	124,9	155,0	4,1	3,0	3,6		7,2

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
13	5	236,0	1,32	310,1	560,1	118,0	8,7	66,8	24,2	27,5
	12	28,3		75,1	40,7	12,5	2,7	12,0	3,4	3,0
	20	56,7	2,68	141,3	337,2	18,7	3,9	25,4	6,0	6,3
	32	9,7		71,4	63,6	3,6	2,8			5,0
	40	16,4		75,7	369,6		1,8			8,2
	50	14,7		107,4	68,9	2,4	2,7	3,9		4,7
14	5	174,6	1,54	364,3	497,9	82,6	7,7	61,7	19,6	23,4
	12	55,6		114,0	169,2	19,7	2,6	15,2	5,3	7,7
	20	63,1	2,79	210,5	311,8	16,8	4,2	38,6	8,3	15,8
	32	32,5		103,2	254,7	11,4	3,3	5,8	2,3	8,5
	40	17,5		88,4	206,9	6,7	3,2	14,4	2,7	7,2
	50	15,4		113,6	70,1	3,7	2,7	4,5		5,0

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ µg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
15	5	92,0	1,55	187,7	431,4	47,5	5,1	31,3	11,2	10,6
	12	45,6		103,5	85,1	24,1	4,1	20,7	5,7	5,7
	20	33,0	1,84	163,1	146,0	7,3	3,9	11,8	3,0	22,9
	32	21,6		114,2	232,2	9,5	3,1	12,7	3,2	4,2
	40	29,0		160,2	214,1	6,0	3,7	5,3	2,2	6,5
	50	14,1		96,6	47,5	3,0	2,2			4,7
16	5	246,4	1,86	173,9	979,4					
	12	31,7		80,7	152,6	14,8	3,8	12,8	3,9	4,8
	20	32,0	1,17	191,2	118,2	5,8	3,4	8,6	2,5	15,4
	32	21,6	0,88	113,5	272,5	9,2	3,6	7,2	2,0	3,6
	40	5,6		94,8	152,8	6,8	2,6	5,0		8,4
	50	14,4		94,8	53,2	2,7	3,3			5,4

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
17	5	96,2		246,9	389,7	37,8	4,7	40,3	10,5	11,4
	12	19,5	0,90	44,9	62,0	9,5	3,5	18,5	3,9	4,0
	20	41,2	1,42	160,1	158,9	11,6	3,7	24,2	5,2	11,0
	32	9,9		92,8	81,5	2,7	2,6			9,1
	40	10,4		71,0	38,7	5,2	3,5	5,6		4,2
	50	15,4	1,03	111,4	113,6	4,1	3,9	6,4		7,7
18	5	146,3		218,8	228,7	85,6	6,8	27,6	13,9	12,3
	12	15,6		51,7	35,0	5,9	3,1	17,0	3,3	3,9
	20	43,2	1,66	238,0	172,6	8,8	3,4	15,4	3,3	18,4
	32	9,9		94,0	81,5	2,1	2,			11,8
	40	13,0		82,2	83,4	4,6	3,0	13,1	2,5	9,6
	50	15,6		102,0	70,4	3,5	3,8	3,0		4,9

ANNEXE 2: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
19	5	42,0	1,26	184,7	130,8	13,9	3,6	21,0	4,4	8,7
	12	167,4		230,4	134,4	100,1	7,4	32,0	16,2	13,8
	20	40,4	1,03	161,6	106,2	8,2	4,3	15,9	3,3	13,3
	32	165,0		76,2	342,1	6,6	3,2	4,4	3,0	7,5
	40	25,3	1,04	145,1	117,8		3,0	3,6		7,6
	50	15,2		104,5	111,2	4,4	3,4	4,5		12,3
20	5	34,2	1,17	150,8	188,1	14,2	4,0	11,5	3,3	7,7
	12	74,0		155,7	84,8	37,2	5,0	19,8	7,3	7,6
	20	43,8	1,33	111,7	113,0	8,6	3,7	16,9	3,0	16,2
	32	91,1		127,9	341,5	44,7	4,5	13,7	8,0	6,8
	40	19,9		140,1	75,32	4,1	3,5	7,6		11,4
	50	15,3		88,5	162,6	4,8	4,5	6,9		8,9

ANNEXE 3: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour la mesure des flux d'ions à l'interface
neige-atmosphère en mai 1991.

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	
							µg L ⁻¹					
BL-01			90,5	2,0	388,5	561,8	43,6	6,1	275,6	25,0	24,9	
BL-02			77,4	2,1	395,3	496,4	27,5	3,8	199,5	23,6	26,3	
BL-03		1	72,4	1,9	397,2	433,5	21,4	3,7	129,1	20,2	25,6	
BL-04			72,8	2,0	384,1	451,6	24,1	3,6	132,9	20,0	27,1	
BL-05			66,9	2,1	391,6	404,6	20,5	3,5	104,3	18,1	27,1	
BL-06			62,1	2,3	413,3	428,5	11,4	4,0	60,7	10,6	30,1	
BL-07			63,7	2,3	402,3	494,1	12,0	4,4	51,4	10,7	29,4	
BL-08		2	63,8	2,0	401,2	474,0	11,8	4,1	58,7	10,3	28,6	
BL-09			63,8	2,2	397,7	485,0	12,2	3,7	54,2	11,3	29,4	
BL-10			61,8	1,9	406,7	470,1	13,8	4,4	52,9	10,7	31,6	
BL-11			69,5	2,4	426,7	438,6	13,5	4,6	68,5	10,2	28,7	
BL-12			67,0	2,3	425,0	418,4	12,3	4,3	65,4	9,5	27,5	
BL-13		3	68,0	2,3	414,6	396,4	12,4	3,3	59,7	10,1	25,1	
BL-14			65,4	2,3	434,6	366,0	12,2	3,8	57,2	10,5	27,8	
BL-15			69,0	2,1	433,0	363,3	14,4	3,3	50,0	10,4	22,8	

ANNEXE 3: suite

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
BL-16			55,4	2,4	433,7	320,9	8,8	2,9	41,0	7,0	26,6
BL-17			57,5	2,2	435,9	312,7	9,2	3,7	44,8	7,8	29,3
BL-18		4	64,0	2,3	433,1	357,4	12,0	3,9	59,0	8,0	28,9
BL-19			62,6	2,3	431,5	393,0	10,4	2,8	56,5	8,9	26,4
BL-20			68,2	2,2	424,4	418,0	14,8	4,4	50,9	9,0	23,0
BL-21			58,6	2,3	439,4	341,7	20,3	0,1	30,6	17,3	25,7
BL-22			59,6	2,3	437,5	326,1	13,2	2,4	29,3	19,8	30,6
BL-23		5	59,2	2,0	443,6	295,7	13,2	1,0	29,0	18,0	27,9
BL-24			62,7	2,3	437,8	337,8	16,3	0,2	24,9	17,8	26,9
BL-25			60,0	2,2	438,6	320,9	13,8	0,1	40,6	17,0	34,5
BL-26			81,0	2,1	423,9	420,9					
BL-27			66,4	2,6	426,6	398,3	18,1	0,2	55,5	18,9	30,6
BL-28		6	60,9	2,2	427,3	371,0	16,0	0,5	52,6	18,7	29,2
BL-29			57,8	2,3	431,6	334,6	14,8	0,1	43,5	17,8	27,4
BL-30			62,3	2,3	428,8	366,5	18,2	0,8	65,6	19,3	28,3

ANNEXE 3: suite

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
							µg L ⁻¹				
BL-31			70,1	2,3	418,8	469,1	18,0	1,1	57,2	17,2	19,2
BL-32			71,1	2,2	411,1	490,2	18,7	1,6	64,8	17,8	27,6
BL-33		7	75,9	2,1	396,5	551,5	19,4	0,4	58,1	17,1	24,9
BL-34			71,1	2,1	411,3	504,2	18,3	0,3	65,4	17,9	35,1
BL-35			70,2	2,1	408,1	519,0	18,2	1,5	64,0	19,5	28,6
BL-36			67,1	2,2	382,9	542,4	18,8	2,3	64,6	18,9	28,1
BL-37			63,2	2,2	405,9	429,5	16,4	0,4	60,7	17,3	28,7
BL-38		8	61,5	2,0	416,4	403,4	15,6	2,4	46,8	18,1	25,1
BL-39			64,4	2,0	418,4	407,0	18,3	0,1	88,1	18,1	25,4
BL-40			64,7	2,0	421,4	405,3	17,0	2,4	78,6	18,2	28,3

ANNEXE 3: suite

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
µg L ⁻¹											
PR-01			85,0	2,4	37,8	416,6	38,2	12,0	488,6	50,4	34,4
PR-02			103,2	2,6	382,0	458,6	38,3	4,2	489,1	63,7	27,7
PR-03			99,0	2,7	388,0	497,7	37,6	4,7	499,8	78,8	29,2
PR-04	P	1	96,9	2,6	390,8	513,3	45,3	4,3	449,5	60,8	29,0
PR-05			115,2	2,4	387,5	555,0	47,2	5,3	501,4	81,9	28,5
PR-06			119,3	2,6	388,0	557,3	48,9	5,6	501,4	99,3	29,3
PR-07			112,2	2,9	389,6	570,5	44,8	5,5	497,2	96,8	28,6
PR-08			128,9	2,9	400,2	586,7	50,0	6,0	497,2	94,7	33,7
ETH-1			82,9	2,3	396,1	511,8	19,7	4,2	295,2	41,1	27,6
ETH-2			82,6	2,6	401,9	492,8	18,8	4,5	340,4	60,0	31,9
ETH-3	P	2	75,1	2,3	413,3	460,3	18,0	3,8	284,3	35,2	35,7
ETH-4			85,6	2,4	402,6	562,4	24,4	4,2	357,7	61,2	34,3
ETH-5			86,5	2,5	413,3	520,2	21,8	3,9	374,6	60,7	35,8
ETH-6			83,2	2,53	408,6	506,6	22,7	4,0	321,1	45,8	35,4
ET-03			88,9	2,9	408,6	485,5	24,2	4,3	445,1	85,1	32,5
ET-04	P	2	93,4	2,9	406,4	511,8	24,6	4,9	445,1	86,2	33,0
ET-05			120,4	3,3	413,1	535,8	41,8	6,0	496,0	110,8	21,6
ET-06			96,7	2,9	404,7	519,3	26,1	4,6	439,7	84,6	32,8

ANNEXE 3: suite

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	
							µg L ⁻¹					
P-01			87,5	2,7	442,7	459,0	22,0	4,5	434,7	88,0	27,8	
P-02			94,0	3,0	441,4	492,0	23,0	4,0	466,1	90,1	27,5	
P-03			106,4	3,2	440,9	490,7	26,7	4,2	494,4	95,6	24,1	
P-04	C	4	98,4	2,8	442,8	506,8	25,1	4,3	443,2	90,8	27,5	
P-05			95,2	3,0	457,3	399,6	24,0	4,5	488,4	89,5	31,0	
P-06			90,6	2,9	466,2	397,2		6,3	467,5	99,8	28,0	
P-07			79,7	2,8	457,2	376,1	17,4	4,0	359,2	58,8	30,0	
P-08			90,3	3,0	468,2	411,8	23,3	4,4	451,4	94,8	25,4	
P-09			78,7	2,6	453,6	411,5	21,0	0,2	451,0	66,9	35,4	
P-10			79,6	2,6	449,7	404,5	19,8	0,2	472,5	95,3	33,6	
P-11			72,9	2,4	441,7	399,0	19,2	0,8	361,4	57,2	35,5	
P-12	T	6	80,7	2,7	444,3	438,1	21,4	1,6	457,0	59,4	33,8	
P-13			68,2	2,3	445,7	398,3	12,5	0,1	137,1	24,2	34,4	
P-14			69,4	2,5	434,3	400,3	19,8	1,1	196,5	25,3	46,2	
P-15			66,6	2,8	452,6	398,9	16,6	1,1	113,6	23,8	35,5	
P-16			70,8	2,5	453,7	391,8	18,8	0,3	124,9	26,2	36,4	

ANNEXE 3: suite

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	
							μg L ⁻¹					
P-17			70,9	2,4	407,6	532,6	20,0	1,2	164,2	23,0	34,7	
P-18			72,6	2,4	407,7	519,8	20,5	1,1	186,5	17,9	40,1	
P-19			71,1	2,2	412,8	488,0	19,6	2,1	141,4	21,6	37,2	
P-20	D	8	70,6	2,3	418,0	498,2	18,7	1,5	144,3	21,9	37,5	
P-21			70,8	2,3	426,4	466,5	20,9	1,2	184,5	23,2	33,7	
P-22			69,2	2,2	429,8	452,0	19,7	0,7	158,5	21,6	38,9	
P-23			69,6	2,3	436,5	461,9	19,4	1,0	174,5	21,8	38,7	
P-24			67,6	2,3	425,2	424,0	19,9	0,5	151,3	21,4	37,7	
E-01			78,5	2,6	451,5	405,0	19,3	3,8	291,7	36,3	27,0	
E-02			77,7	2,4	435,1	392,9	17,3	4,6	278,1	39,7	26,4	
E-03			79,8	2,6	441,4	431,0	18,9	3,4	274,6	32,3	27,8	
E-04	C	3	79,6	2,7	438,1	437,8	18,9	4,4	255,0	24,3	30,6	
E-05			81,2	2,8	445,6	442,2	19,3	3,7	304,8	49,7	23,0	
E-06			77,3	2,7	446,7	428,2	18,8	3,7	317,6	50,9	24,6	
E-07			78,8	2,6	445,0	440,5	19,4	3,8	292,2	38,7	29,4	
E-08			90,2	2,7	441,4	490,0						

ANNEXE 3: suite

Nom	Site	Réf.	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ μg L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
E-09			70,0	2,4	454,9	363,0	17,8	1,0	226,8	22,2	34,8
E-10			75,1	2,5	454,9	385,6	21,0	0,7	286,5	46,3	40,1
E-11			72,8	2,6	455,1	394,7	18,8	2,3	239,5	21,5	36,2
E-12	T	5	74,7	2,5	454,3	379,1	19,9	0,6	331,6	44,89	29,0
E-13			92,4	2,6	451,0	377,4	27,5	1,1	419,8	78,87	33,3
E-14			80,6	2,5	449,8	367,1	20,5	0,8	323,8	50,1	37,8
E-15			105,9	2,9	432,4	390,6	32,3	0,4	467,7	98,2	37,0
E-16			111,4	3,0	455,2	402,9	31,8	0,9	477,4	91,5	39,0
E-17			84,6	2,6	426,7	521,3	22,1	0,8	319,0	47,0	36,7
E-18			96,0	2,5	415,6	608,3	25,5	0,8	382,3	76,6	42,4
E-19			101,1	2,6	411,9	556,8	26,6	0,7	423,1	88,0	36,2
E-20	D	7	105,3	2,4	410,4	565,0	30,2	1,4	418,0	95,7	43,7
E-21			108,2	2,6	415,4	531,3	30,9	0,2	459,4	96,0	26,0
E-22			115,2	2,7	426,0	553,2		0,9	483,5	103,4	36,3
E-23			105,4	2,7	422,4	551,0	27,0	0,5	430,9	94,3	30,5
E-24			104,3	2,6	413,2	560,2	28,6	0,9	413,6	88,2	31,5

ANNEXE 4: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue recueillis dans les tranchées du site au nord du campement pour la mesure du profil physico-chimique en mai 1990.

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
1	10	13	50	66	2	10	12	54	51
	15	14	115	77		15	15	85	150
	20	18	123	140		20	15	96	71
	40	55	204	228		40	56	138	333
	52	19	57	87		52	18	62	234
	80	31	196	260		80	14	85	45
	95	22	100	317		95	33	115	155
	100	22	119	77		100	33	150	113
	115	41	204	223		115	42	258	218
3	10	18	88	103	4	10	16	85	77
	15	14	65	312		15	20	100	97
	20	18	127	82		20	19	138	160
	40	55	165	202		40	56	142	208
	52	16	42	113		52	17	46	77
	80	13	92	45		80	15	104	77
	95	34	123	124		95	34	119	134
	100	56	246	218		100	15	92	61
	115	31	196	40		115	52	238	249

ANNEXE 4: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
5	10	21	88	97	6	10	52	112	223
	15	13	73	82		15	17	100	202
	20	16	111	72		20	16	112	61
	40	28	200	119		40	27	54	223
	52	28	92	354		52	34	162	260
	80	28	307	61		80	17	92	45
	95	28	123	297		95	20	77	134
	100	33	115	103		100	31	123	108
115	42	154	72	115	20	131	66		
7	10	52	92	108	8	10	18	88	113
	15	18	81	98		15	17	85	103
	20	14	92	56		20	16	119	92
	40	26	146	103		40	63	254	281
	52	28	131	249		52	27	50	134
	80	15	88	108		80	16	69	40
	95	27	108	98		95	34	119	192
	100	31	185	155		100	22	88	82
115	35	215	218	115	50	215	218		

ANNEXE 4: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
9	10	26	81	166	10	10	27	81	155
	15	154	50	187		15	111	62	208
	20	14	88	72		20	17	115	61
	40	81	73	396		40	51	173	344
	52	41	188	448		52	40	215	365
	80	17	69	45		80	15	69	66
	95	25	88	45		95	13	88	77
	100	27	92	228		100	35	196	140
	115	31	108	129		115	46	212	281
11	10	14	54	82	12	10	14	65	108
	15	19	162	82		15	14	119	82
	20	17	123	77		20	18	127	145
	40	28	154	192		40	36	173	176
	52	19	50	166		52	19	42	87
	80	18	127	77		80	14	88	45
	95	11	65	77		95	25	127	140
	100	25	104	82		100	22	81	87
	115	41	200	228		115	41	138	370

ANNEXE 4: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
13	10	46	62	312	14	10	29	65	375
	15	16	65	108		15	12	54	77
	20	18	131	140		20	17	115	98
	40	59	265	354		40	55	212	302
	52	25	138	213		52	27	154	276
	80	15	100	103		80	14	104	51
	95	16	73	145		95	25	131	239
	100	37	154	160		100	37	150	150
115	29	65	370	115	32	215	166		
15	10	12	73	56	16	10	93	112	255
	15	12	46	45		15	29	69	192
	20	16	92	61		20	18	127	160
	40	79	231	344		40	162	69	312
	52	18	108	286		52	29	138	385
	80	17	69	51		80	21	77	51
	95	12	65	56		95	13	62	56
	100	34	127	92		100	34	112	119
115	45	196	260	115	60	204	228		

ANNEXE 4: suite

Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Tranchée	Profondeur cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
17	10	11	50	40	18	10	28	235	92
	15	13	92	82		15	14	96	87
	20	16	115	134		20	15	115	82
	40	74	104	365		40	81	115	412
	52	59	265	265		52	71	269	328
	80	14	81	40		80	18	88	40
	95	15	81	176		95	23	108	61
	100	26	112	72		100	49	208	176
115	46	231	181	115	45	62	281		
19	10	142	46	134	20	10	96	65	113
	15	91	65	234		15	45	65	129
	20	15	77	134		20	19	115	113
	40	61	215	862		40	108	115	412
	52	31	173	124		52	42	158	417
	80	20	92	72		80	34	131	82
	95	13	62	77		95	13	65	77
	100	35	112	119		100	35	127	124
115	46	192	270	115	41	208	171		

ANNEXE 5: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour la mesure des flux d'ions à l'interface
neige-atmosphère en mai 1990.

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
BL-01	72	69	124	BL-11	119	77	134
BL-02	70	69	124	BL-12	95	73	134
BL-03	75	69	124	BL-13	110	77	145
BL-04	91	73	140	BL-14	112	77	140
BL-05	93	73	140	BL-15	97	73	150
BL-06	103	73	140	BL-16	124	73	150
BL-07	201	77	155	BL-17	117	77	150
BL-08	103	73	145	BL-18	102	73	140
BL-09	83	73	140	BL-19	108	73	145
BL-10	82	73	129				
NY-01	131	77	166	PR-01	94	77	150
NY-02	468	81	176	PR-02	103	77	150
NY-03	115	77	166	PR-03	97	81	160
NY-04	160	77	166	PR-04	104	81	155
NY-05	693	73	160	PR-05	112	81	160
NY-06	177	77	171	PR-06	117	81	155
NY-07	897	81	186	PR-07	112	100	181
NY-08	586	77	171	PR-08	106	81	155

ANNEXE 5: suite

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ µg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
ET-03	137	81	160	ETH-01	90	73	150
ET-04	183	81	160	ETH-02	222	81	166
ET-05	122	81	171	ETH-03	178	81	155
ET-06	163	81	171	ETH-04	118	77	150
				ETH-05	98	77	150
				ETH-06	137	77	155
P-01	85	69	140	E-01	82	73	150
P-02	90	73	140	E-02	83	73	145
P-03	139	77	171	E-03	83	73	145
P-04	112	73	140	E-04	77	73	150
P-05	757	73	150	E-05	78	73	145
P-06	102	77	150	E-06	77	73	140
P-07	102	77	150	E-07	76	73	140
P-08	106	73	145	E-08	82	73	140
P-09	100	77	150	E-09	77	73	134
P-10	158	81	150	E-10	79	73	140
P-11	119	81	160	E-11	81	77	150
P-12	103	77	155	E-12	81	69	140

ANNEXE 5: suite

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ μg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ μg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
P-13	119	92	171	E-13	102	92	171
P-14	134	92	171	E-14	96	92	176
P-15		115	218	E-15	121	100	187
P-16	122	96	171	E-16	100	92	176
P-17	123	96	171	E-17	103	96	181
P-18	100	96	171	E-18	104	92	166
P-19	167	100	181	E-19	102	96	171
P-20	116	100	187	E-20	103	92	166
P-21	127	96	192	E-21	113	96	176
P-22		169		E-22	107	96	171
P-23	149	108	197	E-23	109	100	176
P-24	102	88	166				

ANNEXE 6: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 29 janvier au 9 février 1993.

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
1	6,013	6,212	1,889	N01	5,789	5,922	1,861
2	5,896	6,224	1,799	N02	5,680	5,842	1,859
3	6,039	6,209	1,801	N03	6,294	6,068	1,885
4	6,088	6,397	1,821	N04		5,807	1,843
5	5,712	6,859	1,824	N05	5,770	5,950	1,904
6	6,051	6,336	1,824				
7	6,034	6,227	1,957	N06	7,697	6,576	2,043
8	5,836	6,346	1,925	N07	5,642	6,085	1,930
9	5,737	6,237	1,915	N08	5,572	5,967	1,963
10	5,872	6,226	1,923	N09	5,879	6,234	2,003
11	5,651	6,121	2,012	N10	5,684	6,059	1,957
12	5,824	6,217	1,928				
13	5,824	6,188	1,953	N11	6,770	6,055	1,994
14	6,729	6,338	1,934	N12		5,718	1,942
15	5,841	6,209	1,947	N13	7,097	6,464	1,990
16	6,081	6,025	1,968	N14	6,734	6,326	1,992
17	5,525	5,835	1,861	N15	5,936	6,001	1,929
18	5,597	5,934	1,953				

ANNEXE 6: suite

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
19	6,509	6,229	1,964	N16	5,190	6,218	1,819
20	5,893	6,026	1,995	N17	5,331	6,381	1,827
21	6,452	6,255	1,923	N18	5,355	6,072	1,826
22	5,419	5,951	1,903	N19	5,418	6,168	1,868
23	5,591	6,022	1,938	N20	5,295	6,043	1,843
24	6,305	6,134	1,943				
25	6,382	6,276	1,947	N21	5,573	6,326	1,965
26	5,758	6,322	1,945	N22	5,270	6,273	1,862
27	6,368	6,222	1,964	N23	6,479	6,502	1,896
28	6,218	6,142	1,965	N24	6,430	6,401	1,883
29	5,419	6,030	1,915	N25	5,675	6,343	1,870
30	6,001	5,993	1,946				
31	5,325	5,980	1,926				
32	5,379	6,022	1,939				
33	5,295	5,826	1,944				
34	5,204	5,935	1,892				

ANNEXE 7: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour l'expérience sur le simulateur de couvert nival du 12 mars au 29 mars 1993.

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
1	3,672	1,502	1,119	21	3,440	1,524	1,167
2	3,762	1,507	1,158	22	3,331	1,513	1,132
3	3,717	1,506	1,161	23	3,356	1,525	1,176
4	3,630	1,497	1,142	24	3,413	1,532	1,182
5	3,598	1,497	1,213	25	3,264	1,512	1,150
6	3,628	1,505	1,128	26	3,360	1,515	1,182
7	3,733	1,508	1,168	27	3,353	1,510	1,158
8	3,501	1,512	1,146	28	3,218	1,496	1,162
9	3,677	1,509	1,134	29	3,313	1,527	1,168
10	3,710	1,525	1,143	30	3,282	1,516	1,185
11	3,611	1,535	1,172	31	3,062	1,488	1,196
12	3,582	1,528	1,169	32	2,781	1,451	1,190
13	3,610	1,529	1,171	33	1,206	1,434	1,206
14	3,606	1,522	1,142	34	2,547	1,454	1,218
15	3,611	1,527	1,161	35	3,178	1,481	1,193
16	3,625	1,526	1,151	36	3,301	1,496	1,188
17	3,519	1,514	1,158	37	3,278	1,486	1,199
18	3,476	1,514	1,158	38	3,450	1,503	1,208
19	3,556	1,524	1,166	39	3,359	1,499	1,192
20	3,514	1,534	1,149	40	3,398	1,408	1,191

ANNEXE 7: suite

Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻	Nom	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹	SO ₄ ²⁻
41	3,372	1,510	1,191	46	3,458	1,466	1,198
42	3,362	1,450	1,195	47	3,633	1,558	1,233
43	3,706	1,471	1,239	48	3,622	1,547	1,239
44	3,491	1,489	1,247	49	4,073	1,913	1,334
45	3,664	1,603	1,275	50	3,853	1,778	1,290
N01	3,286	1,500	1,196	N16	3,388	1,514	1,146
N02	3,377	1,496	1,208	N17	3,393	1,421	1,143
N03	3,636	1,490	1,194	N18	3,464	1,530	1,175
N04	3,326	1,494	1,187	N19	3,549	1,525	1,166
N05	3,619	1,490	1,176	N20	3,501	1,524	1,162
N06	3,382	1,497	1,172	N21	3,640	1,467	1,172
N07	3,581	1,481	1,148	N22	3,583	1,459	1,157
N08	3,544	1,491	1,183	N23	3,588	1,457	1,155
N09	2,986	1,471	1,194	N24	3,502	1,532	1,147
N10	3,321	1,464	1,172	N25	3,644	1,452	1,141
N11	3,487	1,527	1,206	N26	3,855	1,465	1,152
N12	3,473	1,533	1,216	N27	3,723	1,488	1,167
N13	3,354	1,525	1,188	N28	3,737	1,456	1,230
N14	3,580	1,540	1,196	N29	3,864	1,473	1,260
N15	3,463	1,524	1,191	N30	3,741	1,483	1,171

ANNEXE 8: Analyses chimiques des échantillons de neige fondue pour la mesure des flux d'ions au Lac
Laflamme 1988-1989.

Date	Neige	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	A/C
μeq L ⁻¹											
22-12-88	N1	6,346	41,222	21,841	36,307	5,655	0,997	4,341	1,070	17,130	1,060
	N2	10,492	39,513	21,466	33,884	3,262	0,767	4,291	0,905	11,975	1,297
	N3	7,559	40,206	22,299	42,657	6,046	1,023	5,389	1,070	9,036	1,074
	N4	5,838	40,545	22,548	48,977	4,480	0,691	4,441	0,905	9,314	1,002
	N5	6,656	41,609	22,361	38,904	4,045	0,614	4,092	1,070	10,256	1,197
09-01-89	Nytex 1	7,869	33,497	20,050	34,673	5,437	1,228	5,289	0,987	9,702	1,072
	Nytex 2	8,997	35,174	20,383	30,902	4,828	1,279	4,491	1,070	13,416	1,153
	Nytex 3	8,264	33,416	21,341	27,542	5,002	1,253	6,936	1,070	12,252	1,166
	Nytex 4	8,518	33,981	21,424	35,481	5,394	2,148	4,691	1,481	11,531	1,053

ANNEXE 8: suite

Date	Neige	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	Na ⁺ μeq L ⁻¹	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	A/C
09-01-89	N1	3,046	29,949	23,194	43,651	1,870	0,281	1,397	0,329	1,719	1,141
	N2	5,161	30,158	24,089	44,668	3,697	1,458	2,246	1,728	2,716	1,051
	N3	2,453	29,078	22,653	47,863	2,262	0,409	1,447	0,329	1,996	0,998
	N4	2,623	29,336	21,882	44,668	2,871	0,409	2,196	0,329	2,107	1,024
	N5	3,920	30,465	22,840	43,651	2,479	0,793	2,545	0,494	2,273	1,096
18-01-89	Nytex 1	6,205	24,078	22,340	42,657	5,133	1,765	2,146	0,411	2,716	0,960
	Nytex 2	16,387	24,917	22,819	39,810	15,703	4,987	3,244	0,494	2,994	0,954
	Nytex 3	5,105	24,965	22,132	33,884	4,480	1,125	2,246	0,411	2,384	1,172

ANNEXE 8: suite

Date	Neige	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	A/C
						μeq L ⁻¹					
18-01-89	N1	4,400	38,190	9,640	36,307	3,610	0,614	2,545	0,411	2,883	1,126
	N2	4,174	37,609	11,534	38,018	3,045	0,563	2,495	0,411	2,606	1,131
	N3	4,174	38,367	10,535	33,884	3,045	0,563	2,545	0,411	2,994	1,222
	N4	4,174	37,287	10,139	36,307	2,784	0,307	2,645	0,411	2,938	1,137
	N5	4,710	39,190	9,785	33,884	3,436	0,767	2,395	0,494	3,049	1,219
01-02-89	Nytex 1	12,805	27,143	10,889	23,988	8,787	2,327	3,743	0,905	9,480	1,033
	Nytex 2	14,892	26,320	11,430	36,673	10,048	3,120	3,493	0,823	5,821	0,908
	Nytex 3	16,472	24,933	11,888	23,442	12,092	3,376	3,443	0,823	6,653	1,070
	Nytex 4	17,403	29,110	11,284	24,547	12,614	4,681	4,142	0,823	5,599	1,103
	Nytex 5	13,539	27,062	12,117	28,183	9,004	2,200	3,044	0,741	6,375	1,064
	Nytex 6	15,593	27,981	10,826	19,952	12,875	3,248	3,992	0,905	7,540	1,130
	Nytex 7	23,467	22,207	11,451	16,595	11,788	4,169	3,493	0,905	19,902	1,005
	Nytex 8	29,673	25,965	12,159	14,125	18,356	5,831	4,591	1,234	24,226	0,992