INRS-EAU

DYNAMIQUE DES COMPOSÉS AZOTÉS ET ACTIVITÉ MICROBIOLOGIQUE DE LA NEIGE AU COURS DE LA FONTE PRINTANIERE

Mémoire de recherche presentée comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en sciences de l'eau

Louis Germain

MAI 1991

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire de recherche n'aurait été possible sans le support du personnel du laboratoire de l'Inrs-Eau et plus particulièrement de monsieur Bernard Veilleux et de madame Michelle Bordeleau. Je leur suis fort reconnaissant pour toute l'aide apportée.

Je tiens également à remercier mon directeur de recherche, monsieur Gerald H. Jones, qui m'a fait bénéficier de son expertise scientifique et qui m'a fourni tout le support matériel indispensable à la réalisation d'une telle étude.

Finalement, je remercie le docteur Ronald W. Hoham pour avoir collaboré et s'être impliqué personnellement dans cette recherche. Sa participation a permis de renforcer nos hypothèses de travail et conséquemment d'augmenter la qualité des résultats obtenus.

i

RESUMÉ

L'objet de cette étude est de mieux comprendre le comportement des formes d'azote inorganique à l'intérieur de la neige et dans l'écosystème ainsi que l'influence de l'activité biologique nivéale sur celles-ci au moment de la fonte printanière.

Dans la première partie de cette étude, trois séries de fontes simulées ont été réalisées en laboratoire. Les deux premières séries de fonte ont été effectuées avec une neige propre (i.e. dépourvue ou presque de matière organique) provenant d'un milieu ouvert. La troisième série de fontes a été réalisée avec une neige provenant également d'un milieu ouvert mais à laquelle une quantité connue de matière organique provenant de la litière coniférienne a été préalablement ajoutée. Pour cette série, un traceur isotopique stable ($K^{15}NO_3$) a été introduit à la neige dans le but de suivre le cheminement de l'azote dans la colonne de neige.

Les résultats montrent que dans le cas des deux premières séries, les concentrations des formes NO_3 et NH_4 n'ont pas subi de changement important au cours des fontes simulées. Par contre, les concentrations des cations K, Ca et Mg ont augmentées. Dans le cas des fontes de la troisième série, des pertes de Cl, NO_3 et NH_4 ont été enregistrées alors que des gains importants ont été notés pour certains cations tel le potassium.

Il ressort que la présence de matière organique à l'intérieur de la neige semble influencer les concentrations des espèces ioniques qui s'y trouvent aussi bien à la hausse qu'à la baisse. Les formes d'azote inorganique telles NO_3 et NH₄ constituent de bonnes sources nutritives pour les micro-organismes et c'est probablement ce qui explique leur diminution au moment de la fonte. D'autre part, certains cations semblent originer directement du lessivage de la matière organique au moment ou celle-ci entre en contact avec l'eau de fonte. Cela expliquerait l'augmentation de façon marquée des espèces ioniques Na, Mg, K et Ca.

Dans la seconde partie de cette étude, des échantillons de neige avec et sans algues nivéales ont été prélevés sur le terrain au printemps et à l'été 1988 dans le but d'en effectuer l'analyse chimique.

Nous avons observé la présence d'algues nivéales chlorophytes du genre <u>Chloromonas</u>. C'est le premier signalement de cette algue au Québec.

Les analyses chimiques que nous avons menées ont fait ressortir que ces algues utilisent l'azote inorganique de la neige comme élément nutritif au cours de la fonte printanière.

Les mécanismes habituels d'assimilation biologique de l'azote par les microorganismes connus dans les systèmes aquatiques et les sols forestiers semblent se produire de façon similaire dans la neige, et ce, de façon plus évidente au moment de la fonte. Les modèles hydrogéochimiques de fonte doivent donc prendre en considération cet aspect.

TABLE DES MATIERES

REM	ERCIE	MENTSi
RÉS	UMÉ	
TAB	LE DE	S MATIERESiii
LIS	TE DE	S FIGURESvi
LIS	TE DE	S TABLEAUXvii
1.	INTRO	DUCTION
	1.1	ORIGINE DES PRECIPITATIONS ACIDES1
	1.2	LES PRECIPITATIONS ACIDES ET LA PHYSICO-CHIMIE DE LA NEIGE2
		Impacts des précipitations acides2
		Mécanismes de dépôts des polluants acides
		Composition ionique et hétérogénéité du couvert neigeux4
	1.3	LA FONTE PRINTANIERE ET L'ACTIVITE BIOLOGIQUE NIVEALE9
		Les composés azotés12
		L'activité biologique nivéale15
	1.4	OBJET DE L'ETUDE16
2.	MATÉ	RIEL ET MÉTHODE19
	2.1	FONTES SIMULÉES EN LABORATOIRE19
		Préparation de l'équipement et traitement des échantillons

	2.2	TECHNIQUES ANALYTIQUES23	
		Prélèvement et filtration des échantillons23Mesure de conductivité et de pH23Dosage des anions majeurs25Dosage des cations majeurs et de l'ammonium25Dosage du carbone organique dissous26Ajout de matière organique26Emploi du traceur isotopique stable K15NO327Mesures d'ATP28	
	2.3	ANALYSE STATISTIQUE	
	2.4	LE MODELE SNOQUAL	
e e	2.5	CAMPAGNES D'ECHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN	
3.	RÉSU	LTATS ET DISCUSSION	
	3.1	LES FONTES SIMULEES EN LABORATOIRE	
		3.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de neige avant la fonte	
		Concentrations ioniques de la neige des séries A, B et C	
		3.1.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fontes46	
		Charges et balances ioniques des séries A, B et C46 Bilans de fonte des séries A, B et C51	
		3.1.3 Enlèvement des ions NH_4 et NO_3 au cours de la fonte57	1
2		Applications du modèle SNOQUAL66	
		3.1.4 Absorption du traceur isotopique ¹⁵ N sur la matière organique70	

iv

	3.2	CAMPAG	NES D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN
		3.2.1	Les algues nivéales76
		3.2.2	Les mécanismes biologiques de l'assimilation de l'azote
		3.2.3	Le rôle de la matière organique dans la neige87
A	CONCL	HSTON	90
т.	CONCL	.05100	
5.	RÉFÉR	RENCES	

LISTE DES FIGURES

FIGURE	1	Facteurs de concentration moyens pour H^+ , NO_3 , SO_4 d'eau de fonte provenant de 3 échantillons de neige10
FIGURE	2	Schéma des fontes simulées en laboratoire20
FIGURE	3	Simulateur de fonte21
FIGURE	4	Localisation du site d'échantillonnage (Forêt Montmorency)32
FIGURE	5	Localisation des sites d'échantillonnage dans les Alpes Françaises
FIGURE	6	Variation des concentrations d'ATP43
FIGURE	7	Enlèvement des nitrates (fontes série A)58
FIGURE	8	Enlèvement de l'ammonium (fontes série A)59
FIGURE	9	Enlèvement des nitrates (fontes série B)60
FIGURE	10	Enlèvement de l'ammonium (fontes série B)61
FIGURE	11	Enlèvement des nitrates (fontes série C)62
FIGURE	12	Enlèvement de l'ammonium (fontes série C)63
FIGURE	13	Application du modèle SNOQUALR aux fontes de la série A67
FIGURE	14	Application du modèle SNOQUALR aux fontes de la série B68
FIGURE	15	Application du modèle SNOQUALR aux fontes de la série C69

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	1	Concentrations atmosphériques hebdomadaires5
TABLEAU	2	Concentrations des espèces inorganiques incidentes (Lac Laflamme)
TABLEAU	3	Composition chimique de la neige de différentes localités
TABLEAU	4	Méthodologie d'analyse de la neige et des eaux de fonte24
TABLEAU	5	Composition chimique et balances ioniques de la neige avant la fonte (Séries A et B)
TABLEAU	6	Composition chimique et balances ioniques de la neige avant la fonte (Série C)40
TABLEAU	7	Analyse statistique de la neige avant la fonte (Série A et B)45
TABLEAU	8	Balances ioniques sur bilans de fontes (Séries A et B)47
TABLEAU	9	Balances ioniques sur bilans de fontes (Série C)48
TABLEAU	10	Gains ou pertes ioniques au cours de la fonte (Série A)52
TABLEAU	11	Gains ou pertes ioniques au cours de la fonte (Série B)53
TABLEAU	12	Gains ou pertes ioniques au cours de la fonte (Série C)54
TABLEAU	13	Séquences d'élution préférentielle observées sur les trois premiers jours de fonte65
TABLEAU	14	Excès isotopique des échantillons de matière organique70
TABLEAU	15	Pourcentage de ¹⁵ N absorbé sur la matière organique après la fonte
TABLEAU	16	Analyse comparée des caractéristiques physico-chimiques de neige avec et sans algues (Lac Laflamme)
TABLEAU	17	Analyse comparée des caractéristiques physico-chimiques de neige avec et sans algues (Whiteface Mountain, New-York)

1. INTRODUCTION

1.1 ORIGINE DES PRECIPITATIONS ACIDES

L'industrialisation et l'urbanisation rapide qu'ont connu les pays occidentaux depuis la seconde moitié du XVIII^e siècle ont sensiblement modifié l'état de la biosphère. Parmi les nombreux facteurs liés à la dégradation de l'environnement, l'est de l'Amérique du Nord est particulièrement touché par les précipitations acides. L'activité industrielle et l'utilisation accrue de l'automobile ont augmenté de façon significative les concentrations d'oxyde de soufre (SO_x) et d'azote (NO_x) dans l'atmosphère. En Europe comme en Nord, les sources anthropiques de soufre et d'azote Amérique du atmosphériques sont respectivement 20 et 10 fois plus élevées que les sources naturelles (Cowling 1988). Likens (1976) a signalé que, dans l'état de New York, les concentrations atmosphériques de nitrate ont quadruplées sur une période de dix ans. La localisation des industries sidérurgiques et des centrales thermiques au charbon dans le mid-west américain et le sud-est du Canada combinée à des facteurs climatiques tel le mouvement général des masses d'air font du Québec unr région particulièrement propice à ce type de précipitations. La province reçoit au total 22 kg/ha/an de NO₃ et 29 kg/ha/an de SO₄ sous formes de dépôts humides (Grimard 1985). Une bonne part de ces précipitations sont sous forme de neige.

En certains endroits au Québec, la hauteur totale des précipitations nivales peut atteindre 5m (Proulx et al. 1987). Partant, on comprendra

l'importance de la période de la fonte printanière au moment où les eaux de fonte acides sont subitement larguées dans le milieu provoquant ainsi l'acidification des écosystèmes.

1.2. LES PRECIPITATIONS ACIDES ET LA PHYSICO-CHIMIE DE LA NEIGE

Impact des précipitations acides

L'impact des précipitations acides sur le territoire québécois est amplifié par le fait que 92% de sa superficie totale est occupée par le socle granitique du bouclier canadien ayant un faible pouvoir tampon. Mais c'est au printemps au cours de la fonte des neiges que leurs effets sont le plus marqués. Les polluants acides (H, NO_3 , SO_4) accumulés dans la neige au cours de l'hiver sont alors subitement relâchés dans le milieu (Johannessen et Henriksen 1978, Jones 1984), ce qui engendre une acidification épisodique et même chronique des eaux de surface (Johannessen et Henriksen 1978, Rascher et al. 1987). Les organismes de tous les niveaux trophiques sont affectés par une réduction de productivité, une rupture des cycles naturels et une simplification de la chaîne alimentaire (Dvorak et Lewis 1978). La modification des équilibres chimiques des écosystèmes aquatiques peut conduire à un appauvrissement de la diversité des espèces de poissons (Likens 1976). Cela peut même aller jusqu'à la mortalité massive de poissons (Leivestad et Muniz 1976). De facon plus globale, en milieu terrestre, le lessivage accéléré des cations de base altère les cycles nutritifs des sols (Cronan et al. 1978, Foster et al. 1983, Stroo et Alexander 1986). La végétation terrestre est

donc également affectée par les processus d'acidification des écosystèmes. Bien qu'étant moins connus, on soupçonne les précipitations acides d'avoir des effets pathogènes sur la santé humaine (Masnières 1982).

Mécanismes de déposition des polluants acides

Toujours au Québec, les précipitations de neige constituent 30 à 50% des précipitations moyennes annuelles. La neige recouvre le sol de 5 à 8 mois par année et son contenu en polluants acides provient de dépôts humides (neige et pluie) et de dépôts secs sous formes d'aérosols, de particules et de gaz. Les polluants tels SO₂ et NO₃ peuvent se déposer tels quels et s'oxyder à la surface de la neige ou encore s'oxyder dans l'atmosphère et se déposer sous forme sèche (HNO3 gazeux, H2SO4 aérosol) ou humide (HNO3 et 2HSO₄). Les dépôts secs sont le résultats de mécanismes liés au captage superficiel des impuretés pendant les périodes sans précipitations. Les dépôts humides réfèrent aux impuretés qui se sont déposées avec les précipitations sous formes de pluie ou de neige. Ils résultent de la nucléation des flocons dans l'atmosphère par des espèces solubles ou insolubles, de l'incorporation des polluants pendant le grossissement des flocons au sein du nuage et du lessivage de l'atmosphère au cours de la chute d'un flocon (Delmas 1989). L'apport d'aérosols acides tels SO₄ et NO₃ transportés sur de longues distances constituent la source majeure d'acidité (Jones et Sochanska 1985, Cadle et al. 1984).

De façon générale, les dépôts humides constituent l'essentiel des apports totaux en milieu rural et forestier. En milieu urbain toutefois, les dépôts

secs peuvent représenter jusqu'à 80% des apports totaux (Cadle et Dash 1987). Sirois et Vet (1988) ont montré, lors de travaux effectués sur le bassin versant de Turkey Lakes dans le nord ontarien, que les dépôts secs de ces deux anions (SO₄ et NO₃) représentaient respectivement 15 et 25% des dépôts totaux. Semkin et Jeffries (1988) ont estimé cette proportion à 12 et 5% sur le même site.

L'étude de Cadle et al. (1987) montre que sur une base d'équivalence ionique, le NO_2 est l'espèce azotée dominante comptant pour 51% de l'azote atmosphérique inorganique total mesuré (voir tableau 1). Les formes azotées telles NH₄, NO₃, HNO₃, NH₃ représentent 31, 9.8, 6.8, 1.5% de l'azote total mesuré. Dans le même ordre d'idée, la forme SO₂ compte pour 80,3% du soufre total (SO₂ + SO₄).

À titre de comparaison, le tableau II donne les valeurs moyennes des concentrations des espèces inorganiques des précipitations incidentes dans le massif des Laurentides au nord de Québec. De façon générale, on observe peu de différences entre les précipitations en milieu ouvert et celles en milieu forestier sauf pour les ions potassium et ammonium.

Composition ionique et hétérogénéité du couvert de neige

Le tableau III présente la composition ionique du couvert de neige pour des échantillons provenant de plusieurs endroits. On remarque, malgré la diversité des sites d'échantillonnage, que toutes les valeurs de pH sont acides. Sur une base d'équivalence ionique, la contribution relative des sulfates et

ION	CONCENTRATIONS			
	(ug/m3)			
S02	7.55			
S04	2.70			
N02	3.76			
HN03	.69			
N03	1.19			
NH4	.78			
NH3	.034			
C1	.035			
Ca	.15			
Mg	.037			
Na	.10			
К	.082			

TABLEAU 1: concentrations atmosphériques hebdomadaires (Cadle et al. 1985)

ION	MILIEU OUVERT	MILIEU FERME
S04	30,15	29,37
NO3	22,30	18,26
NH4	8,81	4,65
C1	8,06	5,22
Ca	4,17	5,20
Mg	,47	1,47
P04		
Н	42,50	48,24
Na	5,71	5,16
К	,10	3,96

paramètre	Α	В	С	D	E	F	G	н	1	J	К
рН	4,45	4,24		4,46	4,85	4,95	4,44	4,59	5,50	4,69	4,18
н	,035	,057		,034	,014	,011	,036	,025	,003	,020	,065
Cl	2,200	,280	,389	,410			2,880	,159	,220	,149	2,120
P04	,004			,130				,005			
NO3	2,580	2,300	1,670	1,490	1,240	1,370	,580	1,350	,110	,837	1,050
SO4	1,550	1,350	2,690	1,150	,610	,920	,890	,590	,140	1,370	1
Na	1,160		,230	,061			1,240	,108	,070	,269	,770
к	,510		,040	, 197				,023	,019	,089	
Са	,550	,320	,140	,078	,299	,480		,088	,042	,124	,050
Mg	,110		,040	,018	,053	,096	,145	,019	,009	,041	,090
AL		,069						,086		,005	
Cu	,010										,002
Pb	,056										,002
Cd	,004										
Mn	,017										,007
NH4	,643	,110	,180	,110	,750	,094	,146	,100	,100		
Zn	,105										
Fe											,085
1.0											

TABLEAU 3: Composition chimique de la neige de différentes localités (mg/l).

SOURCES

- A: Johannessen et Henriksen (1978) (Norvège)
- B: Jeffries et Snyder (1981) (Muskoka-Haliburton, Ontario)
- C: Jeffries et Semkin (1983) (Turkey Lakes, Ontario)
- D: Jones (1984) (Lac Laflamme, Québec)
- E: Cadle et al. (1984) (Michigan, USA) (Site ouvert)
- F: Cadle et al. (1984) (Michigan, USA) (Site couvert)
- G: Tranter et al. (1986) (Cairngorn Mountains, Écosse)
- H: Semkin et Jeffries (1986) (Turkey Lakes, Ontario)
- I: Laird et al. (1986) (Cascade, Sierra Nevada, USA)
- J: Stottlemeyer (1987) (Michigan, USA)
- K: Abrahams et al. (1988) (Cairngorn Mountains, Écosse)

des nitrates cumulées représente souvent plus de 40% de la composition ionique de la neige excepté quelques cas où la proximité de la mer induit des concentrations élevées de Cl.

La composition chimique de la neige n'est toutefois pas uniforme partout. Tant sur une petite que sur une grande échelle de grandes variabilités spatiales des caractéristiques physiques sont observées telles que la profondeur, l'altitude, la densité et la température de l'air (Adams 1981). Cette hétérogénéité est attribuable à des processus d'ordre climatique (direction des vents, type de précipitations), de changements mécaniques durant l'accumulation du couvert neigeux et au métamorphisme interne de ce dernier (Tranter et al. 1987). On comprendra donc que la variabilité des paramètres physiques du couvert neigeux sera susceptible d'engendrer aussi une variabilité des paramètres chimiques d'autant plus si on tient compte de l'activité biologique nivéale pouvant exister à l'intérieur du couvert de neige (Hornbeck et Likens 1974). Les ions du manteau neigeux pourront éventuellement sous l'action des facteurs mentionnés plus tôt être redistribués horizontalement et verticalement (Cadle et al. 1984, Tranter et al. 1987).

Outre l'hétérogénéité physico-chimique de la neige, plusieurs auteurs ont observé que les concentrations ioniques demeurent stables au cours de l'hiver, ce qui signifie qu'en l'absence de fonte il y a conservation intégrale des ions (Cadle et al. 1984, Semkin et Jeffries 1989). Toutefois, Jeffries et Snyder (1981) ont montré que des pertes ioniques à l'intérieur de la neige pouvaient se produire sans fusion. Jones (1984) a d'ailleurs constaté que même durant les périodes froides hivernales il y avait une exportation

continue des ions. Ces mouvements seraient, de l'avis de l'auteur, engendrés par le métamorphisme de la microstructure nivéale. Les travaux de Sottlemeyer (1987) ont révélé que seul l'ion H⁺ peut être libéré du couvert de neige avant la première fonte, probablement à l'interface neige-sol où les radiations du sol peuvent entraîner une fonte superficielle.

1.3 LA FONTE PRINTANIÈRE ET L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE NIVÉALE

C'est toutefois au cours de la période de la fonte printanière que les transnsformations du couvert de neige sont les plus importantes. Le rayonnement solaire et le flux de chaleur sensible sont deux formes d'apport énergétique qui favorisent la fusion progressive de la neige au sol. Le relâchement presque instantané des polluants acides accumulés dans la neige durant l'hiver provoque une augmentation de l'acidité des eaux de surface et conséquemment les impacts sur le milieu dont nous avons parlé plus tôt. Ce phénomène est connu sous le terme de "choc printanier". Plusieurs travaux ont montré (Johannessen et Henriksen 1978, Colbeck 1981, Skarveit et Gjessing 1979) que 50 à 80% des polluants acides sont relâchés dans le premier 30% du volume d'eau provenant de la fonte (voir fig. 1). Les concentrations ioniques moyennes de cette eau peuvent alors être de 10 fois supérieures à celles mesurées dans la neige avant la fonte (Semkin et Jeffries 1986). La concentration des ions majeurs en pareil cas peut être même de 20 fois supérieures à celle mesurée dans la neige (Suzuki 1982). On désigne ce phénomène sous le vocable "processus de fractionnement" et il est défini comme étant le lessivage des impuretés solubles de la neige dans les premières



FIGURE 1: Facteurs de concentration moyens pour H⁺ NO₃ et SO₄ d'eau de fonte provenant de trois échantillons de neige. (tiré de: Johannessen, M., Henriksen, A. (1978) fractions d'eau de fonte (Davies et al. 1982). Ainsi un facteur de concentration peut être déterminé selon l'expression:

$$F = C_i / C_m$$

où C_i est la concentration mesurée dans la ième fraction de la fonte et C_m la concentration de la neige avant la fonte. Brimblecombe et al.(1987) soulignent que ce facteur de concentration varie à mesure que l'eau de fonte devient plus diluée. Il serait donc plus approprié de considérer le facteur de fractionnement suivant:

$$F = C_{im} / C_{is}$$

où C_{im} est la concentration de l'ion i dans le premier 10% du volume d'eau de fonte et C_{is} la concentration de l'ion i dans le 90% de la neige restante.

Le taux auquel les ions seront lessivés du couvert de neige dépendra des conditions atmosphériques (température, averses de pluie), et du degré de métamorphisme du couvert (Colbeck 1981). Le même auteur indique que deux phénomènes seraient en cause au moment de la fonte: 1) la diffusion moléculaire engendrée par les différentes concentrations des ions et 2) la dispersion mécanique causée par les variations de vélocité de l'eau dans la neige. Ainsi, les cycles gel-dégel au printemps entraînent les impuretés de la surface du couvert de neige vers les couches sous-jacentes ou elles sont finalement relâchées dans l'environnement.

De l'avis de plusieurs, le phénomène de "fractionnation" décrit plus haut, serait un processus différentiel provoquant le relâchement de certains ions préférentiellement à d'autres lors de la fonte printanière (Davies et al. 1982). Brimblecombe et al.(1986) ont mis en évidence la séquence d'élution anionique suivante:

$$SO_4 - NO_3 - C1$$

Elle signifie que les sulfates sont libérés du stock de neige avant les nitrates et ceux-ci avant les chlorures. La position du nitrate est variable mais le chlorure apparaît toujours à la fin de la séquence. Dans la même veine, des expériences sur le terrain (Tsiouris 1986) ont permis de développer la séquence d'élution suivante:

 $SO_4 - NO_3 - H - Na - C1$

L'évidence de ce phénomène n'a, par ailleurs, pas toujours été vérifiée. Les travaux de Cadle et al.(1986) et de Rascher et al.(1987) observent que la séquence d'élution préférentielle ne se manifeste pas systématiquement au cours de la fonte.

Les composés azotés

Les composés azotés feront l'objet d'une attention toute particulière au cours de cette étude. Leur comportement à l'intérieur de la neige au moment de la fonte printanière semble contrôlé, ou à tout le moins, influencé par des facteurs biologiques. Nous discutons donc brièvement ici des principales sources d'azote dans la neige (NO_3 et NH_4) ainsi que des mécanismes biologiques susceptibles d'engendrer des variations de la concentration de ces deux ions.

Les sources de NO_3 sont principalement d'origine atmosphérique sous formes de dépôts secs et humides. Le HNO_3 gazeux contribue pour 90% du total des dépôts de NO_3 (Sirois et Vet 1988, Cadle et al. 1985). Delmas et Jones (1987) ont cependant fait l'hypothèse que les dépôts secs de NO_2 peuvent, dans certaines conditions, être oxydés en NO_3 par l'ozone ou le radical OH. Cette même étude montre que des quantités substantielles de NO_3 peuvent être produites à partir de NO_2 dans des conditions similaires à celles rencontrées dans la neige.

Les sources de NH₄ sont, quant à elles, principalement d'origine atmosphérique comme nous l'avons vu précédemment. Mais la matière organique constitue néanmoins une source importante de NH₄. Elle joue aussi un rôle dans la dynamique chimique du couvert neigeux, particulièrement en milieu forestier où la voute forestière constitue un apport continuel de débris végétaux de toutes sortes. La matière organique peut augmenter la charge de certains cations (Jones et Sochanska 1985). En contact avec l'eau liquide du couvert de neige, elle peut rendre disponible certains éléments nutritifs nécessaires à la croissance des organismes nivéaux.

Dans ce cas, l'activité biologique hétérotrophique doit être prise en compte (Jones et Sochanska 1985).

Durant l'hiver, période où on pourrait présumer de la stabilité du couvert de neige, Jones (1984) a observé des variations de concentrations notamment pour NO₃, NH₄, SO₄ ce qui l'a amené à attribuer celles-ci à des processus microbiologiques liés à la matière orgánique présente dans la neige. D'ailleurs Jeffries et Snyder (1981) ont observé une mobilisation des nitrates durant la fonte quelque part entre la neige et le point d'échantillonnage dans un cours d'eau. Cadle et al. (1983) indique que le nitrate relâché durant la fonte ne se retrouve pas entièrement dans les eaux de surface. Ces auteurs ne précisent toutefois pas dans quels compartiments ou biotopes de l'écosystème le nitrate est retenu. McLean (1981) observait le même phénomène et attribuait la mobilisation de l'azote à des facteurs biologiques. Ces considérations ont des implications importantes considérant que si les polluants acides tels que HNO₃ sont transformés au moment de la fonte printanière, il est probable que l'effet de cet acide sur l'écosystème soit par le fait même atténué.

Il ressort donc que les composés azotés (nous excluons ici volontairement toutes les autres composantes ioniques de la neige) sont sujets à des transformations lors de leur parcours entre la neige elle même et les eaux de surface des cours d'eau. D'ailleurs, une série d'expériences menées en laboratoire ayant trait à la dynamique des composés azotés durant la fonte, ont mis en évidence des pertes de l'ion nitrate et de l'ion ammonium à l'intérieur de la neige (Jones et Deblois 1987). Ces pertes seraient de l'avis des auteurs, liées à l'activité microbiologique nivéale qui s'accentue au moment de la fonte printanière lorsque le contenu en eau liquide de la neige est grand. Les organismes responsables de la prise en

charge des nutriments seraient multiples: microépiphytes, lichens, algues, bactéries, champignons. L'assimilation serait d'autant plus importante que la disponibilté en matière organique supportant les microorganismes est grande. L'utilisation biologique des formes azotées dans la neige peut atteindre près de 20% de son contenu total lorsque cette neige contient une certaine quantité de matière organique (Jones et Deblois 1987). Il semble donc que le couvert de neige joue un rôle important dans le flux des éléments nutritifs particulièrement au moment de la fonte printanière. Le couvert de neige doit, par conséquent, être considéré comme un biotope important des écosystèmes où il est présent.

L'activité biologique nivéale

Bien que l'activité biologique sur la chimie de la neige soit peu connue, la présence et la nature des organismes nivéaux sont quant à elles relativement bien documentées.

Visser (1973) identifiait près de 40 organismes dans une neige saine. Kol (1975) fait mention de 67 microorganismes nivéaux représentés à 88% par des espèces d'algues. Les algues nivéales sont surtout des algues vertes unicellulaires flagellées appartenant au groupe des chlorophytes (Hoham 1980).

Sur le plan nutritif, les algues peuvent trouver les nutriments nécessaires à leur développement dans la neige elle-même. Ainsi la litière coniférienne couvrant les congères constitue une importante source nutritive aux algues (Hoham 1976, Hoham et Mullet 1977). Selon ces auteurs, les éléments nutritifs sont lessivés de la litière présente à la surface de la neige, entraînés à travers celle-ci puis assimilés par les microorganismes lorsque la température de l'air est supérieure à 0°C. Il semble que la neige sous couvert forestier entretient une croissance plus grande qu'en milieu ouvert (Jones et Deblois 1987).

Sans nul doute, la neige constitue un substrat viable à la croissance des microorganismes. On connaît mal, toutefois, de quelle façon et dans quelle mesure les microorganismes interviennent dans le flux des composés azotés et des métabolites présents dans la neige.

1.4 OBJET DE L'ÉTUDE

Toutes ces considérations sur le dynamisme physico-chimique de la neige nous amène à constater que le couvert neigeux est sujet à des modifications au cours de l'hiver mais aussi et surtout au cours de la fonte printanière. Cette dernière représente une période critique pour les écosystèmes au moment où les polluants acides (SO₄, NO₃, H⁺) emmagasinés durant l'hiver sont subitement relâchés du couvert de neige. Le comportement de l'ion nitrate retient particulièrement l'attention car, en plus de contribuer à l'acidité des eaux de fonte, il constitue avec l'ion ammonium un élément nutritif essentiel pour le développement et la croissance des organismes vivant dans les écosystèmes. Les composés azotés représentent donc, dans la plupart des cas, la source majeure d'azote disponible et sont, par le fait, même des facteurs limitatifs de la productivité. Le phénomène de l'assimilation biologique des ions NO_3 et NH_4 généralement observé dans les sols forestiers et dans les systèmes aquatiques pourrait se reproduire à peu près de la même façon à l'intérieur de la neige en autant que celle-ci supporte une activité biologique. Les travaux de Jones et Delois (1987) ont fait l'hypothèse qu'au moment de la fonte, une certaine partie des ions nitrate et ammonium était retenue à l'intérieur de la neige, probablement par des microorganismes. Les travaux ne permettaient toutefois pas de démontrer le phénomène de façon précise et de façon statistiquement vérifiable.

Partant des observations de Jones et Deblois, nous nous proposons donc, au cours de cette recherche de démontrer que, au cours de la fonte, les composés azotés sont effectivement retenus dans la neige lorsque celle-ci contient une certaine quantité de matière organique. Inversement, une neige propre (i.e. dépourvue ou presque de matière organique) n'affecte pas les concentrations des formes azotées de la neige qui se retrouvent, à toute fin pratique, intégralement dans les eaux de fonte. Pour ce faire, nous avons choisi: 1) de conduire une série de fontes simulées en laboratoire avec des neiges avec et sans litière coniférienne et 2) de caractériser in situ les formes que peut prendre l'activité biologique de la neige. Les fontes simulées représentent bien les condition du milieu et elles ont l'avantage d'éliminer les apports secs ou humides provenant de l'extérieur. Cela permet également de mettre l'emphase et d'isoler les mécanismes qui se produisent à l'intérieur de la neige.

L'originalité de cette recherche réside dans les interactions entre la chimie de la neige et l'activité biologique nivéale qui n'ont jamais été investiguées auparavant.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 FONTES SIMULÉES EN LABORATOIRE

Préparation de l'équipement et traitement des échantillons

Trois séries de fontes (fig. 2) ont été effectuées en laboratoire avec l'aide d'un simulateur de fonte (fig. 3). Les deux premières séries ont été faites avec un stock de neige prélevée en milieu ouvert à la station expérimentale de la forêt Montmorency au cours des hivers 1985 et 1986. Cette neige relativement saine (exempte de matière organique) a été conservée en chambre froide à -10° celsius dans des sacs de polyéthylène fermés jusqu'à l'expérimentation. Cette neige (densité 0,5, diamètre des grains < 0,5 mm) conservée pendant une période aussi longue s'est "compactée" et a subi un certain métamorphisme à l'intérieur des sacs. Avant son utilisation, elle a été ameublie dans un contenant Nalgene (lmxlmxlm) avec un long bâton d'ABS. Tout le matériel destiné à recevoir la neige a été préalablement lavé avec HCl 10% v/v, rincé plusieurs fois à l'eau déminéralisée, trempé pendant une période de 24 heures puis rincé à nouveau. Toutes les pièces du simulateur de fonte (colonnes coulissantes, lysimètres, tubes) ont été nettoyées de la même façon. La propreté du matériel a été vérifiée en analysant les concentrations anioniques d'un échantillon d'eau Millipore ayant séjourné 24 heures dans le système. Toutes les composantes destinées à recevoir la neige pour la fonte ont été placées en chambre froide 24 heures avant d'y introduire la neige.







FIGURE 2: SCHÉMA DES FONTES SIMULÉES EN LABORATOIRE

smo: fonte réalisée sans matière organique mo: fonte réalisée avec matière organique

 $\rm K^{15}N0^3$: traceur isotopique (99 atom %) introduit à la neige avant les fontes



FIGURE 3: SIMULATEUR DE FONTE

La troisième série de fontes a été réalisée avec une neige (densité 0,5, diamètre des grains 1 à 2mm) prélevée en milieu ouvert au cours de l'hiver 1988 à la station expérimentale de forêt Montmorency. Cette neige a été préparée pour la fonte de la même façon que celle utilisée pour les deux premières séries. Toutefois, cet échantillon a été enrichi de 2 g de matière organique pour chaque 3 litres de neige et marqué avec un traceur isotopique stable sous forme de K¹⁵NO₃ 99 atom% (voir section 2.2.7). La densité de la neige a été mesurée avec un densimètre suédois (AB Produck-tionmater Stockholm).

Pour chacune des séries de fontes, la neige fut homogénéisée puis divisée en quatre échantillons de quantité équivalente (2,768 1 EE (équivalence en eau) pour les fontes A et B et 2,841 1 EE pour la fonte C) pour remplir également les quatre colonnes du simulateur. Les colonnes de fonte préalablement réglées à une température de -0.1° C. Les colonnes coulissantes du système permettaient d'ajuster la surface de la neige avec le dessus du simulateur de sorte que la neige soit en contact avec l'air à température ambiante (environ 20° C.) pour permettre la fusion.

L'eau de fonte accumulée dans les lysimètres était prélevée à chaque 24 heures sans interruption jusqu'à la disparition complète de la neige sauf dans le cas de la fonte B où l'expérimentation a dû être interrompue pendant 5 jours consécutifs en abaissant la température du système à -1.0° C. Comme les colonnes étaient hermétiques à l'air ambiant, une pression positive a été maintenue grâce à une bonbonne d'air médical. L'air circulait successivement dans des trappes de Na₂CO₃ 2N et H₂SO₄ 2N pour retenir respectivement le HNO^3 , le NH_3 et le HCL pouvant éventuellement se trouver dans l'air et contaminer nos échantillons.

2.2 TECHNIQUES ANALYTIQUES

Prélèvement et filtration des échantillons

Les échantillons furent prélevés dans des bouteilles Nalgène 250 ml lavées à l'acide nitrique 15% v/v, rincées plusieurs fois, trempées pendant 24 heures, et rincées à nouveau dans l'eau déminéralisée. Ils furent immédiatement filtrés avec un système de filtration de polycarbonate Sartorius ,SM16-510 sur des filtres de polycarbonate Nuclepore de 47 mm de diamètre et de porosité 0.45 um.

Mesure de conductivité et de pH

Aussitôt après la filtration, nous avons procédé aux mesures de conductivité sur les échantillons à 25° C à l'aide d'un conductivimètre "Radiometer". Nous avons utilisé un pH mètre "Radiometer PHM 26" pour les mesures de pH. La calibration de l'appareil fut faite quotidiennement avec les tampons pH 7.0 et pH 4.0 (Fischer).

PARAMETRE	MÉTHODE	SEUIL DE DÉTECTION
рН	potentiomètrie	0.01 unite de pH
conductivite	pont de Wheatsone	1,0 S/cm
chlorures	chromatographie ionique	0,1 mg/l Cl/l
sulfates	chromatographie ionique	0,1 mg SO4/1
phosphates	chromatographie ionique	0,1 mg PO4/1
nitrates	chromatographie ionique	0,1 mg NO3/1
calcium	absorption atomique	0,1 mg Ca/l
magnėsium	absorption atomique	0,1 mg Mg/l
sodium	absorption atomique	0,1 mg Na/1
potassium	absorption atomique	0,1 mg K/l
azote ammoniacal	colorimėtrie	0,1 mg N/1

TABLEAU 4: Méthodologie d'analyse de la neige et des eaux de fonte

Dosage des anions majeurs

L'analyse des anions Cl, PO_4 , NO_3 et SO_4 fut effectuée dans tous les cas à l'intérieur d'une période de 48 heures suivant le prélèvement. Lorsque cela fut possible les analyses ont été effectuées dans les 24 heures. Si, par contre, un délai était inévitable entre le prélèvement et le dosage, les échantillons furent conservés à $4^{\circ}C$.

Les anions Cl, PO₄, SO₄ et NO₃ ont été mesurés avec un chromatographe ionique Dionex 12 S. En général, 4 étalons sur une gamme allant de 0.375 à 1.5 ppm pour Cl et 1.5 à 6.0 ppm pour PO₄, SO₄, NO₃ ont été utilisés pour chaque routine à partir d'une préparation initiale de 1000 ppm de chaque anion diluée dans de l'eau Millipore. Dans le cas où les concentrations anioniques dépassaient l'étalon le plus élevé, des dilutions ont été effectuées pour ramener les concentrations à des valeurs comprises dans la gamme d'étalonnage.

Dosage des cations majeurs et de l'ammonium

Pour chaque échantillon prélevé quotidiennement, 20 ml furent utilisés pour l'analyse des métaux Ca, Mg, Na et K, conservés dans des bouteilles Dilu--Vial (Fisher) et acidifiés à $0.5\% \text{ v/v} \text{ HNO}_3$. Dix ml acidifiés avec H_2SO_4 Aristar 0.2 v/v et conservés dans le même type de contenant ont servi au dosage de NH₄. Les échantillons ont été conservés à 4° C jusqu'à leur analyse. Le dosage des cations mejeurs (Na, K, Ca, Mg) a été effectué avec un spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (modèle Varian 575). L'azote ammoniacal a été dosé à l'aide d'un système automatique Technicon suivant une méthode colorimétrique avec indiphénol sodium nitroprusside (procedure 157-71 W).

Dosage du carbone organique dissous

Finalement, une certaine partie des échantillons fut utilisée pour le dosage du carbone organique dissous et conservée à 4^oC jusqu'à analyse. En général, les mesures ont été faites à l'intérieur de 48 heures suivant le prélèvement avec l'aide d'un autoanalyseur automatique Technicon.

Ajout de matière organique

La neige utilisée au cours de la troisième série de fontes a été enrichie de matière organique en proportion équivalente à ce que l'on trouve dans le couvert neigeux du milieu forestier boréal. Sa composition est la suivante:

> 0,66 g d'écorces d'Abies balsamea; 0,66 g de lichens épiphytes; 0,66 g de feuilles d'Abies balsamea;

pour un total de 2.0 g (poids humide) pour chaque trois litres de neige. Cette matière organique a été prélevée à la surface de la neige et sur les arbres durant l'hiver 1988 avant le début de la fonte et conservée à -10^oC jusqu'à son utilisation. Elle a été légèrement broyée de telle sorte que l'essentiel puisse être retenu par le filtre (maille 2 mm) au bas des colonnes du simulateur de fonte. Les débris végétaux recueillis à la fin de la fonte ont été pesés, séchés à l'étuve à 102⁰C pendant 24 heures et réduits en poudre pour le dosage de l'isotope par spectrométrie de masse.

Emploi du traceur isotopique stable K15NO3

Dans le but de connaître le destin du nitrate à l'intérieur du couvert neigeux, une quantité d'azote marquée sous la forme $K^{15}NO_3$ 99 atom% a été ajoutée à la neige. La quantité de ¹⁵N a été déterminée de sorte à ce qu'elle soit équivalente à la quantité totale de ¹⁴N contenu dans la neige:

> $([NO_3 - {}^{14}N] + [NH_4 - {}^{14}N] \times V)$ = (0.64 mg/L + 0.069 mg/L) x 3)

où V = volume de la neige en équivalent eau par colonne (3 litres).

Compe tenu qu'une mole de $K^{15}NO_3$ contient 15 gr d'azote, il faudra 14,5 mg de $K^{15}NO_3$ pour obtenir une quantité de ^{15}N équivalente à la quantité de ^{14}N (2.13 mg) mesurée initiallement dans la neige selon l'équation ci-haut. Ainsi, 58 mg (4x14,5 mg) de $K^{15}NO_3$ solubilisés dans 25 ml (0,023 M) d'eau Millipore ont été vaporisés sur la neige à l'aide d'un nébuliseur d'absorption atomique pressurisé par de l'air médical comprimé. Faute de techniques éprouvées pour ce genre d'expérimentation, cette méthode nous est apparue la plus appropriée pour permettre une distribution homogène du traceur isotopique dans la neige.

Mesures d'ATP

Dans le but de mettre en évidence la dynamique des composés azotés en relation avec l'activité biologique nivéale, les échantillons de neige furent analysés pour en connaître leur contenu en ATP. Cette procédure nous a permis de déterminer si la neige, malgré des conditions de conservation prolongées en milieu artificiel et malgré un métamorphisme important, n'avait pas perdu sa capacité à supporter des microorganismes et qu'elle pouvait, par conséquent, bien refléter les conditions prévalant en milieu naturel.

Pour ce faire, une quantité de neige suffisante pour permettre plusieurs mesures réparties sur plusieurs jours a été fondue rapidement. Immédiatement après la fonte, 400 ml d'eau ont été prélevés pour un premier dosage des concentrations d'ATP. Le reste de l'échantillon a été conservé en chambre froide à 4^{OC} pour les autres dosages effectués à 3, 4, 6 et 7 jours du premier. Cet étalement sur plusieurs jours avait pour but de déterminer si les concentrations d'adénylates affichaient une variation dans le temps.

La méthode de filtration et d'extraction de l'ATP utilisée ici est celle proposée par Lefebvre et al. (1988). Les échantillons ont été filtrés sous un vide de 0,5 ATM avec l'aide d'un système de filtration en verre Millipore et de filtres de polycarbonate Nuclepore (0,47 mm de diamètre; densité 0,4 m) dans le temps le plus bref possible afin d'éviter la transformation des nucléotides d'adénylates. Notons toutefois que les filtres avaient tendance à se colmater rapidement ce qui augmentait le temps de filtration des échan-
tillons de plusieurs minutes. Il est possible que cela ait engendré la destruction de certaines molécules d'ATP.

La méthode d'extraction indirecte a été utilisée dans le but de contourner le problème de l'inhibition enzymatique engendrée par les substances dissoutes présentes dans la fraction liquide de l'échantillon (Lefebvre et al. 1988). La méthode consiste à retenir sur un filtre la biomasse et d'en extraire au DMSO (diméthylsulfoxide (D-128 Fisher)), le contenu en ATP. Les filtres agités au "Vortex" pendant 40 secondes. Après un repos de trois minutes, 5,5 ml de tampon MOPS (morpholino sulfonic acid, Aldrich #18377-5 F.W.209.26) à 10 mM fut ajouté. Les échantillons ont été congelés à 25°C jusqu'au dosage.

Le dosage de l'ATP des échantillons a été fait par bioluminescence avec le système luciférine-luciférase. L'émission de photons résultant de la réaction enzymatique est mesurée avec un lumiomètre de type LKB 1213.

2.3 ANALYSE STATISTIQUE

Une analyse statistique des données obtenues a été effectuée dans la but de s'assurer que l'échantillon de neige utilisé pour les fontes des séries A et B n'a pas subi de modification significatives de ses caractéristiques physico-chimiques lors sa manipulation. Elle avait également pour but de caractériser la variabilité des différentes formes ioniques.

Le test paramétrique de Shapiro et Wilk (1965) a été utilisé sur les résultats des fontes des séries A et B pour vérifier la normalité des populations. L'usage de ce test a été nécessaire étant la petite taille de certains échantillons (n=4). Cela nous a permis dans un second temps d'utiliser le test de Student sur l'égalité des moyennes.

L'application de ces tests est décrite plus en détail dans le chapitre Résultats et discussion.

2.4 LE MODELE SNOQUAL

SNOQUAL est un modèle conceptuel prédictif qui permet de mettre en relation la quantité d'eau de fonte provenant de la neige et sa composition chimique. Le modèle présente trois variantes, SNOQUAL1, SNOQUALR et SNOQUALD tous trois basés sur le lessivage surficiel de la neige exprimé ici par le coefficient K appellé coefficient de lessivage. Jones et al. (1990) a montré que la variante SNOQUALR représente le plus fidèlement la réalité en milieu naturel.

Les différentes versions du modèle ont été utilisées pour simuler la composition chimique des eaux de fonte dans différentes conditions. Les modèles ont été éprouvés sur des fontes en milieu naturel et des fontes simulées en laboratoire.

La variante SNOQUALR du modèle s'est avérée la plus performante c'est-à-dire

celle représentant le mieux les concentrations des eaux de fonte des expériences en laboratoire et en milieu naturel.

Nous avons à partir des données provenant des fontes des séries A, B et C utilisé le modèle SNOQUALR dans le but de vérifier comment nos données pouvaient s'apparenter au modèle. Le modèle a été utilisé pour les anions majeurs uniquement (Cl, SO_4 , NO_3).

2.5 CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN

Deux campagnes de terrain ont été effectuées dans le but de rechercher la présence des formes d'activité biologique nivéale et d'évaluer l'influence des microorganismes sur la chimie de la neige. Ces campagnes ont été effectuées au printemps au Québec et à l'été dans les Alpes françaises. Ces périodes de l'année étant plus propices à la croissance des microorganismes le contenu en eau de la neige étant plus grand et le rayonnement plus intense.

La première campagne a été effectuée dans le massif des Laurentides du nord de Québec à la station expérimentale de Forêt Montmorency (altitude 777 m.) (figure 4). Quatre échantillons de neige (2 avec algues et 2 sans algues) ont été prélevés le 9 mai 1988 et six (3 avec algues et 3 sans algue) le 17 mai 1988. Tous les échantillons ont été prélevés sous couvert forestier coniférien.



La fonte de neige était amorcée depuis plus de 1 mois et le couvert de neige était discontinu. L'épaisseur de la neige au sol excédait rarement un mètre.

Les échantillons ont été prélevés avec des gants de polyéthylène stérilisés et déposés dans des sacs également stérilisés et hermétiques. Ils furent par la suite conservés en chambre froide à -4^oC jusqu'à leur analyse dans les 48 heures suivantes.

Des mesures de conductivité, de pH, des cations et anions majeurs ont été faits suivant les mêmes méthodes que celles décrites à la section 2.2.

Une partie des algues a été acheminée au laboratoire du département de biologie de l'université Colgate, Hamilton, N.Y. pour analyse. Des cellules végétatives d'algues vivantes inoculées dans un milieu de culture solide (medium M-1: voir Hoham et al. 1979) ont été placées en chambre froide controlée sous éclairage fluorescent à 100-570 W cm⁻² avec une photopériode de 16-8 h.

Une fois la reproduction végétative des cellules bien amorcée, certaines d'entre elles ont été transférées dans un milieu de culture liquide (medium M-1 sans agar) dans le but de favoriser et de mieux suivre l'évolution des différentes phases de leur cycle vital.

La seconde campagne de terrain a été effectuée dans les Alpes françaises (figure 5) au cours des mois de juillet, aôut et septembre 1988. Trois

sites ont été visités.

Le premier échantillonnage a été fait aux 2 Alpes (site 1, figure 5) à la fin du mois de juillet 1988. Plusieurs névés de coloration rougeâtre ont été visités entre 2800 et 3000 m. d'altitude.

Le massif de la Vanoise a été le deuxième site visité (site 2, figure 5). Les algues ont été prélevées à tous les 50 m. d'altitude entre 2500 et 2800 sur un versant d'exposition nord-est. Ce plan d'échantillonnage avait pour objet de distinguer différents stades du cycle vital des algues.

La troisième sortie a été effectuée dans la région de Chamonix (site 3, figure 5). Plusieurs échantillons de neige très rouge ont été prélevés à l'altitude 2500 m.

Les techniques d'échantillonnage et d'analyses chimiques sont les mêmes que celles utilisées au cours des campagnes au Québec.



FIGURE 5: localisation des sites d'échantillonnage dans les Alpes françaises

3. <u>RÉSULTATS ET DISCUSSION</u>

3.1 LES FONTES SIMULÉES EN LABORATOIRE

3.1.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA NEIGE AVANT LA FONTE

La première série de fontes (Série A) a duré 16 jours (excluant les 5 jours d'interruption après le jour 11), la seconde (Fonte B) 18 jours et la troisième (Fonte C) 19 jours. Pour l'ensemble des trois fontes, les volumes moyens d'eau de fonte prélevés quotidiennement sont de 173,6 ml. D'importants écarts autour de cette moyenne apparaissent mais dans l'ensemble ils sont peu fréquents et surviennent surtout en début ou en reprise de fonte. Quant aux variations quotidiennes de moindre importance, nous les attribuons à des variations de température de l'air ambiant du laboratoire et à des ajustements du système de refroidissement en début de fonte. On observe, également, que les premiers volumes d'eau de fonte n'apparaissent généralement que 48 heures après le début de la fonte.

Une analyse statistique détaillée des caractéristiques physico-chimiques de la neige avant la fonte est présenté plus loin.

SERIE	NO. FONTE			ANIONS		24	CATIONS							
	100	Cl	NO3	SO4	TOTAL (anions)	Na	к	Ca	Mg	NH4	Н	TOTAL (cations)		
SÉRIE A	1	21,2	42,1	24,4	87,6	6,1	2,0	19,5	3,5	26,4	22,7	80,3	4,3	
1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.	2	13,8	40	23,7	77,5	7,8	1,8	17	3,1	26,4	18,1	74,2	2,2	
	3	16,6	41,1	24,4	82,1	7,4	2,6	18,5	3,4	26,4	17,6	75,9	4	
	4	13,3	38,5	22,9	74,7	7,7	2	16,5	3,1	26,4	18,9	74,9	,01	
SÉRIE B	5	13,8	39,7	25,4	78,9	6,9	2,6	19,5	2,7	26,4	11,9	70	6	
	6	12,1	40,1	25,4	76,6	6,5	2	19	2,3	27,1	14	71	3,8	
	7	12,1	39,7	25,4	77,2	6,1	2,8	19	2,5	27,1	14,3	71,8	3,6	
	8	12,7	40,1	25,4	78,2	7	3,1	19	2,4	27,9	14,7	74,1	2,7	

TABLEAU 5: Composition chimique et balances ioniques de la neige avant la fonte (SÉRIES A ET B) (ueq/l)

Concentrations ioniques de la neige des séries A, B et C

Les concentrations ioniques de la neige utilisée pour les séries A et B sont présentées au tableau 4. Parmi les 10 ions analysés le NO₃ contribue en moyenne pour plus de 48% du total anionique alors que l'ion NH₄ représente plus de 36% du total cationique. Les concentrations moyennes (ueq/l) des ions sont les suivantes: Cl 14,4; NO₃ 40,2; SO₄ 24,6; Na 7,1; K 2,36; Ca 18,5; Mg 2,9; NH₄ 26,7; H 16,5. La composition ionique de la neige utilisée pour les fontes de la série C (tableau 6) diffère de celle des séries précédentes. Les concentrations de nitrate représentent 50% du total anionique. Les ions H, Na et K contribuent pour plus de 80% du total cationique alors qu'ils n'y comptaient que pour 18% dans le cas des séries A et B. La contribution de l'ammonium n'excède pas 6% du total des cations.

La comparaison entre les neiges A et B et celle de la série C fait ressortir d'importantes différences de composition ionique. Cela est particulièrement manifeste dans le cas du calcium et de l'ammonium qui sont respectivement d'environ 2 et 5 fois plus élevées dans les neiges A et B. Par contre, les concentrations de sodium et de potassium sont respectivement de 2 et 8 fois plus élevées dans la série C. Ces différences pourraient être attribuées au fait que la neige de la série C contenait au départ une plus grande quantité de débris végétaux que la neige des séries A et B, ce qui aurait contribuer à enrichir la neige de certains ions. La présence d'importantes quantités de potassium pourrait originer de la dissolution physique et/ou de la dissolution microbiologique des débris organiques présents dans la neige

tel que l'a observé Jones (1984). D'autre part, les travaux de Jones et Sochanska (1985) ont montré qu'une relation existait entre les espèces ioniques Ca, Mg et Na résultant de l'activité microbiologique hétérotrophe.

		ANIONS			(%)						
Cl	NO3	SO4	TOTAL (anions)	Na	ĸ	Ca	Mg	NH4	H	TOTAL (cations)	
16,70	45,80	27,90	90,40	16,20	21,30	7,90	2,59	4,93	29,96	82,99	4

TABLEAU 6: Composition chimique et balances ioniques de la neige avant la fonte (Série C) (ueq/l)

Balances ioniques de la neige des séries A, B et C

Les mêmes tableaux (5 et 6) présentent les balances ioniques pour chacun des échantillons. Dans tous les cas, les écarts entre la somme des cations et la somme des anions sont inférieurs à 6% ce qui respecte le principe d'électroneutralité des solutions aqueuses. On peut donc considérer qu'aucun ion majeur n'a été oublié au cours des analyses.

Contenu en ATP de la neige des séries A, B et C

Des mesures de contenu en adénylates des neiges destinées aux expérimentations ont été réalisées dans le but d'avoir une idée de la quantité de biomasse viable dans un milieu.

La figure 6 montre les variations du contenu en adénylates en fonction du temps de la neige utilisée pour les séries de fontes A et B. Le contenu initial de la neige mesuré tout juste après la fonte de l'échantillon (jour 0) égale 2,07nM et atteint 6,91nM au septième jour. En excluant la valeur aberrante mesurée au jour 3 (5.6nM) il semble que le contenu en ATP de l'échantillon d'eau de fonte augmente avec le temps. Cette tendance nous amène à considérer l'hypothèse que cette neige, malgré des conditions de conservation artificielles, supporte toujours une biomasse viable.

Les concentrations d'adénosine triphosphate mesurées sur deux échantillons provenant de la neige de la série C varient de 4,21 nM à 14,7 nM. Elles sont

de 2 à 7 fois plus élevées que celles obtenues sur la neige A et B. La neige utilisée pour la série de fonte C semble donc constituer un milieu plus propice à l'activité biologique.

Cette tendance à la hausse des concentrations d'ATP présentée à la figure 6 ne doit être considérée qu'à titre indicatif. Il faut interpréter les données présentées ici avec prudence compte tenu de leur petit nombre. Il y a toutefois tout lieu de croire que le phénomène d'augmentation d'ATP correspond à la réalité mais il faudrait pour le démontrer de façon non équivoque investiguer davantage.

Analyse statistique des données physico-chimiques de la neige des séries A et B

L'analyse statistique présentée ici vise deux objectifs:

- 1. caractériser la variabilité des différents ions;
- s'assurer que la manipulation des échantillons de neige n'a pas entraînée de modification des échantillons utilisés pour les fontes A et B. On s'assure ainsi que les deux fontes sont comparables.

Pour ce faire, les moyennes, les variances et les coefficients de variation furent déterminés pour chacun des ions (tableau 7). Ensuite, les moyennes de chacun des ions de la neige de la série A ont été comparées avec celles de la série B par le test de Student et cela une fois la normalité des



FIGURE 5: Variation des concentrations d'ATP (Séries A et B)

populations validée par l'application du test Shapiro et Wilk (1965).

La valeur Wc du tableau calculée par le test Shapiro et Wilk doit être plus grande que la valeur W (ã) déterminée en fonction de la taille de l'échantillon et d'une valeur ã donnée correspondant à la probabilité au non-dépassement. Avec une probabilité au non-dépassement de 5%, cette valeur doit être supérieure à 0,818. Les résultats (tableau 6) montrent que cette valeur est dépassée dans tous les cas sauf pour Cl et SO₄ dont les valeurs Wc sont respectivement de 0,77 et 0,69. On peut toutefois considérer que le SO₄ répond comme tous les autres ions à une loi normale mais il faut garder en mémoire que les analyses statistiques pour cet ion sont peut être moins fiables. Il en va probablement de même dans le cas du chlorure dont la mesure est parfois difficile en raison des nombreuses sources de contamination.

Le test de Student a été réalisé avec une probabilité au non dépassement bilatéral de 5%. Les résultats montrent que les moyennes des concentrations ioniques se situent toujours à l'intérieur de l'intervalle de confiance de

± 2,45 et ne sont, par conséquent, pas significativement différentes entre elles. Ce test permet donc d'affirmer sans équivoque que, d'une part, les caractéristiques chimiques de la neige utilisée pour les séries de fonte A et B ne sont pas modifiées entre les deux fontes ce qui confirme la fiabilité de la méthode analytique. Les quatre fontes de la série A et les quatre fontes de la série B peuvent donc être considérées comme représentant le même phénomène. Les huit fontes présentent d'ailleurs les mêmes tendances. Aucune analyse statistique n'a été effectuée sur les échantillons de neige de la série C avant la fonte.

MEQUIDE		ANIONS					CATIONS							
MESURE		CL NO3		S04	TOTAL ANIONS	Na	к	Ca	Mg	NH4	а н	TOTAL CATIONS		
x	(ueq/l)	16,20	40,40	23,80	80,50	7,50	2,11	17,88	3,28	26,20	19,30	76,30		
х	(ueq/l)	12,70	30,90	25,40	77,70	6,60	2,60	19,10	2,48	27,10	13,70	71,70		
х	(ueq/l	14,40	40,20	24,60	79,10	7,10	2,36	18,50	2,90	26,70	16,50	74		
S		3,60	1,54	,70	5,64	1,08	,34	1,38	,20	,35	2,30	2,74		
S		,80	,23	0	1,02	,41	,46	,25	,17	,61	12,50	1,74		
S		3,10	1,06	,95	4,03	,89	,47	1,13	,46	,67	3,45	3,25		
cv	(%)	21,30	2,60	3,90	5,10	12,50	19,90	6,10	15,90	2,30	21	4,40		
w		,77	,95	,69	,85	,93	,87	,81	,87	,91	,95	1		
т		,83	,67	-2,38	,98	1,43	-1,47	-1,52	2,46	-1,89	2,30	2		

TABLEAU 7: Analyse statistique de la neige avant fonte (Série A et B)

X : moyenne de la série A.

X : moyenne de la série B.

X : moyenne des séries A et B.

S : variance de la série A.

S : variance de la série B.

S : variance des séries A et B.

CV (%) : Coéfficient de variation calculés sur les séries A et B.

W : valeur calculée du test Saphiro et Wilk sur les séries A et B (valeur critique = 0.818).

T : t de student sur l'égalité des moyennes des séries A et B (-2.45 < x < 2.45).

3.1.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE FONTE

Balances ioniques des séries A, B et C.

Comme nous l'avons fait avec les échantillons de neige, les balances ioniques des échantillons d'eau de fonte des séries A, B et C ont été calculées mais cette fois-ci à partir des bilans de masse.

Les résultats du calcul des balances ioniques pour les séries A et B sont présentés au tableau 8. Les valeurs du tableau (bilan de masse (ueq/l)) représentent pour chacune des fontes, la somme des charges totales de chaque jour de fonte pour chacun des ions, c'est à dire en tenant compte du volume d'eau prélevé.

Comme c'était le cas dans le calcul des balances des échantillons de neige, un léger déficit cationique apparaît partout. Toutefois, ce déficit est négligeable et si on accepte une certaine marge d'erreur, on peut le considérer comme non significatif. On peut en somme croire que le principe d'électroneutralité est respecté et qu'aucun ion majeur n'a été oublié lors des analyses.

Pour l'ensemble des huit fontes des séries A et B, l'ion nitrate est toujours dominant et compte pour 48% du total anionique. L'ion ammonium représente en moyenne plus de 30% du total cationique.

Les bilans des fontes de la série C se présentent tout à fait différemment. Ils sont présentés au tableau 9. Rappelons que pour les fontes 2, 3 et 4 de

SERIE	NO. FONTE		ANIONS				CATIONS							
		CL	NO3	S04	TOTAL (anions)	Na	κ	Ca	Mg	NH4	H	TOTAL (cations)		
SÉRIE A	1	56,4	109,4	66,9	232,7	22,7	7,6	42,6	7,6	70,2	65	215,7	3,8	
	2	61,1	99,4	65,3	225.8	26,1	7,3	40,5	7,6	66,9	51,2	199,5	6,2	
	3	38,9	100,2	62,6	201,6	21,5	8,2	39,2	8,3	66,5	52,5	195,9	1,4	
	4	44,6	112,5	69,3	226,4	24,2	9,8	44,9	8,1	74,6	60,2	221,7	1	
SÉRIE B	5	40	109,5	67,7	217,3	20,5	12,2	57,9	8,5	77,2	32,9	209,1	1,9	
	6	37,4	106,9	67,9	212,2	19,2	9,8	58,1	8,3	79,4	35,4	210,2	,5	
	7	38,3	122,4	74,7	235,3	20,4	10,4	58,1	8,5	74,6	46	218	3,8	
	8	38,9	126,2	79,3	244,4	20,7	10,0	61,0	9,3	81,4	45,2	227,7	4,2	

TABLEAU 8: Balances ioniques sur bilans de fontes (SÉRIE A ET B) (ueq)

SERIE	NO. FONTE		ŝ		CATIONS									
		CL	NO3	SO 4	DOC	TOTAL (anions)	Na	K	Ca	Mg	NH4	Н	TOTAL (cations)	
SÉRIE C	9	29,1	136,4	41,1	19	225,6	68,1	105,5	30,7	16,3	22,6	38,4	281,7	11
	10	36,5	112,1	52,3	19,4	220,3	88,2	139,4	30,8	22,5	8,8	17,1	308,7	17
	11	37,2	124,2	55,6	19,5	236,5	80,2	142,6	31,3	25,6	7,2	38,3	325,2	16
	12	39,1	138,2	51,9	18,9	248	81,2	145,8	28,5	18,8	8,8	38,3	321,4	13
												<.		

TABLEAU 9: Balances ioniques sur bilans de fontes (SÉRIE C) (ueq).

cette série, une certaine quantité de matière organique a été ajoutée à la neige (voir chap.II). La fonte 1 est le contrôle et n'a pas reçu de matière organique. Aussi, l'échantillon de neige a été enrichie avec le traceur isotopique stable $K^{15}NO_3$ dans le but de suivre le destin de l'azote au cours de la fonte.

Dans tous les cas, on remarque un déficit anionique. Les déséquilibres observés sont tous supérieurs à de 11%, celui de la fonte 2 atteignant 17%, et cela même en tenant compte des concentrations de carbone organique dissous qui ont été calculées dans les balances en raison des fortes concentrations mesurées dans les eaux de fonte. Suivant le modèle empirique d'Oliver et al. (1983), le contenu en acides organiques estimé à partir des mesures de concentrations de carbone organique dissous est équivalent à 10 ueg/mg C.

Les importants écarts qui se répètent de façon quasi-systématique peuvent avoir plusieurs explications. La matière organique, notamment les débris végétaux, peut apporter au cours de sa dégradation des acides organiques pouvant affecter la composition ionique des eaux de fonte. D'ailleurs, l'analyse des chromatogrammes de concentration de la chromatographie ionique permet de détecter des pics particulièrement importants en début de fonte et précédant les anions majeurs mesurés. L'examen de la position des pics permet de croire qu'il pourrait s'agir de l'acide oxalique. Malheureusement, aucune mesure précise n'a été faite sur cet acide, la calibration du chromato-graphe et la préparation des étalons n'ayant pas été prévues à cet effet. Notons enfin que les déficits anioniques ne sont pas rares et ont

été observés dans plusieurs cas (Delmas 1989).

L'analyse comparative des bilans de fonte des séries A et B avec le bilan de la série C fait ressortir des différences importantes de la composition chimique des eaux de fonte. Les concentrations de Cl et SO_4 sont légèrement plus faibles dans les fontes de la série C. Par contre les nitrates y sont en plus grande quantité. Du côté des cations, les concentrations de sodium, de potassium et de l'ion ammonium sont plus grandes que celles observées dans les fontes A et B. Cela est particulièrement évident pour le potassium dont les concentrations sont d'environ dix fois supérieures aux eaux de fonte provenant de neige sans matière organique (séries A et B). L'ajout du traceur isotopique K¹⁵NO₃ peut en partie expliquer les fortes valeurs de K et dans une certaine mesure celles de l'ion nitrate.

D'autre part, les concentrations de l'ion ammonium sont en moyenne près de dix fois plus faibles dans la série C. Pourtant les concentrations initiales de cet ion pour les séries A et B sont, comme nous l'avons vu précédemment, 5 fois plus élevées que dans la neige de la série C. Cette observation peut être importante en regard de notre problématique portant sur l'effet de la matière organique sur les composés azotés. Nous en reparlerons plus loin.

L'ajout de matière organique et du traceur isotopique semble donc, à la lumière de ces résultats, avoir eu une certaine influence sur les équilibres chimiques de la neige et des eaux de fonte.

Bilans de fonte des séries A, B et C

Dans le but d'établir si les ions initialement mesurées dans la neige s'étaient conservés au cours de la fonte ou si au contraire il y a eu gain ou perte, nous avons comparé les concentrations ioniques des échantillons de neige et celles obtenues au cours de la fonte. Les résultats sont présentés au tableau 10, 11 et 12.

Les gains ou les pertes pour chacun des ions sont obtenus de la façon suivante:

 $I = (\sum c_{ji} - c_{ni})$

où: $\sum C_{ji}$ = somme des charges de l'ion i mesuré dans la neige au jour J de la fonte.

 C_{ni} = charge de l'ion i mesuré dans l'échantillon de neige avant la fonte.

Le tableau 10 montre que certains ions notamment le chlorure, le sodium et le potassium ont enregistrés des gains moyens pour les quatre fontes de l'ordre 17,8%, 21,5% et de 46,7% respectivement. Par contre, les composés azotés semblent s'être conservés dans les quatres fontes, exception faite de NO_3 de la fonte 2 pour laquelle une légère perte de l'ordre de 5,6% a été enregistrée et du gain en ammonium de la fonte 4 (4.5%).

ION		FONTE 1	FONTE 2	FONTE 3	FONTE 4	NOYENNE
						2
Cl	ueq	12,5	19,1	1,6	.4	5,1
	X	28,5	45,5	4	1	17,8
NO3	ueq	,3	-5,9	-1,1	2,5	-,3
	X =	,3	-5,6	-1,1	2,2	-1,1
50/		3 E	7 7	7.6		• /
304	veq	2,5	3,3 5 3	5,0	4,1	5,4
	^	3,7	2,3	0,9	0,5	5,5
Na	ueq	2,8	6,9	3	4	4,2
	X	14	36	16,2	19,8	21,5
к	ueq	1,9	1,8	2,9	3,9	2,6
	*	33,3	32,7	54,7	66,1	46,7
		а К. Ц			e ²	
Ca	ueq	-5,7	-5,8	-5,3	-3,6	-5,1
	x	-11,9	-12,6	-12	-7,4	-11
		¥				
Mg	ueq	-1,3	-1,2	,1	-,9	- ,8
	x	-14,6	-13,6	1,2	- 10	-9,2
NH4	Lea	- 4	•1.1	1	3.2	7
	X	6	-1.6	1.5	4.5	1
			.,.	.,,,		
н	ueq	13,3	1,3	4,4	7,7	6,7
	x	25,7	2,6	9,1	14,7	13
				8		

TABLEAU 10: Gains et pertes foniques au cours de la fonte (Série A)

	ION		FONTE 5	FONTE 6	FONTE 7	FONTE 8	MOYENNE
						-	1
	Cl	ueq	3,4	,1	,6	1,5	1,4
		X	9,3	,3	1,6	3,9	3,8
	NO3	ueq	-3,5	-8,1	-4	7,7	-2
4		x	-3,1	-7	-3,4	6,5	-1,9
	SO4	ueq	-4,3	-5,5	,5	3,7	3,4
		X	-6	-7,5	,7	4,9	5,5
						2	
	Na	ueq	1,7	,1	1	1	1
		x	9	,5	5,2	5,2	5
		×	۰. ۱				
	ĸ	ueq	4,8	2,2	2,7	2,1	3
		x	64,9	28,9	35,1	26,9	39
							10 A
	Ca	ueq	3,8	3	2,3	3,2	3,1
		×	7	5,4	4,1	5,6	5,5
	Mg	ueq	1,5	1,2	1,3	2	1,5
		×	21,4	16,9	18,1	27,4	21
			· * .				
	NH4	ueq	,1	,8	-4,9	3.2	- ,9
		× .	,1	1	-6,2	,6	-1,1
	н	ueq	-5,4	-4,1	6	4,5	6,7
		*	-14,1	-10,4	15	11,1	13

TABLEAU 11: Gains et pertes ioniques au cours de la fonte (Série B)

ж	ION		FONTE 9	FONTE 10	FONTE 11	FONTE 12	NOYENNE FONTES 10, 11 ET 1	2
	cl	ueq	-18,3 -	-11,9	-11,4	-8,1	-10,5	
		x	-38,6	-24,6	-23,5	-17,2	-21,8	
	NO3	ueq	3,3	-24,3	-12,4	5,6	-10,4	
		x	2,5	-17,9	-9,1	4,2	-4,3	
3	\$04	uea	-48.1	-31.5	-28.3	-29,5	-29,8	
		x	-59,3	-37,6	-33,7	-36,2	-35,8	
	Na	ueq	21	40	31,9	34,3	35,4	
		x	44,6	83,2	66	73,1	74,1	
	*	· ,					70 6	
	ĸ	ueq	43,6	76,1	79,1	84,Z	79,8	
		. X	70,4	120,2	124,6	136,7	127,2	
	Ca	ueq	7,7	7,4	7,8	5,7	7	
	j.	x	33,6	31,6	33,2	25	29,9	
	Mg	ueq	8,8	14,8	17,9	113	14,7	
		*	6	192,2	232	150,7	191,6	
	NH4	ueq	8,4	-5,8	-7,4	3.2	-6,2	
		×	59,2	-39,7	-50,7	-38	-42,8	
	3	×.					8. 10	
	н	ueq	-48,8	-69,8	-50,9	-48,2	-56,3	
		x	-56,1	-78,5	-57,1	-55,7	-63,8	

TABLEAU 12: Gains et pertes au cours decours de la fonte (Série C)

Les résultats des fontes de la série B sont présentés au tableau 11. On note des gains importants en potassium (39%) et en magnésium (21%). Les variations de Cl (3,8%) et de Na (5.0%) sont toutefois moins évidentes que dans le cas de la série A. Encore ici, les composés azotés semblent s'être conservés presqu'intégralement au cours de la fonte, les taux de variation du nitrate et de l'ammonium étant respectivement de -1,9% et -1,1%.

Pour les séries A et B, les formes d'azote inorganique (NH_4 et NO_3) se sont bien conservées tandis que des gains ont été notés pour K, Ca et Mg.

Le tableau 12 présente les taux de variation obtenues pour chacune des fontes de la série C. Il importe de préciser ici que les valeurs de la fonte 9 ne peuvent être comparées aux autres, celle-ci constituant notre contrôle auquel aucune matière organique n'a été ajoutée. En conséquence, les gains et les pertes moyens sont calculés en effectuant la moyenne des valeurs obtenues pour les fontes 10, 11, 12.

Au cours de la fonte, la plupart des ions sont sujets ici à d'importantes variations se traduisant par des pertes en Cl (-21,8%), NO_3 (-4,3%), SO_4 (-35,8%), NH_4 (-42,8%) et H⁺ (-63,8%) et des gains en Na , K, Ca et Mg variant entre 30 et 191%.

La matière organique et l'ajout du traceur $K^{15}NO_3$ semblent ici avoir eu une influence sur la composition chimique de la neige et sur le flux des éléments.

Par ailleurs, les valeurs obtenues dans le cas du nitrate n'affichent pas toutes les mêmes tendances. Dans le cas des fontes 10 et 11, le résultat du calcul des bilans montrent des valeurs négatives qui portent à croire qu'une certaine quantité de nitrate a été retenue quelque part au cours de la fonte. Cependant, la fonte 12 montre une valeur positive pour le même ion. Il y aurait donc eu ici un gain en nitrate. Il faut toutefois être prudent sur l'interprétation de ces résultats car l'origine de ce gain en nitrate pourrait s'expliquer par un mélange imparfait du traceur isotopique dans l'échantillon de neige lors de sa préparation. Dans cette éventualité, le traceur K¹⁵NO₃ aurait pu se retrouver en plus grande quantité dans une des quatre colonnes, en l'occurrence la colonne 12. Cette hypothèse est d'ailleurs renforcée par les fortes concentrations de potassium pour cette même colonne.

La fonte 9 qui a servi de contrôle affiche sensiblement les mêmes tendances mais dans des proportions moindres que les trois autres fontes. En somme, plusieurs cations, notamment Na, K et Ca ont augmenté de façon significative au cours de la fonte. Ces ions peuvent d'ailleurs être d'origine commune. Plusieurs travaux ont montré que le lessivage de la matière organique peut constituer une source de cations majeurs. Les gains enregistrés ici peuvent donc être attribuables à la dégradation microbiologique de la matière organique et/ou à des mécanismes d'échanges ioniques entre les débris organiques au contact des eaux de fonte ainsi qu'au lessivage de ceux-ci comme nous en avons discuté plus tôt. Dans une autre étude, Jones et Sochanska (1985) ont d'ailleurs montré que le lessivage de la matière organique peut augmenter la charge de certains ions (Ca, NH₄, Mg).

3.1.3 L'ENLEVEMENT DES IONS NH4 ET NO3 AU COURS DE LA FONTE.

Les figures 7 à 12 montrent l'enlèvement progressif des composés azotés au cours de la fonte.

Les courbes de chaque fonte montrent une diminution progressive de la quantité de nitrate des séries de fonte A et B (figure 7 et 9). De façon générale, le contenu en nitrate des huit fontes (série A et série B) se comporte de la même façon, l'essentiel étant enlevé dans le premier quart du volume d'eau de fonte. Les concentrations diminuent progressivement par la suite et demeurent inférieures à 50 ueq/l pour le reste de la fonte.

Les mêmes courbes ont été tracées pour l'ion NH_4 (figure 8 et 10). L'enlèvement de l'ammonium de la neige s'effectue suivant le même patron que le NO_3 mais de façon plus progressive cependant.

Les figures 11 et 12 présentent cette même analyse mais pour les fontes de la série C. Les nitrates sont totalement disparus au milieu de la fonte excepté pour le contrôle (fonte 9) où l'ion est mésuré jusqu'à la toute fin de la période de fonte. L'enlèvement des ions ammonium se fait suivant sensiblement la même tendance mais les concentrations chutent rapidement pour devenir quasiment nulles après le premier tiers de la fonte excepté pour la fonte 9 ayant servi de contrôle.



FIGURE 7 Enlèvement des nitrates (fontes série A)



FIGURE 8 Enlèvement de l'ammonium (fontes série A)





FIGURE 9 Enlèvement des nitrates (fontes série B)

5. J.



FIGURE 10 Enlèvement de l'ammonium (fontes série B)

.



FIGURE 11 Enlèvement des nitrates (fontes série C))



FIGURE 12 Enlèvement de l'ammonium (fontes série C)

L'enlèvement des impuretés dans le cadre de ces fontes concorde avec le processus de fractionnation tel que décrit par Johannessen et Henrikson (1978) que nous avons présenté dans la première partie de cette étude et selon lequel plus de 50% des impuretés sont enlevées au cours des premiers jours de fonte. Ce phénomène illustre bien le phénomène du choc printanier.

Mais les ions ne sont pas tous enlevés de la neige au même rythme, certains étant relâchés préférentiellement à d'autres en fonction de leurs caratéristiques physiques.

Le tableau 13 présente les séquences d'élution observées pour chacune des 12 fontes simulées. Les éléments du tableau apparaissent en fonction de leur enlèvement pendant les trois premiers jours de fonte. La partie supérieure du tableau donne les séquences pour chacune des fontes tandis que la partie inférieure montre la tendance générale affichée par la série au complet.

Malgré un certain décalage dans l'ordre des éléments, les séquences d'élution des séries A et B montrent une certaine similarité. Par contre, la position de certains ions dans la séquence de la série C est complètement inversé par rapport aux séries A et B. Cela est particulièrement frappant pour l'ammonium qui apparaît ici au début de la séquence. Le NO₃ apparaît également dans les premiers rangs.

De façon générale, les séquences des séries A et B s'accordent avec le modèle observé par Tsiouris (1986):
SÉRIE A	FONTE	1	Ca	>	SO4	>	Mg	>	H	>	NO3	>	κ	>	сι	>	NH4	>	Na	
	FONTE	2	Ca	>	SO4	>	Mg	>	Н	>	NO3	>	ĸ	>	CL	>	Na	>	NH4	
	FONTE	3	Са	>	SO4	>	Mg	>	H	>	NO3	>	κ	>	CL	>	NH4	>	Na	
	FONTE	4	Ca	>	S04	>	Mg	>	H	>	NO3	>	ĸ	>	CL	>	NH4	>	Na	
SÉRIE B	FONTE	5	S04	>	Mg	>	Ca	>	NO3	>	н	>	K	>	Na	>	CL	>	NH4	
	FONTE	6	Mg	>	Ca	>	S04	>	κ	>	NO3	>	H	>	Na	>	CL	>	NH4	
	FONTE	7	S04	>	Са	>	Mg	>	K	>	H	>	NO3	>	Na	>	CL	>	NH4	
	FONTE	8	S04	` >	Mg	>	Ca	>	K	>	NO3	>	H	>	Na	>	CL	>	NH4	·
SÉRIE C	FONTE	9	NO3	>	κ	>	S04	>	CL	>	Са	>	Mg	>	NH4	>	н	>	Na	
	FONTE 1	0	NO3	>	NH4	>	ĸ	>	S04	>	CL	>	Ca	>	Na	>	Mg	>	H	
	FONTE 1	1	NH4	>	NO3	>	S04	>	κ	>	CL	>	Ca	>	Na	>	Mg	>	H	
	FONTE 1	12	NO3	>	NH4	>	к	>	S04	>	Cl	>	Ca	>	Mg	>	H	>	Na	
SÉRIE A			Ca	>	SO4	>	Mg	>	Н	>	NO3	>	К	>	Cl	>	NH4	>	Na	
SÉRIE B			S04	>	Mg	>	Ca	>	К	>	NO3	>	н	>	Na	>	Cl	>	NH4	
SÉRIE C			NO3	>	NH4	>	к	>	S04	>	Cl	>	Ca	>	Mg	>	Н	>	Na	

TABLEAU 13: Séquences d'élution préférentielle observées au cours des premiers 3 jours de fontes.

$Ca > Mg > SO_4 > NO_3 > Na > C1$

Cependant, comme le montre la série C, la position de certains ions peut varier considérablement. L'état physique de la neige (structure, âge, homogénéité) peut expliquer les différences dans l'ordre des éléments d'une séquence, les ions solubles étant plus ou moins liés à la stucture des grains (Tsiouris 1986) Les conditions de la fonte et la structure de la neige sont des facteurs importants pouvant affecter l'ordre de la séquence (Tsiouris 1986). La matière organique semble également influencer dans une certaine mesure la ségrégation différentielle des ions solubles.

Application du modèle SNOQUAL

La variante SNOQUALR du modèle SNOQUAL a été utilisée avec nos données. Les paramètres du modèle sont: la concentration des ions dans la neige, la hauteur du couvert de neige (ou l'équivalent eau de la neige) et le coefficient de lessivage K. Il s'agit d'introduire dans le modèle la concentration ionique et la hauteur de la neige avant la fonte et la hauteur de neige à la fin d'un moment donné de la fonte.

Les figures 13, 14 et 15 présentent les résultats obtenus. Les deux courbes de chaque graphique représentent les valeurs générées par le modèle et celles obtenues à partir des fontes simulées. Dans tous les cas les données du modèle coincident avec les valeurs mesurées au cours des fontes.



(fontes série A) (moy. des fontes 1 à 4)









3.1.4 ABSORPTION DU TRACEUR ISOTOPIQUE ¹⁵N SUR LA MATIERE ORGANIQUE.

A la section 2.2 de cette étude, nous avons décrit la méthode relative à l'utilisation du traceur isotopique stable sous forme de $K^{15}NO_3$. L'objectif poursuivi par cette expérimentation était de connaître le destin du nitrate à l'intérieur de la neige au cours de la fonte et de vérifier l'hypothèse de base de notre étude à l'effet qu'une partie de l'azote inorganique est retenue dans la neige probablement par des micro-organismes qui utilisent cet azote comme élément nutritif.

Suivant la méthode décrite, la matière organique des fontes 10, 11 et 12 de la série C a été prélevée dans les lysimètres après la fonte. En moyenne, pour l'ensemble des trois colonnes 92% de la matière organique ajoutée à la neige avant les fontes a été récupérée une fois celles-ci terminées. Les échantillons de matière organique une fois séchés à l'étuve et broyés ont été analysés par spectrométrie de masse. Les résultats de la mesure de ¹⁵N pour chacun des échantillons sont présentés au tableau suivant:

ÉCHANTILLON	1	(contrôle	e)		0.0054
ÉCHANTILLON	2	(enrichi	de 2.13 mg	15N)	0,0122
ÉCHANTILLON	3	(. Эн)	0.0114
ÉCHANTILLON	4	(H)	0.0107

TABLEAU 14: Excès isotopique des échantillons de matière organique prélevés après la fonte (atom%)

La matière organique de l'échantillon no.1 (contrôle) n'a pas été enrichie avec le traceur. La valeur de 0,0054 constitue donc un bruit de fond correspondant à ce qui est mesuré naturellement.

A partir de ces résultats, il est possible d'estimer la quantité d'azote marquée retenue par la matière organique dans le système à partir des calculs suivants:

(a) la concentration de ^{15}N est donné par:

$$\% \frac{15_{\rm N}}{15_{\rm N} + 14_{\rm N}}$$

$$= (\underline{14N * 0,366\%}) + (\underline{15N * 99\%})$$
4,26

où ¹⁴N = quantité d'azote inorganique totale contenu dans chaque colonne (NH₄ + NO₃)

15N = quantité de 15N ajoutée à 99 atom% équivalente à la quantité de 14N mesurée (2,13 mg)

0,366% = abondance naturelle de 15N.

$$(2,13 * 0,366\%) + (2,13 * 99\%) = 49,683\%$$

4,26

on obtient:

La quantité de 15_N en excès est donc obtenue en soustrayant l'abondance naturelle de l'isotope:

$$49,683\% - 0,366\% = 49,317\%$$

 (b) dans le cas de l'échantillon 2, le pourcentage de ¹⁵N retenu dans le système peut être calculé selon:

$$15_{\rm N}$$
 * 100 = 0,0247%

où l'excès isotopique de ^{15}N de l'échantillon 2 = 0,0122 (voir tab.13)

(c) la quantité totale de 15 N de la matière organique provenant du traceur peut se calculer en connaissant 1) la quantité de matière organique en poids ajoutée à chaque colonne et 2) le contenu en azote total de cette matière organique (1,12% ou 22,1 mg). Ainsi, dans le cas de l'échantillon 2, la quantité de 15 N provenant du traceur et retenue par la matière organique équivaut à:

$$22,1 \text{ mg } * 0,0247\% = 0,00546 \text{ mg} ^{15}\text{N}$$

100

(d) la quantité de ^{15}N absorbée pour l'échantillon 2 est:

$0,00546 \times 100 = 0,128\%$

4,26

Les mêmes calculs ont été effectués pour les échantillons de matière organique provenant des colonnes 3 et 4. Les résultats sont présentés au tableau 15.

	EXCES ISOTOPIQUE	<u>15_N ABSORBE SUR M-O(%)</u>
ECHANTILLON 2 (fonte 10)	0,0122	0,128
ECHANTILLON 3 (fonte 11)	0,0114	0,119
ECHANTILLON 4 (fonte 12)	0,0107	0,112

TABLEAU 15: Pourcentage de ¹⁵N absorbé sur la matière organique après la fonte

Les résultats montrent donc que seulement une infime partie du traceur isotopique a été retenue sur la matière organique. Les pertes importantes d'azote (NH₄ et NO₃) observées dans les fontes 10 et 11 de la série C ne se reflètent pas avec le traceur comme nous le pensions au départ. Pourtant, comme nous l'avons montré plus tôt les pertes moyennes en NO₃ et NH₄ observées sur les bilans des quatre fontes de la série C sont respectivement de l'ordre de 8 et 43%.

Si on maintient que l'azote est retenu au cours de la fonte par la matière organique, les résultats obtenus ici peuvent être attribuables à des déficiences du protocole expérimental relatif à l'ajout du traceur. La principale difficulté rencontrée fut de distribuer le sel traceur de façon homogène avec le corps solide que constitue la neige. Cela s'est d'ailleurs traduit par des analyses chimiques sur les eaux de fonte qui ne reflétaient pas les proportions du traceur ajoutées initialement.

Les techniques d'ajout d'un traceur isotopique à la neige mériterait donc d'être perfectionnée pour être applicables.

Il reste néanmoins que les résultats montrent que l'excès isotopique des fontes auxquelles de la matière organique a été ajoutée est supérieur d'un facteur 2 au contrôle même si la quantité de matériel absorbé est faible.

La matière organique à l'intérieur de la neige semble donc posséder une certaine préhension pour l'azote. Cela signifierait donc qu'une certaine activité biologique existe dans la neige et qu'elle peut affecter le flux des éléments nutritifs. En somme, les résultats que nous avons obtenus dans le cadre des simulations de fonte, nous permettent de faire certaines constatations qui concernent directement notre problématique de recherche:

- les composés azotés mesurés initialement dans la neige semblent se conserver au cours de la fonte si la neige ne contient pas de matière organique;
- les équilibres chimiques et le flux des éléments nutritifs semblent affectés au cours de la fonte lorsque la neige contient une certaine quantité de matière organique.

Elles tendent à valider notre hypothèse de départ voulant que des facteurs d'ordre biologique puissent avoir une influence sur la dynamique des substances nutritives présentes dans la neige lorsque que celles-ci contiennent une certaine quantité de matière organique. Nous devons toutefois formuler quelques réserves. Même si les fontes expérimentales avec les neiges contenant de la matière organique semblent davantage retenir les éléments nutritifs tel l'azote qu'une neige qui en est dépourvue, les mécanismes d'assimilation biologique qui prévalent à l'intérieur de la neige n'ont jamais fait l'objet d'analyses approfondies et il faut garder en mémoire la possibilité que des facteurs abiotiques puissent également jouer un rôle et affecter le flux des différentes formes ioniques.

3.2 CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN

3.2.1 Les algues nivéales

Ces considérations nous ont donc amenés à effectuer des recherches sur le terrain dans le but de mieux comprendre les relations pouvant exister entre l'activité biologique et la composition chimique de la neige.

Comme nous l'avons signalé au chapitre 1, la présence de micro-organismes nivéaux est connue depuis longtemps. Hoham (1987) a indiqué que des champignons tels Chionaster nivalis, Phacidium infestans ainsi que des protozoaires et des rotifères colonisent les écosystèmes nivéaux.

Plusieurs études ont clairement démontrées l'affinité de certaines algues pour les milieux froids qui se retrouvent uniquement dans la neige ou la glace. Visser (1971) a aussi mis en évidence que plusieurs organismes tels les bactéries, les champignons et les algues peuvent croître dans la neige.

La plupart des algues retrouvées en milieu nivéal sont des algues vertes unicellulaires du genre des chlamydomonacées et des chlorophytes (Hoham 1980).

Les cycles vitaux des algues nivéales, tels que décrits par Hoham (1975, 1980 et 1987) permettent de bien mettre en évidence les relations écologiques avec le milieu. Le cycle vital type est initié au moment de la

fonte printanière lorsque la température de l'air demeure au dessus du point de congélation pour plusieurs jours consécutifs permettant ainsi à la neige de fondre. La lumière qui pénètre à l'intérieur de la neige provoque la germination des spores d'algues en dormance à l'interface neige-sol. Les zoospores migrent alors à travers l'eau du congère grâce à leurs flagelles vers la surface du couvert de neige où la lumière ainsi que la disponibilité en éléments nutritifs sont grandes. La phase sexuée se produit alors et elle est généralement marquée par une consommation accrue des éléments nutritifs dissous dans l'eau de fonte (Hoham 1987). A la fin du processus, les spores nouvellement formées retournent au sol et entrent en période de dormance jusqu'à la saison suivante.

Le cycle vital des algues nivéales qui, dans la plupart des cas ne dure pas plus d'une semaine, revêt dans le cas qui nous occupe une grande importance dans l'évolution de la chimie du couvert de neige au printemps. La phase sexuée affecte directement les éléments nutritifs de la neige et peut ainsi expliquer les pertes d'azote fréquemment observées en milieu naturel et en laboratoire au cours de la fonte.

Bien que les cycles vitaux et l'écologie des algues soient bien connus, rares sont les travaux qui se sont interressés à l'influence des microorganismes notamment les algues sur la chimie de la neige in situ. Au cours de l'année 88, dans le cadre de recherches complémentaires à nos expériences en laboratoire, nous avons cherché d'une part à identifier des algues en milieu forestier et d'autre part, à analyser la chimie de la neige contenant des algues.

La première campagne d'échantillonnage, effectuée au printemps 88 à la forêt Montmorency dans la réserve faunique des Laurentides au nord de Québec, a permis d'identifier dans la neige sous couvert forestier coniférien des algues en quantité suffisante pour donner à la neige une coloration verdâtre. Les cellules dénombrées par millilitre d'eau de fonte dépassaient 200,000.

La présence de populations d'algues nivéales est signalée pour la première fois dans l'est du Canada. L'espèce d'algue présente dans la neige au Québec appartient au genre Chloromonas et l'espèce s'apparente à <u>Chloromonas</u> <u>polyptera comb. nov.</u> déjà connue dans l'ouest de l'Amérique du nord (Hoham et al. 1989).

Nous avons effectué des analyses chimiques sur des échantilllons de neige contenant des algues et comparé ceux-ci avec d'autres échantillons prélevés sur des emplacements contigus aux premiers mais ne contenant pas d'algue ou encore en quantité négligeable. Les résultats sont présentés au tableau 16.

Dans le cas des échantillons de neige contenant des algues (échantillons A, B, E, F, G) les pH sont plus basiques et la conductivité plus basse. Les concentrations moyennes de NO_3 et de NH_4 dans les échantillons de neige ne contenant pas d'algue sont généralement plus élevées que dans le cas des échantillons d'une même neige contenant des algues. Les concentrations de nitrate des échantillons de neige sans algues prélevés le 17 mai excèdent de trois fois celles des neiges avec algues de la même période. L'ion ammonium

DESCRIPTION	NO. ÉCH.	DATE	COND. (umhos/cm)	рH	Cl mg/l	NO3 mg/l	P04 mg/l	SO4 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg∕l	Na mg/l	NH4 mg/l
NEIGE AVEC	Α	88-05-09	2,70	5,16	,21	0	0	,33	,032	,030	,063	,073	,010
ALGUE	В	88-05-09	3,30	5,07	,27	0	0	,35	,043	,028	,105	,107	,010
	E	88-05-17	2,60	5,16	,13	0	0	,22	,032	,011	,067	,058	,017
	F	88-05-17	5,20	4,85	,22	,33	0	,28	,054	,018	,075	,090	,040
	G	88-05-17	4,50	4,85	,13	,37	0	,25	,016	,007	,015	,047	,047
NEIGE SANS	C	88-05-09	9 70	4 67	20	1 23	0	76	090	030	025	084	04
AL GUES	D D	88-05-09	9.05	4 72	20	1,10	0 0	074	.110	.032	.030	.081	.065
ALGOLO	н	88-05-17	9	4.48	.29	.92	0	.52	.079	.020	.079	.136	.21
	I	88-05-17	7	4,48	,187	,65	0	.39	.044	.012	.028	,064	,12
	-	00 05 47	-	1.10				07	004	007	004	000	00

TABLEAU 16: Analyse comparée des caractéristiques physico-chimiques de neiges avec et sans algues (Forêt boréale, Lac Laflamme, Québec).

est près de six fois plus abondant dans les échantillons de neige sans algue du 9 mai (C et D). L'ammonium est toutefois plus abondant dans les neiges avec algues (E, F, G) que dans ceux sans algue (H, I, J) prélevés la même journée.

Il faut noter également dans le cas des échantillons de neige avec algues A et B du 9 mai, l'absence de nitrate et les faibles concentrations d'ammonium. D'autre part, parmi les échantillons E, F et G du 17 mai, deux d'entre eux contiennent des concentrations significatives de nitrate. Hoham et al. (1989) expliquent que cela est attribuable à un changement de phase dans le cycle vital de l'espèce. Entre ces deux périodes, l'algue Chloromonas serait passée de la phase végétative nécessitant une grande utilisation de NO₃ à une phase post-sexuée où les cellules dormantes nécessitent peu de NO₃ pour leur croissance.

Il faut souligner que l'ion sulfate se comporte un peu de la même façon que les formes azotées, celui-ci se retrouvant à des concentrations plus faibles dans les neiges avec algues. A l'inverse, le potassium est plus abondant dans les neiges sans algue.

En plus de l'algue du genre <u>Chloromonas</u> nettement dominante dans nos échantillons, d'autres genres ont également été identifiés dont <u>Notosolenus</u> et <u>Trebouxia</u> qui est une algue associée aux lichens.

Outre les algues, les observations au microscope ont permis d'identifier le champignon de neige <u>Chionaster nivalis (Bohl.) Wille</u>. Les interactions de

ce champignon avec le milieu est peu connu (Hoham et al. 1989). Toutefois il tire probablement les éléments nutritifs dont il a besoin des algues, des bactéries et des particules solubles de la matière organique (Hoham et al. 1989).

Le même type d'expérimentation a été effectué à Whiteface Mountain dans l'état de New-York en milieu subalpin par Hoham et al. (non publié). Les algues <u>Chloromonas</u> et <u>Notosolenus</u> y ont également été identifiées. Les résultats obtenus (tableau 17) concordent avec ceux obtenus au Québec sauf en ce qui a trait au potassium dont les concentrations sont plus faibles dans le cas des neiges avec algues.

Au cours des campagnes d'échantillonnage dans les Alpes françaises, nous y avons recueillies des échantillons de neige contenant des quantités importantes de l'algue rouge <u>Chlamydomonas nivalis</u>. Les espèces d'algues <u>Raphidonema nivale Lagerh.</u>, <u>Scotiela sp.</u> ont été fréquemment observées ainsi que le champignon <u>Chionaster nivalis (Bohl.</u>) Wille.

Malheureusement, les analyses chimiques n'ont toutefois pas donné les résultats attendus, les névés ayant été presque complètement lessivés par les pluies estivales.

Les cellules de <u>Chlamydomonas nivalis</u> étaient représentées surtout par des spores de résistance (restings spores) apparaissant habituellement à la fin du cycle vital de l'algue. Ces spores sont à toutes fins pratiques inertes et ont peu d'influence sur la chimie de la neige.

NO. ÉCH.	COND. (umhos/ci	pH m)	Cl mg/l	NO3 mg/l	PO4 mg/l	SO4 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg∕l	Na mg/l	NH4 mg/l	
В	13,10	5,87	,22	,33	0	,567	,106	,028	1,590	,726	, 157	-
G	7,10	5,73	,33	,62	0	,394	, 192	,039	,918	,372	.064	
LT	9,60	5,17	,79	,50	0	,427	,128	,042	1,161	,421	,021	
	9,93	5,59	,45	,48	0	,46	, 14	,04	1,22	,51	,09	
В	19,50	5,63	,18	,33	0	,79	,360	,057	3,026	,383	,120	
G	10,10	6,03	,15	,76	0	,28	,210	,002	1,283	,106	,180	
LT	16,90	4,98	, 15	,67	0	,61	,130	,035	2,491	,310	,040	
	15,50	5,55	,16	,59	0	,56	,23	,03	2,27	,27	,11	
						φ.						
	NO. ÉCH. B G LT B G LT	NO. ÉCH. COND. (umhos/c B 13,10 G 7,10 LT 9,60 9,93 B 19,50 G 10,10 LT 16,90 15,50	NO. ÉCH. COND. (umhos/cm) pH B 13,10 5,87 G 7,10 5,73 LT 9,60 5,17 9,93 5,59 B 19,50 5,63 G 10,10 6,03 LT 16,90 4,98 15,50 5,55	NO. ÉCH. COND. (umhos/cm) pH Cl mg/l B 13,10 5,87 ,22 G 7,10 5,73 ,33 LT 9,60 5,17 ,79 9,93 5,59 ,45 B 19,50 5,63 ,18 G 10,10 6,03 ,15 LT 16,90 4,98 ,15 15,50 5,55 ,16	NO. ÉCH. COND. (umhos/cm) pH mg/l Cl mg/l NO3 mg/l B 13,10 5,87 ,22 ,33 ,62 G 7,10 5,73 ,33 ,62 ,50 LT 9,60 5,17 ,79 ,50 9,93 5,59 ,45 ,48 B 19,50 5,63 ,18 ,33 G 10,10 6,03 ,15 ,76 LT 16,90 4,98 ,15 ,67 15,50 5,55 ,16 ,59	NO. ÉCH. COND. (umhos/cm) pH Cl mg/l NO3 mg/l PO4 mg/l B 13,10 5,87 ,22 ,33 0 G 7,10 5,73 ,33 ,62 0 LT 9,60 5,17 ,79 ,50 0 9,93 5,59 ,45 ,48 0 B 19,50 5,63 ,18 ,33 0 G 10,10 6,03 ,15 ,76 0 LT 16,90 4,98 ,15 ,67 0 15,50 5,55 ,16 ,59 0	NO. ÉCH. COND. (umhos/cm) pH Cl mg/l NO3 mg/l PO4 mg/l SO4 mg/l B 13,10 5,87 ,22 ,33 0 ,567 G 7,10 5,73 ,33 ,62 0 ,394 LT 9,60 5,17 ,79 ,50 0 ,427 9,93 5,59 ,45 ,48 0 ,46 B 19,50 5,63 ,18 ,33 0 ,79 G 10,10 6,03 ,15 ,76 0 ,28 LT 16,90 4,98 ,15 ,67 0 ,56	NO. ÉCH.COND. (umhos/cm)pHCl mg/lNO3 mg/lPO4 mg/lSO4 mg/lCa mg/lB13,105,87 7,10,22 5,73 7,33 7,10,33 62 7,100 7,427,106 7,102 7,192 7,102LT9,605,17 7,17 7,79 7,79 9,50,00 0 7,427,128 7,128B19,50 10,105,63 6,03 6,03 LT,18 7,76 10,10,333 62 6,03 6,15,18 7,76 7,76 0 7,28 7,22 7,20B19,50 10,10 6,03 11,15 6,75,16 6,79,79 0 7,56,360 7,28 7,210 7,210B19,50 15,505,55 5,55,16 7,59,59 0,56 7,23	NO. ÉCH.COND. (umhos/cm)pHCl mg/lNO3 mg/lPO4 mg/lSO4 mg/lCa mg/lMg mg/lB13,105,87 7,10,22 5,73 7,33 9,60,33 5,170 7,97 7,50,567 0 0 427,106 192 7,00 7,92 7,128 7,128 7,128 7,042,028 7,039 7,039 7,042B19,505,63 7,10 7,10,79 7,79 7,50,460 0,460 7,14,04B19,50 10,10 6,03 LT5,63 7,15 7,66,18 7,67 0 7,61,79 7,28 7,210 7,210 7,350 7,350 7,350 7,350,057 7,360 7,02 7,360 7,360 7,350 7,350 7,350,057 7,360 7,360 7,351 7,350	NO. ÉCH.COND. (jumhos/cm)pHCl mg/lNO3 mg/lPO4 mg/lSO4 mg/lCa mg/lMg mg/lK mg/lB13,105,87 7,10,22 5,73 3,33 4,33 4,42,33 6,220 0 4,427,106 4,192 4,192 4,192 4,192 4,192 4,128,028 4,929 4,1511,590 4,918 4,161B13,10 7,10 5,73 5,73 4,515,67 7,79 4,50,00 4,62,106 4,27 4,128 4,128,028 4,0421,590 4,161B19,50 6,005,63 5,59 4,45,48 4,480,46 4,46,14 4,04,04 4,22B19,50 10,10 6,03 4,15,15 4,67,79 0 4,61,360 4,130 4,022,057 4,23 4,033,026 2,2491B19,50 10,10 4,98 4,15,16 4,67,79 0 4,61,360 4,130 4,33 4,33,07 4,28 4,210 4,130 4,335,03 2,271	NO. ÉCH. COND. pH Cl NO3 PO4 SO4 Ca Mg K Na B 13,10 5,87 ,22 ,33 0 ,567 ,106 ,028 1,590 ,726 G 7,10 5,73 ,33 ,62 0 ,394 ,192 ,039 ,918 ,372 LT 9,60 5,17 ,79 ,50 0 ,427 ,128 ,042 1,161 ,421 9,93 5,59 ,45 ,48 0 ,46 ,14 ,04 1,22 ,51 B 19,50 5,63 ,18 ,333 0 ,79 ,360 ,057 3,026 ,383 G 10,10 6,03 ,15 ,76 0 ,28 ,210 ,002 1,283 ,106 LT 16,90 4,98 ,15 ,67 0 ,61 ,130 ,035 2,491 ,310 15,50	NO. ÉCH. COND. (umhos/cm) pH Cl mg/l NO3 mg/l PO4 mg/l SO4 mg/l Ca mg/l Mg mg/l K mg/l Na mg/l NH4 mg/l B 13,10 5,87 ,22 ,33 0 ,567 ,106 ,028 1,590 ,726 ,157 G 7,10 5,73 ,33 ,62 0 ,394 ,192 ,039 ,918 ,372 .064 LT 9,60 5,17 ,79 ,50 0 ,427 ,128 ,042 1,161 ,421 ,021 9,93 5,59 ,45 ,48 0 ,466 ,14 ,04 1,22 ,51 ,09 B 19,50 5,63 ,18 ,33 0 ,79 ,360 ,057 3,026 ,383 ,120 G 10,10 6,03 ,15 ,76 0 ,28 ,210 ,002 1,283 ,106 ,180 LT 16,90 4,98 <t< td=""></t<>

TABLEAU 17: Analyse comparée des caractéristiques physico-chimiques de neiges avec et sans algues (Milieu subalpin, Whiteface Mountain, New-York)

Les travaux de Czygan (1970) sur <u>Chloromonas nivalis</u> ont montré les relations de l'algue avec le milieu. Ainsi, l'auteur indique que la biosynthèse des pigments accessoires caroténoides qui donnent la coloration rougeâtre aux algues résulte d'une déficience en azote de la neige, comme quoi l'azote peut dans certains cas être un facteur limitant important.

Il semble selon les travaux de Fukushima (1963) que les algues rouges s'accomodent davantage des milieux directement exposés au soleil contrairement aux algues vertes qui se retrouvent principalement dans les milieux ombragés

Il ressort donc que les formes d'azote inorganique telles NH_4 et NO_3 sont vraisemblablement utilisées au cours de la photosynthèse dans les périodes de croissance des algues dans la neige. En ce qui a trait aux différences de pH fréquemment observées entre les échantillons de neige ne contenant pas d'algue et ceux contenant des algues, elles peuvent s'expliquer par l'effet des organismes autotrophes sur l'acidité des eaux naturelles.

A cet égard Stumm et Morgan (1981) indiquent que la consommation de CO_2 au cours de la photosynthèse couplée à l'assimilation de NO_3 affecte à la hausse le pH des eaux naturelles.

La réaction chimique (équation suivante) de la photosynthèse provoque à elle seule une augmentation de l'alcalinité.

 $106C0_{2}+16N0_{3}+HP0_{4}+122H_{2}0+18H_{+} == [C_{106}+H_{263}+0_{110}+N_{16}+P] + 1070_{2}+14H^{+}$

Hoham et al. (1989) ont d'ailleurs observé dans la neige des valeurs de pH plus élevées lorsque le CO_2 est utilisé pendant la photosynthèse des algues nivéales.

3.2.2 LES MECANISMES BIOLOLOGIQUES DE L'ASSIMILATION DE L'AZOTE

La neige, comme nous l'avons soulevé précédemment, apparaît au même titre que l'eau, l'air ou le sol comme un substrat capable de supporter une activité biologique. C'est dire qu'elle offre une combinaison de conditions écologiques favorables à la croissance de certains organismes.

La neige considéré comme écosystème procure aux organismes l'eau, des gaz atmosphériques dissous, une variété de substances organiques et inorganiques et divers types de radiation incluant la lumière visible, les ultraviolets et les rayons ionisants (Pollock 1970). Les éléments nutritifs majeurs tels N, P, C et H agissant sur la productivié des eaux douces et qui sont également des constituants majeurs du protoplasme cellulaire se retrouvent aussi à l'intérieur de la neige.

Théoriquement donc, on peut effectuer une analogie entre le milieu aquatique et la neige, cette dernière présentant toutes les conditions permettant la croissance des micro-organismes. Dans cette optique, il est probable que les processus de l'assimilation biologique de l'azote propre aux milieux

aquatiques se retrouvent également dans la neige. D'ailleurs Jones et Deblois (1987) soulignaient que les quantités d'azote inorganique assimilées biologiquement _au cours de la fonte printanière se comparent à celles utilisées par les organismes autotrophes dans les sytèmes aquatiques oligotrophes.

Toujours en milieu aquatique, les formes d'azote inorganique (NH4, NO3) représentent de loin l'apport d'azote le plus important pour les organismes (Allen et Kramer 1976, Brock 1970) et sont également les principales sources d'azote pour les algues (Morris 1974). Syrett (1962) indique que pour la plupart des algues, l'ammonium est utilisé préférentiellement comme source d'azote, les formes oxydées étant quant à elles réduites avant d'être assimilées.

Les concentrations de NH4-N et NO3-N dans les eaux naturelles de surface non polluées varient respectivement de 0 à 5 mg/l et de 0 à 10 mg/l (Wetzel 1975). Les concentrations de ces formes d'azote dans la neige varient également à l'intérieur de ces gammes.

Ces observations sur les relations qui existent entre la chimie de la neige et l'activité biologique des algues nivéales valident les tendances que nous avons observées de façon quantitative dans nos fontes simulées sans toutefois pouvoir déterminer de façon précise les causes à l'origine des pertes d'azote mais il est fort probable que les organismes nivéaux, notamment les algues influencent les concentrations de plusieurs substances notamment les

composés azotés. Le sulfate semble également affecté par l'activité biologique nivéale. Des pertes significatives ressortent dans les fontes simulées en laboratoire avec matière organique (série C). Les concentrations de sulfate sont plus faibles dans les échantillons de neige avec algues que nous avons prélevés sur le terrain. Le comportement du sulfate en relation avec la chimie et la biologie de la neige a été jusqu'à On sait par contre que le sulfate peut être présent très peu étudié. utilisé par plusieurs microorganismes pour synthétiser certains acides aminés et des vitamines contenant du soufre (Brock 1970). Jones et Bédard (1987) ont d'ailleurs signalé que le sulfate dans les eaux de ruissellement peut être absorbé par les micro-organismes. On peut donc formuler l'hypothèse que le SO_A présent dans la neige est utilisé les microorganismes pour remplir certaines fonctions métaboliques.

Dans le cadre des simulations de fontes effectuées dans cette étude, il nous apparaît toutefois peu probable que des algues aient pu influencer d'une quelconque manière le flux des composés azotés parce qu'elles exigent pour se développer des conditions écologiques spécifiques que nous n'avons pas pu reproduire en laboratoire. L'assimilation biologique de l'azote observée dans quelques-unes de nos fontes doit donc, dans le cas où on admet que les perte d'azote sont bien le résultat de processus microbiologiques, être attribuée à d'autres organismes cryophytes tels les bactéries et les champignons associés ou non à la matière organique et aux débris locaux.

3.2.3 LE ROLE DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LA NEIGE

La matière organique joue un rôle important dans la dynamique chimique du couvert neigeux (Jones et Sochanska 1985). Elle procure les éléments nuttritifs de base dont dépendent certains organismes hétérotrophes. Les constituants minéraux représentent entre 1 et 13 % de poids sec de la matière organique (Armson 1977). En milieu forestier, la source de matière organique la plus abondante est la litière composé de débris végétaux.

Jones et Sochanska (1985) ont montré que la composition chimique de la neige est largement tributaire des débris organiques qui s'y trouvent. Ainsi, l'auteur a noté des augmentations importantes des ions Ca, NH_4 , Mg et Na (50 à 287%) qu'il a attribuées au lessivage des débris locaux et à la plasmolyse du matériel cellulaire originant de la matière organique. Une forte production de Al, Mn et K a également été observée et serait causée selon l'auteur par la dégradation biologique de la matière organique. Bien que nous n'ayons pas de données sur Al et et Mn nous constatons dans le cadre de nos expériences les mêmes tendances pour K qui a augmenté en moyenne de 48%, 41% et 125 % (voir tableau 10, 11 et 12) respectivement pour les fontes des Dans ce cas précis , la neige contenant de la matière séries A, B et C. organique (série C) semble constituée une source plus importante de potassium. De la même façon, les ions Na, Ca et Mg ont également augmenté de façon marquée dans le cas des fontes de la série C. La production de ces ions pour les séries A et B avec neige propre est par contre variable et parfois même en deça de zéro. Encore une fois, il semble donc y avoir une

relation directe entre la production de certains ions et la présence de matière organique.

Au cours de travaux effectués sur le terrain et en laboratoire, Jones et Déblois (1987) ont mis en évidence que, le NO_3 et NH_4 disparaissent au cours de la fonte. Les auteurs attribuent ce phénomène à des processus d'assimilation biologique de ces éléments nutritifs. L'assimilation de ces formes d'azote se ferait au moment où le stock de neige contient une grande quantité d'eau riche en solutés.

En comparant un lysimètre en milieu forestier à un autre en milieu ouvert, les auteurs ont également montré que l'assimilation des nutriments par les micro-organismes est plus marquée dans le cas du lysimètre en milieu forestier et contenant par le fait même une plus grande quantité de matière organique.

Les conclusions des travaux effectués par Hoham (1976) démontrent que les substances lessivées de la litière coniférienne contribuent à la composition chimique de la neige et à la croissance d'algues nivéales. La même étude démontre que la neige sous couvert coniférien a des concentrations de PO₄-P supérieures à celle provenant d'un milieu ouvert.

La litière coniférienne présente dans la neige représente une source d'éléments nutritifs pour les algues qui y vivent (Hoham 1976, 1983). Dans les travaux visant à démontrer quels effets les substances provenant des débris végétaux pouvaient avoir sur la croissance et la morphologie des algues nivéales, Hoham (1971) a démontré que l'espèce <u>Chloromonas pichinchae</u> a la capacité d'utiliser les formes inorganiques et organiques d'azote et de phosphore pour leur croissance.

En somme, le résultat des travaux que nous avons effectués dans le cadre de cette étude et les tendances que nous avons observées confirment les conclusions des travaux de Jones et Deblois à l'effet que les composantes de la litière coniférienne agissent directement sur les composés azotés, ce qui expliquerait par conséquent la disparition de l'azote au cours de la fonte. En milieu naturel toutefois, la matière organique n'est pas la seule à mobiliser l'azote. Comme nous l'avons démontré plus tôt, les algues doivent, en milieu naturel, aussi être pris en compte dans le flux des éléments nutritifs. La présence d'algues dans les échantillons de neige utilisés lors de nos simulations de fonte en laboratoire étant à toute fin pratique impossible, les pertes d'azote que nous avons enregistrées doivent être attribuées à la présence de matière organique et à l'activité biologique qui en découle ou encore à des processus d'ordre purement physico-chimique.

4. CONCLUSION

Les expériences menées au cours de cette étude ont permis de mettre en évidence un phénomène déjà observé par Jones et Deblois (1987). En effet, ces auteurs ont remarqué des changements dans la charge ionique d'un couvert neigeux de la forêt boréale. Les mêmes observations ont également été faites lors de fontes simulées en laboratoire.

Les deux premières séries de fonte que nous avons menées avaient justement pour objet de confirmer les tendances observées par Jones et Deblois. Les fontes de la troisième série où l'échantillon de neige utilisé a été enrichi de matière organique a par ailleurs permis de mettre en évidence l'influence que peut avoir cette matière organique sur la composition chimique de la neige.

Nous avons attribué les pertes d'azote inorganique (NO_3 et NH_4) à la présence de micro-organismes qui utiliseraient l'azote comme substances nutritives pour la constitution des acides aminés. Malheureusement, nous n'avons pas pu démontrer ce phénomène en laboratoire et notre interprétation demeure hypothétique.

Cependant, les recherches complémentaires que nous avons conduites sur le terrain nous permettent toutefois d'affirmer que les algues nivéales utilisent effectivement les formes d'azote inorganique. Il resterait par contre à démontrer l'importance réelle de l'assimilation de l'azote par les

algues, à quelle période cela se produit et dans quelle proportion. Aussi, il faudrait investiguer davantage l'effet des autres micro-organismes hérétotrophes (bactéries, champignons, etc.) sur la composition chimique de la neige.

Les relations entre la chimie de la neige et l'activité biologique nivéale est un domaine de recherche relativement nouveau et, bien que notre compréhension s'améliore de jour en jour, beaucoup de travail reste à faire. La poursuite des recherches dans ce domaine est essentielle pour parfaire notre connaissance du fonctionnement des écosystèmes et pour mieux évaluer et comprendre les mécanismes liés à l'acidificaton des écosystèmes.

5. <u>RÉFÉRENCES</u>

ABRAHAM, P.W., TRANTER, M., DAVIES, T.D., BLACKWOOD, I.L., LANDSBERGER, S. (1988) Trace-elements studies in a remote Scottish upland cathment. Water air and soil pollution, no. 37: 255-271.

ADAMS, W.P. (1981) Snow and ice on lakes. Handbook of snow. Pergamon press, Oxford.

ALLEN, H.E., KRAMER, J.R. (1976) Nutrients in natural waters. John Wiley and sons.

ARMSON, K.A. (1977) Forest soils: properties and processes. University of Toronto press. 390 p.

BRIMBLECOMBE, P., TRANTER, M., TSIOURIS, S., DAVIES, T.D., VINCENT, C.E. (1986) The chemical evolution of snow and meltwater. Modelling snowmeltinduced processes, IAHS Publ., vol.155: 283-295.

BROCK, D.T. (1970) Biology of microorganisms. Prentice-Hall, New-Jersey, USA. 737 p.

CADLE, S.H., DASCH, J.M., GROSSNICKLE, N.E. (1983) Northern Michigan snowpack - A study of acid stability and release. Atmospheric environment, vol.18: 807-816.

CADLE, S.H., DASCH, J.M., GROSSNICKLE, N.E. (1984) Retention and release of chemical species by a northern Michigan snowpack. Water air and soil pollution, no. 22: 303-319.

CADLE, S.H., DASCH, J.M., MULAWA, P.A. (1985) Atmospheric concentrations and the deposition velocity to snow of nitric acid, sulfur dioxide and various particulate species. Atmospheric environment, vol.19, no.11: 1819-1827.

CADLE, S.H., DASCH, J.M., KOPPLE, R.V. (1987) Composition and runoff in northern Michigan. Environmental science and technology, vol.21, no.3: 295-299.

COLBECK, S.C. (1981) A simulation of the enrichment of atmospheric pollutants in snow cover runoff. Water resources research, vol.17, no.5: 1383-1388.

COWLING, E.B. (1988) Ecosystems and their response to airborne chemicals: the current situation in North America and Europe. <u>In</u> : Proceedings of Air Pollution and Ecosystems Symposium, Grenoble, 18-22 may 1987. Reidel Publishing Company: 18-38 CRONAN, S.C., REINERS, W.A., REYNOLDS, R.C., LANG, G.E. (1978) Forest floor leaching: contributions from mineral, organic and carbonic acids in New-Hampshire subalpine forests. Science, no.200: 309-311.

CZYGAN, F.C. (1970) Blutregen und blutschnee: stickstoffmangel-zellen von Haematococcus pluvialis und Chlamydomonas nivalis. Arch. of mikrobiol., no. 74: 69-76.

DAVIES, T.D., VINCENT, C.E., BRIMBLECOMBE, P. (1982) Preferential elution of strong acids from a Norwegiam ice cap. Nature, vol.300, november 1982: 161-163.

DAVIES, T.D., BRIMBLECOMBE, P., TRANTER, M., TSIOURIS, S., VINCENT, C.E., ABRAHAMS, P., BLACKWOOD, L.L. (1987) The removal of soluble ions from melting snowpack. <u>In:</u> Seasonal snowcovers: physics, chemistry, hydrology. NATO ASI SERIES, ed. H.G. Jones, W.J. Orville-Thomas. D. Reidel publishing. company. 746 p.

DELMAS, V. (1989) Chimie de la neige et de la fonte printanière au Casset (Alpes du sud). Influences des poussières minérales. Thèse de doctorat. Université de Paris VIII, UFR de chimie. 204 p.

DELMAS, V., JONES, H.G. (1987) Wind as a factor in a direct mesurement of the dry deposition of acid pollutants to snowcovers. <u>In:</u> Seasonal snowcovers: physics, chemistry, hydrology. NATO ASI SERIES, ed. H.G. Jones, W.J. Orville-Thomas. D. Reidel publishing company. 746 p.

DVORAK, A.J., LEWIS, B.G. (1978) Impacts of coal-fired power plants on fish, wildlife and their habitats. FWS/OBS - 78/29, Argonne National Laboratory, Illinois, prepared for fish and Wildlife service, Washington D.C., Office of bilogical service, B.F.E.I., 261 p.

ENGLISH, W.C., JEFFRIES, D.S., FOSTER, N.W., SEMKIN, R.G., HAZLETT, P.W. (1986) A preliminary assessment of the chemical and hydrological interaction of acidic snowmelt water with the terrestial portion of a canadian shield cathment. Water, air and soil pollution, no.31: 27-34.

FOSTER, N.W. NICOLSON, J.A., MORRISON, I.K. (1983) Acid deposition and element cycling in eastern american forest. Paper presented at Acid rain forest resource conference, Québec, june 16.

FUKUSHIMA, H. (1963) Studies on cryophytes in Japan. Journal of Yokohama University. Univ., Serv. C., Nat. Sci. 43: 1-146.

GRIMARD, Y. (1985) Réseau d'échantillonnage des précipitations acides du Québec. Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1984. Direction générale des ressources hydriques, Direction des relevés aquatiques. Sainte-Foy. PA-19, 99p.

HOHAM, R,W. (1971) Laboratory and field study of snow algae of the Pacific Northwest. Ph.D. thesis, University of Washington, Seattle. 207 p.

HOHAM, R.W. (1976) The effect of coniferous litter and different snow meltwaters upon the growth of two species of snow algae in axenic cultures. Artic and Alpine Research, vol.8, no.4: 377-386

HOHAM, R.W., MULLET, J.E. (1977) The life history and ecology of the snow alga Chloromonas nivalis sp. nov. (Chlorophyta, Volvocales). Phycologia. vol 16, no.1: 53-68.

HOHAM, R.W., ROEMER, S.C., MULLET, J.E. (1979) The life history and ecology of the snow alga Chloromonas brevispina comb.nov. (Chlorophyta, Volvocales). Phycologia, vol.18, no.1: 55-70.

HOHAM, R.W. (1980) Unicellular chlorophytes - snow algae. Ed. Cox, E.R. Phytoflagellates. Elsevier North Holland. p. 61-84.

HOHAM, R.W., MULLET, J.E., ROEMER, S.C. (1983) The life history and ecology of the snow alga Chloromonas polyptera comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales). Canadian Journal of Botany, vol.61, no.9: 2416-2429

HOHAM, R.W. (1987) Snow alga from high elevation, temperate latitudes and semi permanent snow: their interaction with their environment. Proceedings of Eastern Snow Conference, 44 annual meeting, Fredericton, june 3 and 4: 73-80.

HOHAM, R.W., YATSKO, C.P., GERMAIN, L., JONES, H.G. (1989) Recent discoveries of snow algae in upstate New-york and Québec province and preliminary reports on related snow chemistry. Proceedings of Eastern Snow Conference, 46 annual meeting, Québec:196-200.

HORNBECK, J.W., LIKENS, G.E. (1974) The ecosystem concept for determining the importance of chemical composition of snow. Reprinted from advanced concepts and techniques in the study of snow and ice resources. National academy of sciences, Washington D.C. p. 140-151.

JEFFRIES, D.S., SNYDER, W.R. (1981) Variations in the chemical composition of the snow pack and associated meltwaters in Central Ontario. Proceedings of Eastern Snow Conference, 38 annual meeting, Syracuse, N.Y, june 4 and 5: 11-22.

JOHANNESSEN, M., HENRIKSEN, A. (1978) Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. Water Resources research, vol.14, no.4: 615-619.

JONES, H.G. (1984) The influence of boreal forest cover on the chemical composition of snowcover. Proceedings of Eastern Snow Conference, 41 annual meeting, Washington D.C., june 7 and 8: 126-137.

JONES, H.G., BÉDARD, Y. (1987) Flux des anions d'acides forts dans les eaux de surface lors de la fonte printanière en milieu nordique. Naturaliste canadien, 114: 283-294.

JONES, H.G., BISSON, M. (1984) Physical and chemical evolution of snowpack on the Canadian shield (Winter 1979-1980). Verh. Internat. Verein. Limnol., no. 22: 1786-1792.

JONES, H.G., SOCHANSKA, W. (1985) The chemical characteristics of snow cover in a northern boreal forest during the spring run-off period. Annals of glaciology, no.7: 167-174.

JONES, H.G., DEBLOIS, C. (1987) Chemical dynamics of N-containing species in a boreal forest snowcover during the spring melt period. Hydrological processes, vol.1: 271-282.

JONES, H.G., STEIN, J., SOCHANSKA, W. (1990) SNOQUAL a model for simulation of meltwater quantity and quality in boreal forest catchments: a study of the model variants for the chemical of snow meltwaters. INRS-eau, rapport scientifique RS 299. Tome II.

KOL, E. (1975) Cryobiological researches in the High Tatra II. Acta Botanica Academia Scientiarum Hungarical, tomus 21(3-4): 279-287.

LAIRD, L.B., TAYLOR, H.E., KENNEDY, V.C. (1986) Snow chemistry of the Cascade Sierra Nevada Mountains. Environmental Science and Technology, vol.20, no.3: 275-290.

LEFEBVRE, Y., COUTURE, P., COUILLARD, D. (1988) An analatycal procedure for the measurment of ATP extracted from activated sludge. Canadian Journal of Microbiology, vol.34: 1275-1279.

LEIVESTAD, H., MUNIZ, I.P. (1976) Fish kill at low pH in a Norwegian river. Nature, no.259: 391-392.

LIKENS, G.E. (1976) Acid precipitation. Chemical and Engineering News, vol.54: 29-44.

MASNIERE, P. (1982) Physico-chimie et impact des précipitations acides: état de la connaissance. Rapport HE/33/82/17, EDF, Direction des études et recherche. 37 p.

McLEAN, R.A.N. (1981) The relative contributions of sulfuric and nitric acids in acid rain to acidification of the ecosystem implication for control strategies. Journal of Air Pollution Control, vol.31: 1184-1187.

MORRIS, I. (1974) Nitrogen assimilation and protein synthesis. <u>In:</u> Algual physiology and biochemistry. Ed. W.D.P. Stewart. University of California Press: 583-609

OLIVER, B.G., THURMAN, E.M., MALCOLM, R.L. (1983) The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters. Geochimica and Cosmachimica Acta, no. 47: 2031-2035

POLLOCK, R. (1970) What colors the mountain snow. Sierra Club Bulletin, vol.55, no.4: 18-20

PROULX, H., JACQUES, G., LAMOTHE, A.M., LITINSKI, J. (1987) Climatologie du Québec méridional. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la météorologie. 198 p.

RASCHER, C.M., DRISCOLL, C.T., PETERS, N.E. (1987) Concentrations and flux of solutes from snow and forest floor during snowmelt in the West Central Adirondack region of New-York. Biogeochemistry, vol.3: 209-224.

SEMKIN, R.G., JEFFRIES, D.S. (1986) Storage and release of major ionic contaminants from the snowpack in the Turkey lakes Watershed. Water, air and soil pollution, no.31: 215-221.

SEMKIN, R.G., JEFFRIES, D.S. (1988) Chemistry of atmospheric deposition, the snowpack and snowmelt in the Turkey Lakes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol.45: 38-46.

SHAPIRO, S.S., WILK, M.B. (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52 (3 and 4): 591-611.

SKARVEIT, A., GJESSING, Y.T. (1979) Chemical budget and chemical quality of snow and runoff during spring snowmelt. Nordic Hydrology: 141-154.

SIROIS, A., VET, R.J. (1988) Detailed analysis of sulfate and nitrate atmospheric deposition estimates at the Turkey Lakes Watershed. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol.45: 14-25.

STOTTLEMEYER, R. (1987) Snowpack ion accumulation and loss in a basin draining to lake Superior. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol. 44: 1812-1819.

STROO, H.F., ALEXANDER, M. (1986) Avalaible nitrogen and nitrogen cycling in forest soils exposed to simulated acid rain. Soil Sc. Soc. Am. Journal, vol. 50.

STUMM, W., MORGAN, J.J. (1981) Aquatic chemistry - An intoduction emphasing chemical equilibria in natural waters. John Wiley and sons, 2nd ed. 780 p.

SUZUKI, K. (1982) Chemical changes of snow cover by melting. Japanese journal of Limnology, vol.43, no.2: 102-112.

SYRETT, P.J. (1962) Nitrogen assimilation. <u>In:</u> Physiology and biochemistry of algae. Ed. R.A. Lewin, Academic press: 171-188.

TRANTER, M., BRIMBLECOMBE, P., DAVIES, T.D., VINCENT, C.E., ABRAHAMS, P.W., BLACKWOOD, I. (1986) The composition of snowfall snowpack and meltwater in the Scottish Highlands - Evidence for preferential elution. Atmosphreic Environment, vol.20, no.3: 517-525.

TRANTER, M., DAVIES, T.D., ABRAHAMS, P.W., BLACKWOOD, I., BRIMBLECOMBE, P., VINCENT, C.E. (1987) Spatial variability in the chemical composition of snowcover in a small, remote, Scottish Cathment. Atmospheric Environment, vol.21, no.4: 853-862.

TSIOURIS, S. (1986) Release of atmospherics pollutants from snowpack with snowmelt and implications for environmental pollution. Ph.d. thesis, University of east Anglia.

VISSER, S.A. (1973) The microflora of a snow depository in the city of Quebec. Environmental Letters, vol.4, no.4: 267-272.

WETZEL, G.R. (1975) Limnology. W.B. Saunders, Philadelphia. 743 P.