

UNIVERSITE DU QUEBEC

Mémoire présenté à

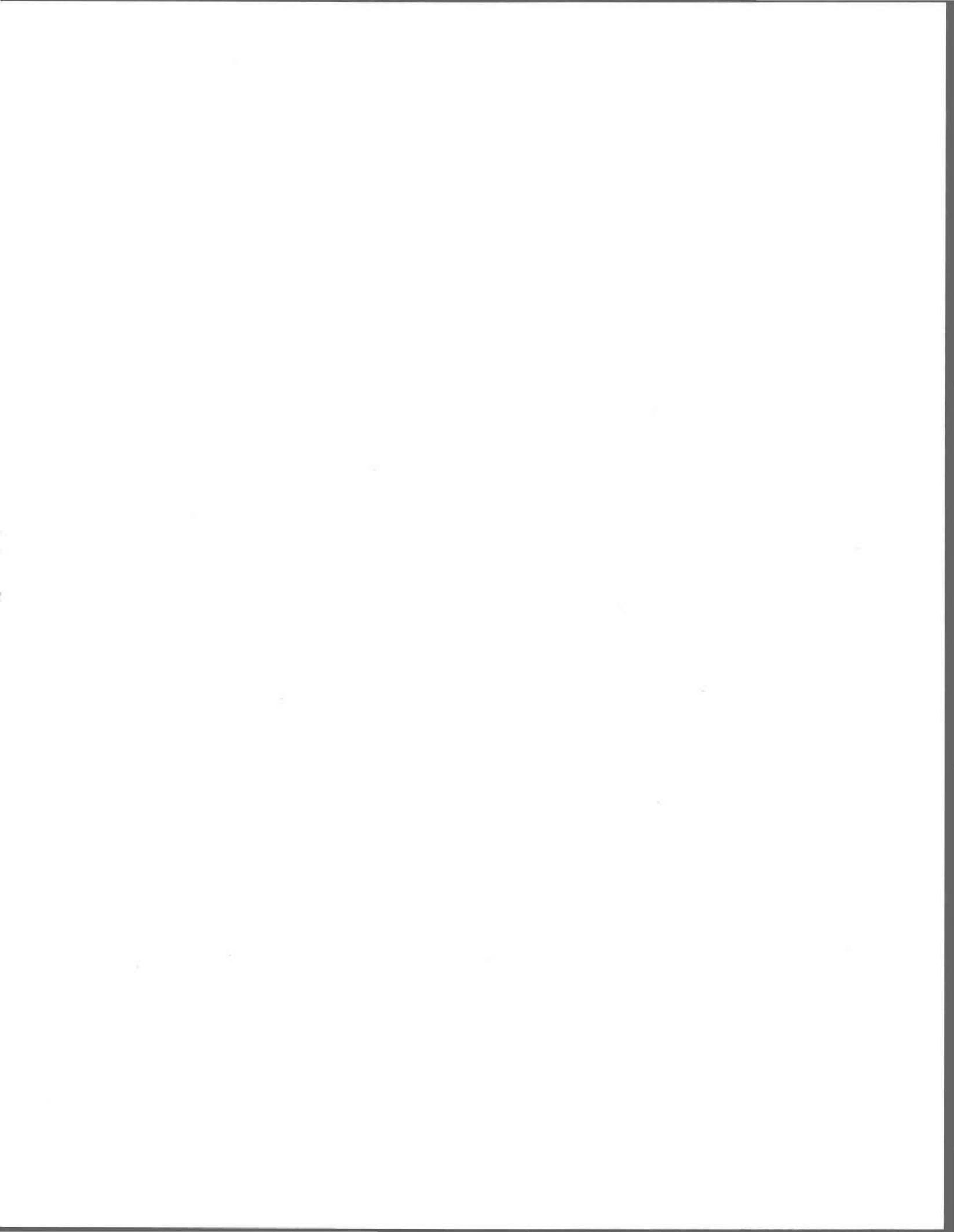
L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

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

**STEVE GAMACHE**

INFLUENCE DES ALGUES NIVALES SUR LA PHYSICO-CHIMIE DE LA  
NEIGE LORS DE LA FONTE PRINTANIERE

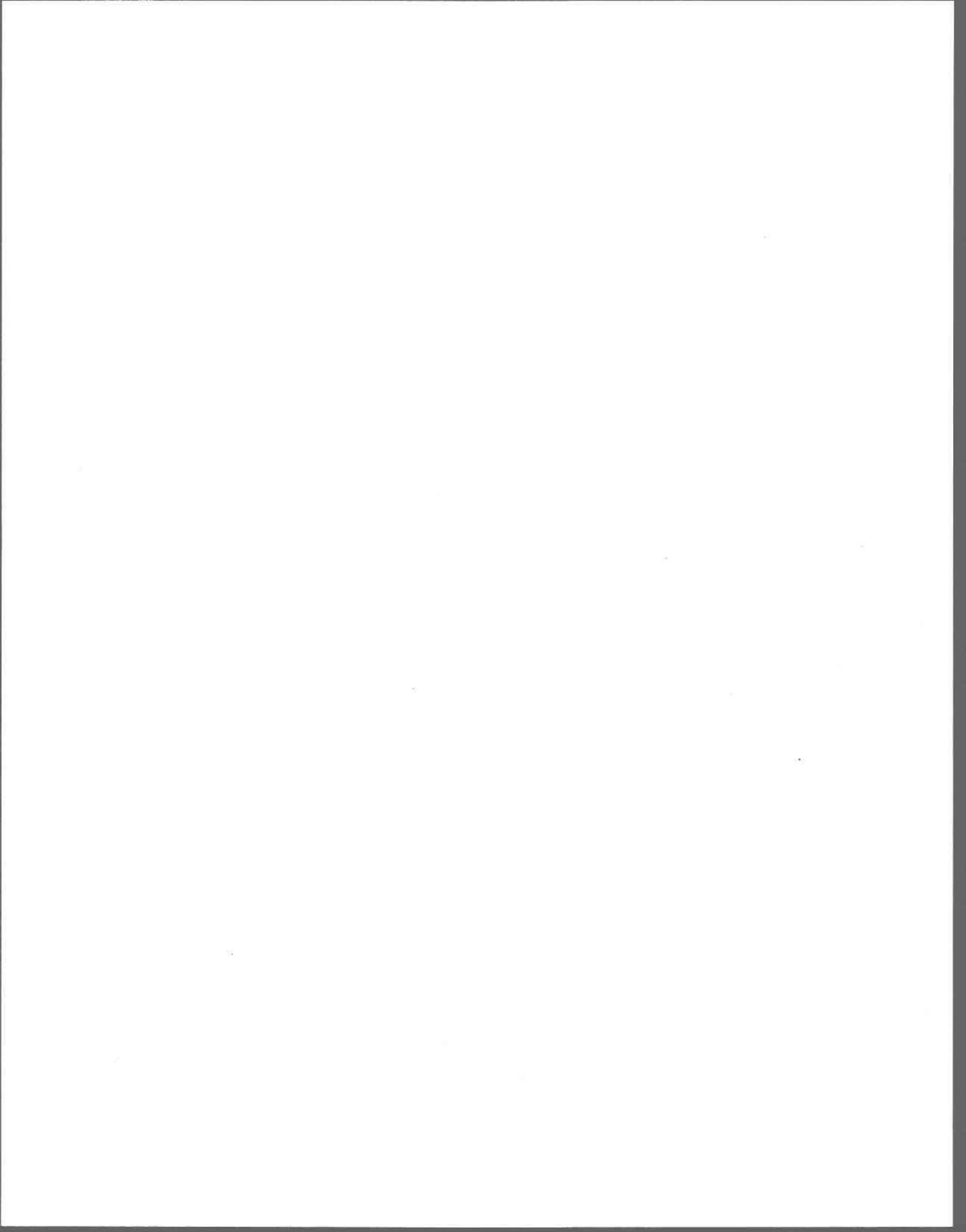
JUIN 1992



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, monsieur Gerald Jones, pour son expertise scientifique, son support matériel et ses encouragements tout au cours de cette étude.

Je tiens également à remercier pour son support technique et ses encouragements tout le personnel du laboratoire de l'INRS-Eau et plus particulièrement mesdames Michelle Bordeleau-Geoffroy et Sylvie St-Pierre ainsi que messieurs Bernard Veilleux, René Rodrique et Bertrand Dubreuil. Des mercis spéciaux à monsieur Claude Laberge pour son aide en statistique et à monsieur Louis Germain pour ses nombreux conseils.



## RESUME

Cette recherche porte sur les interactions existantes entre la physico-chimie de la neige et l'activité microbiologique des algues nivales lors de la fonte printanière. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à comprendre le comportement des composés azotés  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  dans la neige colonisée par des algues nivales.

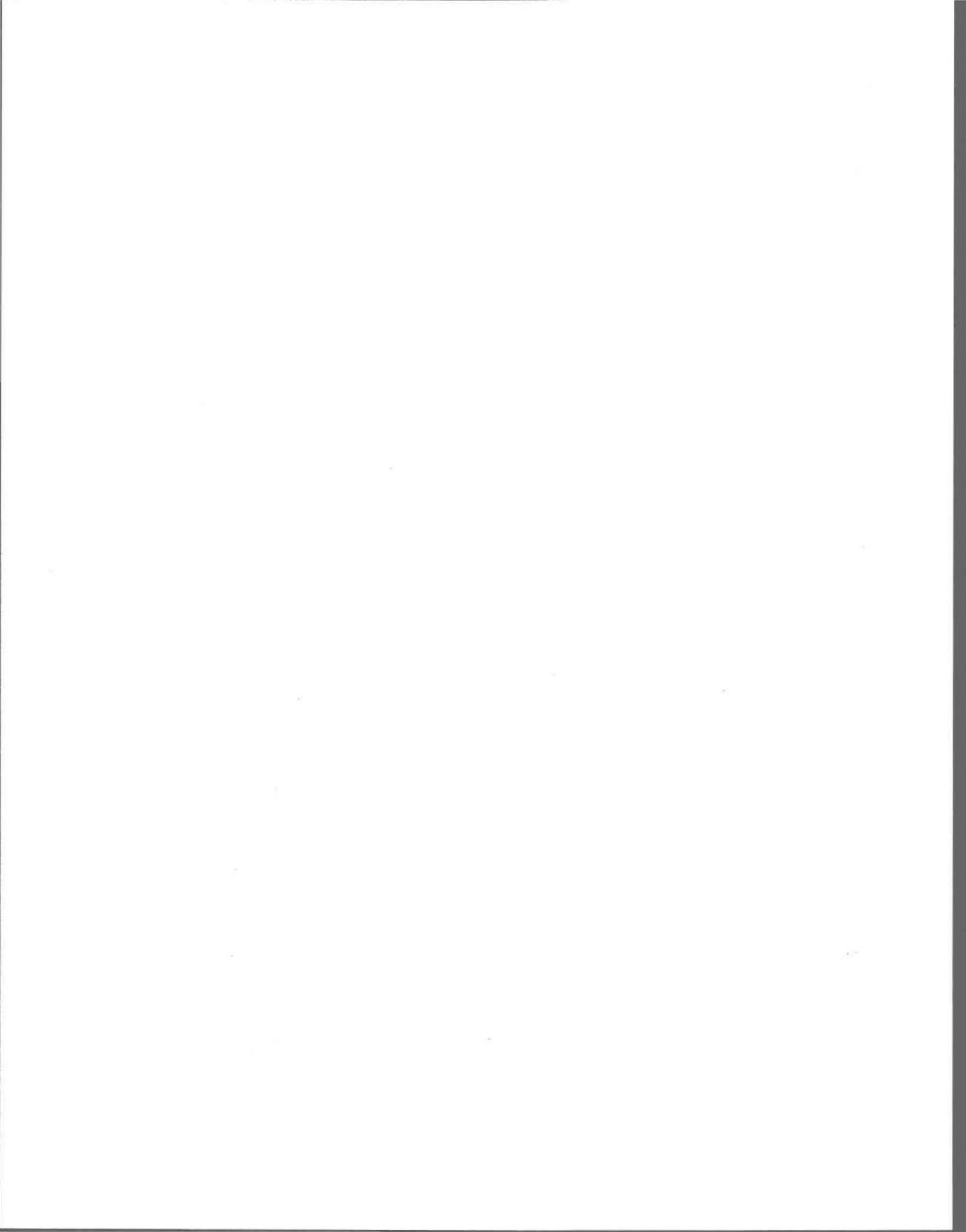
Dans une première démarche, un échantillonnage exhaustif de neige contenant des algues fut réalisé en mai 1989 au lac Laflamme. Les algues retrouvées à cette époque de l'année appartenaient au genre Chloromonas. La neige où fut prélevés les échantillons contenant des algues nivales présentait une coloration verdâtre. Les résultats montrent une diminution d'azote dans la neige colonisée par les algues. Cette mobilisation de l'azote sous forme de  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  est imputable à la présence d'algues nivales qui les utilisent comme éléments nutritifs. Une diminution de sulfate fut aussi observée dans les échantillons de neige contenant des algues nivales.

Dans une seconde démarche, nous avons maintenu une population d'algues nivales provenant de la neige du lac Laflamme en chambre de croissance. Cette population d'algues fut ensuite utilisée pour ensemençer la neige lors d'expériences de laboratoire visant à vérifier la cinétique des composés azotés  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ .

Lors d'une série de fonte dans une colonne de neige contenant uniquement des algues nivales, nous avons observé des pertes de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ces pertes sont attribuables aux algues nivales. Dans deux autres colonnes de neige enrichies de matière organique provenant de la voûte forestière et contenant des algues nivales, des diminutions significatives de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{H}^+$  furent enregistrées ainsi que des augmentations significatives dans la concentration de plusieurs cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). La diminution des composés azotés et des phosphates serait imputable d'une part à la présence d'algues nivales et d'autre part aux micro-organismes associés à la matière organique. Quant à l'augmentation des cations, elle serait attribuable au lessivage de la matière organique par l'eau de fonte.

Dans une dernière démarche, une tentative visant à faire croître un grand nombre de cellules algales afin de visualiser une floraison algale s'est avérée un échec.

Bien que la présence d'algues nivales survient en fin de fonte printanière où la majorité de la charge de polluants acides est passée, nos résultats indiquent que les modèles hydrogéochimiques de fonte devraient prendre en considération l'impact de ces micro-organismes sur la physico-chimie de l'eau de fonte.



## TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
REMERCIEMENTS .....	i
RESUME .....	ii
TABLE DES MATIERES .....	iii
LISTE DES TABLEAUX .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	viii
I. INTRODUCTION .....	1
1. LES ALGUES NIVALES ET L'ECOLOGIE DE LA NEIGE .....	1
1.1 Cycle vital des algues nivales dans la neige .....	3
1.2 Distribution des algues nivales .....	7
1.3 Sources d'éléments nutritifs .....	8
1.4 Autres micro-organismes vivant dans la neige .....	8
2. PHYSICO-CHIMIE DE LA NEIGE.....	9
2.1 Origine des espèces chimiques dans les précipita- tions de neige .....	9
2.2 Processus physiques et chimiques dans le couvert en période froide .....	10
2.3 Processus physiques et chimiques lors de la fonte ..	13
2.4 Les espèces azotées dans le couvert de neige .....	15
3. REPERCUSSIONS ENVIRONNEMENTALES DE LA FONTE PRINTANIERE .	15
II. OBJECTIFS DE L'ETUDE .....	18
III. METHODOLOGIE .....	20
1. DESCRIPTION DU LIEU D'ECHANTILLONNAGE .....	20
2. ECHANTILLONNAGE .....	23
2.1 Choix des sites d'échantillonnage .....	23

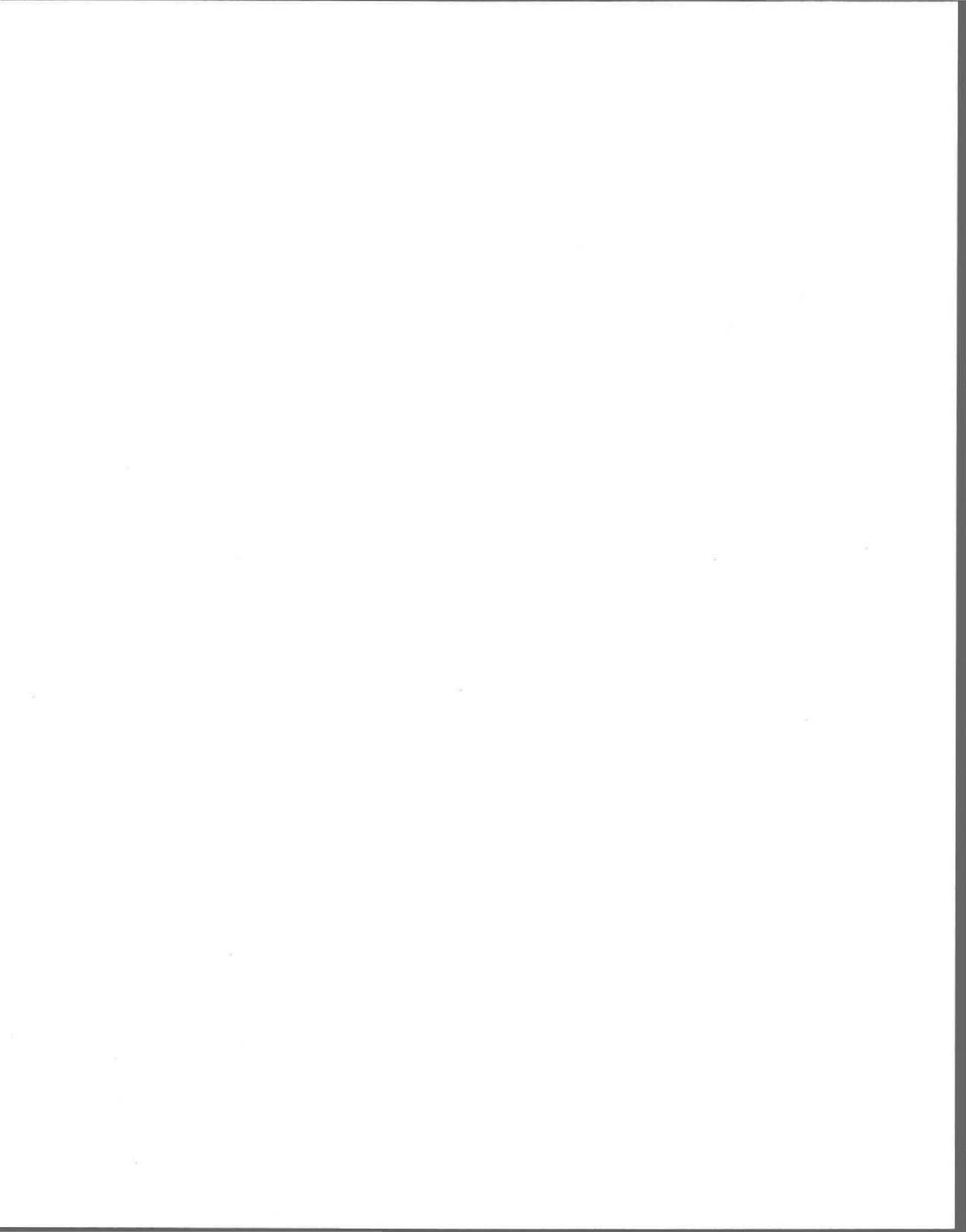
2.2	Identification des sites d'échantillonnage .....	24
2.3	Prélèvement des échantillons témoins .....	24
2.4	Prélèvement des échantillons servant au comptage cellulaire .....	24
2.5	Prélèvement des échantillons destinés aux analyses .	25
2.6	Prélèvement aux fins d'ensemencement .....	25
2.7	Mesures de paramètres physiques .....	26
3.	PREPARATION DES ECHANTILLONS DE TERRAIN POUR ANALYSES ...	26
3.1	Lavage des récipients .....	26
3.2	Réception et préparation des échantillons .....	27
3.3	Préparation des échantillons pour le dosage de la chlorophylle-a .....	27
3.4	Préparation des échantillons pour les mesures de pH et de conductivité .....	28
3.5	Filtration .....	28
3.6	Préparation des échantillons pour le dosage de l'ATP .....	28
3.7	Préparation pour les autres analyses .....	29
3.8	Préparation des échantillons destinés au comptage cellulaire .....	30
4.	ANALYSES .....	30
4.1	Mesure de conductivité .....	30
4.2	Mesure de pH .....	30
4.3	Dosage des anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ ) .....	30
4.4	Dosage des cations majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{K}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ ) ...	31
4.5	Dosage de l'azote ammoniacal .....	32
4.6	Dosage du carbone organique dissous (C.O.D.) .....	32
4.7	Mesure de la concentration de la chlorophylle-a ....	33
4.8	Dosage de l'ATP .....	34

4.9	Dénombrement cellulaire .....	34
5.	ENSEMENCEMENT A PARTIR DES ECHANTILLONS .....	36
6.	EXPERIENCES DE LABORATOIRE .....	36
6.1	Croissance des algues nivales en simulateur de fonte	37
6.2	Croissance des algues nivales dans une colonne de neige .....	40
IV.	RESULTATS ET DISCUSSION .....	44
1.	RESULTATS DE TERRAIN .....	44
1.1	Conditions environnementales .....	44
1.2	Paramètres physico-chimiques et biologique du couvert .....	52
	Densité cellulaire .....	55
	Chlorophylle-a et ATP .....	57
	pH .....	58
	Conductivité .....	63
	Composés azotés $\text{NO}_3^-$ et $\text{NH}_4^+$ .....	64
	Anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ ) .....	74
	Cations ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ ) .....	78
2.	RESULTATS DE LABORATOIRE .....	84
1.	MAINTIENT DES ALGUES NIVALES DANS LE MILIEU M-1 .....	84
2.	CROISSANCE DES ALGUES NIVALES EN SIMULATEUR DE FONTE .	86
	Caractéristiques physico-chimiques de la neige avant la fonte .....	86
	Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fonte .	88
3.	CROISSANCE DANS UNE COLONNE DE NEIGE .....	102
V.	CONCLUSION .....	103
VI.	BIBLIOGRAPHIE .....	X

VII. ANNEXES.....	xx
ANNEXE 1: Préparation du milieu de culture M-1 .....	xx
ANNEXE 2: Caractéristiques physiques et micro-biologiques moyennes du couvert de neige au lac Laflamme où furent prélevés des échantillons de neiges contenant des algues nivales .....	xxii
ANNEXE 3: Analyse physico-chimiques et biologiques de l'eau de fonte des échantillons de neige avec et sans algues recueillis au lac Laflamme en mai 1989 .....	xxv
ANNEXE 4: Moyennes des différents paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés à chaque jour d'échantillonnage au lac Laflamme en mai 1989 pour les échantillons avec algues .....	xxx
ANNEXE 5: Analyse en composante principale (facteur 1 versus facteur 2) des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans la neige contenant des algues nivales au lac Laflamme (mai 1989) .....	xxxii
ANNEXE 6: Analyse en composante principale (facteur 1 versus facteur 2) des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans la neige sans algue au lac Laflamme .....	xxxiii

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1:	Qualité du couvert de neige à différents endroits de l'hémisphère Nord (tiré de Germain 1989) .....	12
TABLEAU 2:	Caractéristiques du bassin versant du lac Laflamme (Papineau 1988) .....	23
TABLEAU 3:	Méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques des échantillons d'eau de fonte .....	35
TABLEAU 4:	Composition chimique d'une pluie sous couvert forestier au lac Laflamme selon Papineau (1987) .....	43
TABLEAU 5:	Résumé des caractéristiques physiques du couvert de neige au lac Laflamme en mai 1989 où furent prélevés des échantillons de neiges contenant des algues .....	49
TABLEAU 6:	Comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques mesurés sur les échantillons de neige avec et sans algues déterminées par un test t de Student pour échantillons appariés (n = 44) .....	54
TABLEAU 7:	Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés dans la neige colonisée par les algues nivales au lac Laflamme au mois de mai 1989 .....	81
TABLEAU 8:	Bilan des charges ioniques de la neige avant la fonte en laboratoire .....	87
TABLEAU 9:	Bilan des charges ioniques lors de la fonte en laboratoire .....	88
TABLEAU 10:	Bilan des pertes et des gains anioniques lors de la fonte en laboratoire .....	90
TABLEAU 11:	Bilan des pertes et des gains cationiques lors de la fonte en simulateur .....	91



## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1:	Cycle vital d'algues nivales dans la neige (selon Hoham 1987) .....	6
FIGURE 2:	Localisation du bassin versant du lac Laflamme (tiré de Papineau 1988) .....	21
FIGURE 3:	Topographie du bassin versant du lac Laflamme (tiré de Papineau 1988) .....	22
FIGURE 4:	Montage expérimental utilisé lors de la croissance des algues nivales en simulateur de fonte .....	39
FIGURE 5:	Montage expérimental utilisé lors de la croissance algues nivales dans une colonne de neige afin de visualiser une floraison algale .....	41
FIGURE 6	Coupes transversales du couvert de neige contenant des algues nivales .....	46
FIGURE 7	Photographies au microscope (400 X) des algues nivales recueillies dans le couvert de neige au lac Laflamme en mai 1989 et préservées dans une solution de Lugol .	47
FIGURE 8:	Conditions météorologiques enregistrées à la station Montmorency du 1er mai au 31 mai 1989 .....	48
FIGURE 9:	Distribution de la densité algale des échantillons de neige contenant des algues nivales .....	56
FIGURE 10:	Distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur pH .....	60
FIGURE 11:	Comparaison de la distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur concentration en $\text{NO}_3^-$ .....	65
FIGURE 12:	Comparaison de la distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur concentration en $\text{NH}_4^+$ .....	66

FIGURE 13:	Evolution temporelle des concentrations moyennes de nitrate dans les échantillons de neige colonisée par les algues nivales en mai 1989 au lac Laflamme .....	72
FIGURE 14:	Evolution temporelle des concentrations moyennes d'ammonium dans les échantillons de neige colonisée par les algues nivales en mai 1989 au lac Laflamme .....	73
FIGURE 15:	Analyse en composantes principales des différents paramètres mesurés dans la neige contenant des algues nivales au lac Laflamme (mai 1989) .....	82
FIGURE 16:	Analyse en composantes principales des différents paramètres mesurés dans la neige ne contenant pas d'algue nivale au lac Laflamme (mai 1989) .....	82
FIGURE 17:	Courbes de croissance dans le milieu M-1 des populations d'algues nivales prélevées au lac Laflamme en mai 1989 (à 4 °C, photopériode 15:9) .....	85
FIGURE 18:	Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #1 lors de la fonte en laboratoire .....	96
FIGURE 19:	Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #2 lors de la fonte en laboratoire .....	97
FIGURE 20:	Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #3 lors de la fonte en laboratoire .....	98
FIGURE 21:	Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #4 lors de la fonte en laboratoire .....	99
FIGURE 22:	Charge cumulative du nitrate en fonction du pourcentage du volume d'eau de fonte recueilli dans chaque colonne lors de la fonte en laboratoire .....	100
FIGURE 23:	Charge cumulative d'ammonium en fonction du pourcentage du volume d'eau de fonte recueilli dans chaque colonne lors de la fonte en laboratoire .....	101

## I. INTRODUCTION

### 1. LES ALGUES NIVALES ET L'ÉCOLOGIE DE LA NEIGE

La première mention de l'existence de neige colorée fut faite par Aristote trois siècles avant Jésus-Christ (Fott 1970). Le premier à expliquer que cette coloration était due à la présence d'organismes vivant dans la neige fut Bauer en 1819. Il signale la découverte d'un nouveau micro-organisme, «Uredo nivalis» (Chlamydomonas nivalis) comme étant responsable de la coloration rougeâtre de la neige au mois d'août sur la côte nord-ouest du Gröenland lors de l'Expédition Ross en 1818 (Kobayasi 1967). Entre 1819 et 1963, plusieurs publications furent consacrées aux algues nivales. Ce n'est cependant qu'en 1963 qu'est apparue la première étude exhaustive traitant de ces micro-organismes (Fukushima, 1963). Depuis 1963, outre l'étude de leur distribution, de leur cycle de vie et de leur taxonomie, l'attention des chercheurs s'est surtout portée sur leur physiologie, leur ultrastructure et leur écologie. Par contre, aucun scientifique, à l'exception de Hoham et al. en 1988, n'ont étudié l'impact des algues nivales sur la physico-chimie de la neige.

La littérature relate la présence d'algues nivales partout dans le monde, d'un pôle à l'autre, à l'exception du continent africain (Vincent 1988; Hoham 1971, 1980, 1987; Marchant 1982; Gerrath et Nicholls 1974; Kol 1968; Kobayasi 1967). Kol (1968) énumère jusqu'à 110 espèces d'algues vivant dans la neige. Ces espèces algales font parties de plusieurs phylums dont celui des Chlorophyta (algues vertes), des Euglenophyta, des Chrysophyta, des Cyanophyta (algues bleu-vert), des Pyrrhophyta (dinoflagellées) et des Cryptophyta (Hoham 1971; Kol 1968; Fukushima 1963). La grande majorité

des algues nivales appartiennent cependant à la division des Chlorophyta et sont responsables d'une grande variété de coloration de la neige durant les fontes printanières et estivales.

La neige de coloration rouge est due en particulier à la présence d'une algue verte, Chlamydomonas nivalis (Bauer) Wille, espèce dominante dans les régions de haute altitude exposées au soleil et souvent situées au-dessus de la limite des arbres (Hoham et Blinn 1979; Kol 1968). Cette couleur rougeâtre serait attribuable plus spécifiquement à un pigment secondaire synthétisé parallèlement à la décomposition des molécules de chlorophylle et ceci concomitamment à une déficience en azote dans la neige (Czygan 1970).

Ce pigment chez Chlamydomonas nivalis (Bauer) Wille a été identifié par Viola (1966) comme étant de l'astaxanthine. Quant à la présence d'une coloration verte dans le couvert, elle est causée par une variété d'espèces d'algues vertes (division Chlorophyta) appartenant au genre Chloromonas (Hoham et al. 1979, 1983; Hoham et Mullet 1977, 1978; Hoham 1975). Généralement, ces neiges se retrouvent sous la voûte forestière coniférienne et donc très ombragées. Ces couverts reçoivent un apport nutritif considérable des débris de la voûte forestière qui recouvrent la surface de la neige (Hoham 1976). On a observé également des colorations allant du jaune à l'orangé dans des couverts situés sous la voûte coniférienne et étant partiellement ombragés (Hoham 1980).

Selon Hoham (1975a), les espèces d'algues considérées comme nivales, c'est-à-dire vivant exclusivement dans la

neige, ne devraient pas croître à une température de l'air supérieure à 10 °C et devraient posséder une température optimale de croissance inférieure à 10 °C. Il a sélectionné cette température comme maximale parce que quelques espèces d'algues retrouvées dans le couvert de neige lors de la fonte, plus particulièrement l'espèce Raphidonema nivale Largerh (Hoham 1975a), pouvait continuer à se multiplier durant la période estivale au niveau du sol lorsque la neige avait disparu et que la température de l'air sous la voûte forestière variait de 13 à 15 °C. En laboratoire, R. nivale se multipliait bien à une température variant de 1 à 15 °C, mais succombait à 20 °C. R. nivale est sans doute une espèce cryophile facultative, c'est-à-dire capable de croître tant dans la neige qu'au niveau du sol.

Cependant dans cette étude, d'autres espèces d'algues retrouvées dans les congères de neige, Chloromonas pichincha, Chlainomonas kolii, Chlainomonas rubra, Chlamydomonas nivalis, Raphidonama tatrae, Chromulina chionaphila et Cryptomonas frigoris, ne pouvaient croître à des températures supérieures à 10 °C en laboratoire. Toutes ces espèces sont probablement des cryophiles obligatoires, c'est-à-dire vivant exclusivement dans la neige, et donc incapables de survivre dans des conditions végétatives au niveau du sol durant les mois d'été où la température de l'air atteint 13 à 15 °C.

### 1.1 Cycle vital des algues nivales dans la neige

Une grande diversité de stades cellulaires sont responsables de la coloration du couvert de neige (Hoham et Blinn 1979; Kol 1968). Habituellement, la couleur verdâtre est attribuable à la division active des cellules tandis que les

teintes rougeâtres seraient causées par la production de molécules de pigments secondaires qui masqueraient la couleur engendrée par les molécules de chlorophylle chez les zygosporés (Hoham 1987).

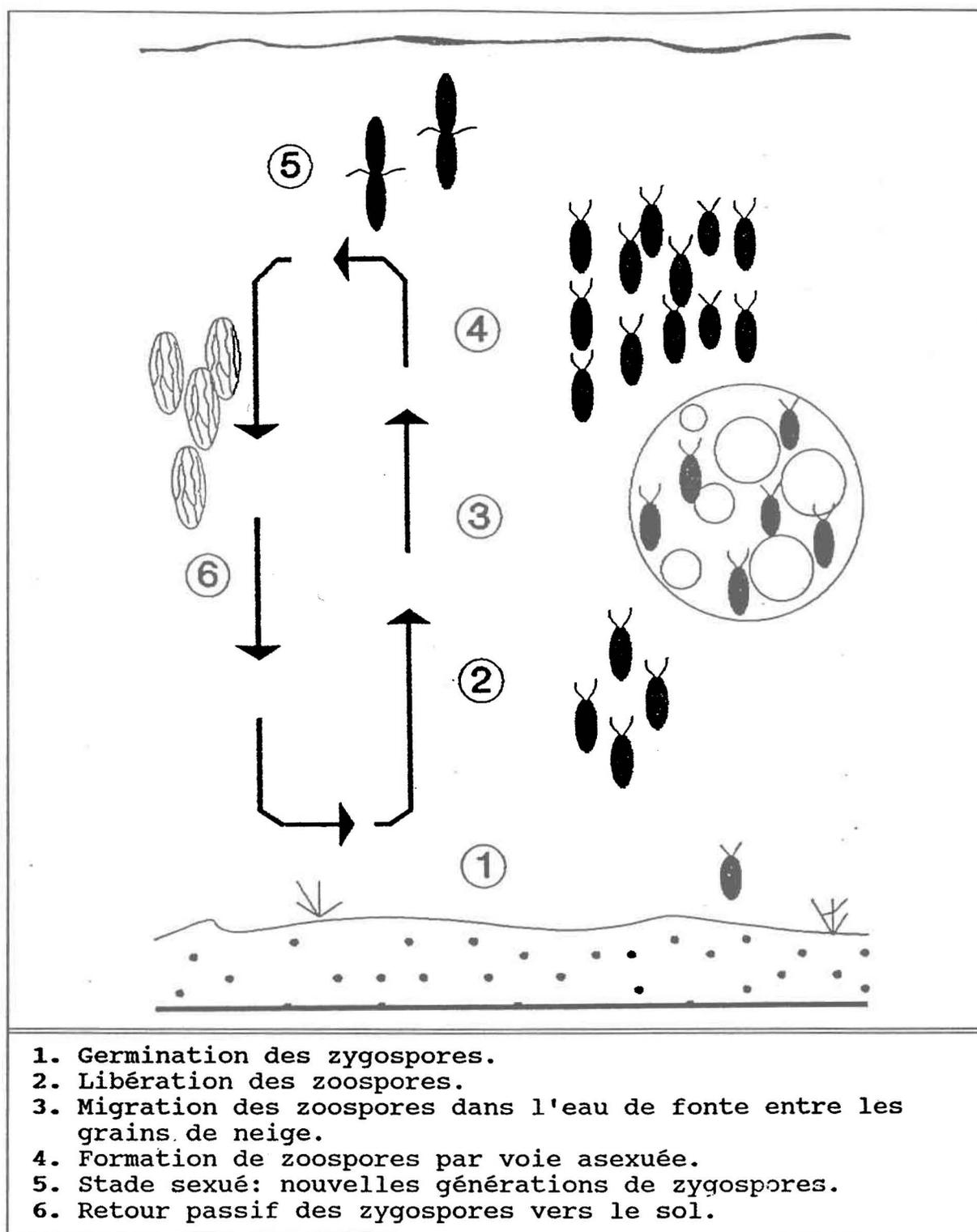
La première floraison algale donnant lieu à cette coloration de la neige survient quand la température de l'air demeure au-dessus du point de congélation pendant plusieurs jours consécutifs. Cela engendre une fusion du couvert de neige avec un écoulement de l'eau de fonte soit vers le sol, soit vers l'interface vieille neige-nouvelle neige dans les congères éternelles (figure 1). Les éléments nutritifs et les gaz dissous sont alors disponibles. La lumière solaire peut pénétrer à l'intérieur du couvert pour ainsi favoriser la germination des zygosporés à l'interface sol-neige ou à l'interface vieille neige-nouvelle neige (Hoham 1987; Hoham et al. 1979; Hoham et Mullet 1977; Hoham 1975b, 1974a, 1974b; Thomas 1972; Curl et al. 1972; Pollock 1970).

Le processus de germination permet le relâchement de zoosporés (cellules issues de reproductions asexuées, Bold et Wynne 1978) équipés de flagelles leur permettant de se déplacer dans l'eau de fonte entre les grains de neige. Ils pourront de cette façon se déplacer à l'intérieur du couvert jusqu'à une certaine hauteur où la disponibilité des éléments nutritifs et/ou leur activité photosynthétique seront maximales (Hoham 1987, 1980, 1975). Les zoosporés continuent de se multiplier par reproduction asexuée engendrant ainsi une floraison algale visible et responsable de la coloration caractéristique de la neige. Cette phase est généralement marquée par une consommation accrue des éléments nutritifs dissous dans l'eau de fonte (Hoham 1987). L'ablation du couvert lors

de la fonte peut engendrer une concentration d'algues nivales et ainsi augmenter l'effet de coloration de la neige. Une déficience des éléments nutritifs de l'eau de fonte engendrerait probablement la formation de nouveaux zygotes par voie sexuée.

Cette création de zygosporos surviendrait quelques jours après la germination des zygosporos de l'année précédente (Hoham 1975b). Le retour des nouveaux zygosporos vers le sol ou vers la surface de la vieille neige dans les neiges éternelles s'effectue passivement par l'ablation du couvert de neige. Ce cycle dure environ une à deux semaines et les spores restent en état de dormance pendant près de cinquante semaines jusqu'à la prochaine germination de l'année suivante (Hoham 1987). Durant la période où les algues nivales ne sont pas recouvertes par la neige, elles peuvent être entraînées dans d'autres endroits par le vent.

Les cycles de vie des algues nivales sont très complexes et c'est en combinant les observations de terrain et de laboratoire qu'on peut parvenir à les élucider. C'est pour cette raison que maintenant plusieurs espèces sont reclassées comme étant des étapes du développement du zygote de d'autres espèces d'algues nivales (Hoham et al. 1983, 1979; Hoham 1980, 1974a, 1974b; Hoham et Mullet 1976).



**FIGURE 1:** Cycle vital d'algues nivales dans la neige (selon Hoham 1987).

## 1.2 Distribution des algues nivales

La composition et la variation de la flore algale de la neige sont déterminées par l'intensité lumineuse, le pH de la neige, la température de l'air, la disponibilité des éléments nutritifs, la persistance du couvert, et la vélocité et la direction du vent (Hoham 1987, 1985, 1980; Prescott 1968, Kol 1968; Stein et Brooke 1964; Fukushima 1963). La température de l'air environnant lors de la germination des zygospores est un facteur important dans la distribution des algues nivales. Si la température est trop chaude, la neige fond rapidement et les conditions environnementales favorables au développement des algues ne se rencontrent pas. Si elle est trop froide, elle peut enrayer la division des cellules algales.

Par exemple, les algues nivales trouvées dans le nord-est des Etats-Unis, plus précisément dans les Adirondacks (état de New York), donnaient une coloration verte à la neige et étaient associées à des couverts de neige résiduelle ayant généralement moins de 40 cm d'épaisseur. La majorité des taches verdâtres causées par la présence d'algues furent retrouvées sur les versants nord où les congères restantes étaient souvent ombragées par la voûte coniférienne et dont la surface était recouverte de débris provenant des arbres environnants. Les espèces en cause appartenaient au genre Chloromonas (Hoham 1987).

On peut citer également une étude de Newton (1982) dans l'archipel de Svalbard en Arctique portant sur la colonisation des pentes enneigées par l'algue Chlamydomonas nivalis où tous les sites colonisés étaient orientés vers l'ouest. Ces résultats s'expliquent par le fait que les vents dominants

soufflaient de l'ouest et qu'ils pouvaient transporter des spores algales ainsi que des éléments nutritifs.

### 1.3 Sources d'éléments nutritifs

La litière coniférienne recouvrant le couvert de neige constitue une source de nutrition potentielle pour les algues nivales (Hoham 1976). Le lessivage des arbres par les précipitations est une autre source d'éléments nutritifs. De plus, les nuclei de poussière qui sont à l'origine de la formation des flocons de neige dans l'atmosphère fournissent aussi leur part d'éléments nutritifs aux algues nivales lors de la fonte (Pollock 1970). Une autre source mineure peut provenir du sol, dans les quinze premiers centimètres du couvert, par capillarité (Hoham 1980). La principale source nutritionnelle provient, toutefois, des débris à la surface du couvert par écoulement gravitationnel ou latéral de l'eau de fonte et/ou de la pluie vers le sol (Hoham 1987; Hoham et al. 1979; Hoham et Mullet 1977; Hoham 1975b).

### 1.4 Autres micro-organismes vivant dans la neige

En plus des algues, nous retrouvons dans la neige d'autres micro-organismes tels que des champignons (Chionaster nivalis (Bohl.) Wille, Selenotila nivalis Largerh, Chionaster bicornis Kol, Phacidium infestans, etc.), des bactéries (Chlorobacteria sp, Sorochloris aggregata var. nivicola Kol, etc.), des épiphytes, des consommateurs primaires (protozoaires, rotifères) ainsi que d'autres organismes comme des nématodes, des insectes, etc. (Hoham 1987; Hoham et al. 1983; Merriam et al. 1983; Hoham et Blinn 1979; Kol 1974, 1968; Visser 1973; Hardy et Curl 1972; Pollock 1970; Stein et al.

1967, 1963). Kol (1974) mentionne la présence de 67 espèces de micro-organismes nivéaux dont 88% étaient des algues nivales. Visser (1973) a quant à lui identifié jusqu'à une quarantaine d'organismes vivant dans la neige.

## 2. PHYSICO-CHIMIE DE LA NEIGE

### 2.1 Origine des espèces chimiques dans les précipitations de neige

La grande variabilité dans la composition des précipitations de neige reflète l'hétérogénéité chimique des masses d'air d'où ils originent (Jones et Stein 1989). L'introduction des différentes espèces chimiques dans les flocons de neige s'effectue dès le processus de nucléation. Dans l'atmosphère, des gouttelettes d'eau en état de surfusion contenant des gaz dissous, des aérosols et des composés oxydés viennent en contact avec des nucléi pour former des cristaux de glace. Ces nucléi peuvent être des fines particules d'argile, des sels de mer sous forme d'aérosol ou encore de la matière organique particulaire. Puis, chaque cristal croît par échange de vapeur d'eau et de gaz dissous avec son milieu immédiat jusqu'au moment où il atteindra une certaine taille pour ensuite tomber sous l'effet de la gravité terrestre. Les cristaux s'agrègent en flocons et tout en continuant leur descente, lessivent les aérosols et les fines matières particulaires contenus dans l'atmosphère (Jones et Stein 1989).

Les principaux constituants des flocons sont souvent les ions  $H^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $Na^+$  et  $Cl^-$ . Les ions  $H^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$  et  $SO_4^{2-}$  résultent des émissions de sources naturelles et anthropiques. Quant aux espèces ioniques  $Na^+$  et  $Cl^-$ , ils

proviennent principalement des sels de mer présents dans l'atmosphère (Jones et Stein 1989). On peut également y retrouver des éléments d'origine terrigène comme les cations  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , des acides organiques faibles, des composés organiques neutres ainsi que des métaux traces (Thornton et al. 1982). Les masses d'air provenant de régions fortement industrialisées rendront la neige acide en raison de la présence d'espèces anioniques d'acides forts telles que les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) résultant de la combustion de carburants fossiles (Davis et al. 1984). Le lessivage par les précipitations des espèces chimiques dans l'atmosphère n'est pas constant et dépend des conditions météorologiques et du type de précipitation. Des études ont montré que la neige et la pluie avaient un pouvoir de lessivage différent (Raynon et Haynes 1983). Par exemple, l'espèce chimique  $\text{HNO}_3$  serait lessivée de l'atmosphère plus rapidement par la neige que par la pluie. Le tableau 1 présente quelques exemples de la composition chimique du couvert de neige dans l'hémisphère nord.

## 2.2 Processus physiques et chimiques dans le couvert en période froide

Contrairement à la pluie qui pénètre rapidement dans le sol, la neige demeure en contact avec l'atmosphère pour de longues périodes de temps où il peut y avoir des gains ou des pertes d'espèces chimiques à l'interface neige-atmosphère ou à l'interface neige-sol. En période froide, c'est-à-dire où la température de l'air est inférieure à  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , des pertes d'espèces ioniques et de gaz dissous peuvent survenir en raison de petites fontes géothermiques (Jones et Stein 1989). Selon Colbeck (1987), le métamorphisme des cristaux de neige à l'intérieur du couvert en période froide serait responsable

de la perte d'espèces chimiques. De plus, sous certaines conditions météorologiques, Jones et Delmas (1987) mentionnent que des pertes de gaz et d'aérosols peuvent survenir à la surface du couvert en contact avec l'atmosphère. La photo-oxydation de certaines espèces chimiques à la surface du couvert pourrait aussi entraîner une perte de ces dernières (Jones et Stein 1989). Quant aux gains, ils résultent de la condensation sur la surface du couvert des vapeurs d'eau contenant des ions et des gaz dissous présents dans l'atmosphère, des dépôts humides, des dépôts de la voûte forestière (débris, poussières, etc.), des dépôts secs de gaz et d'aérosols (Jones et Stein 1989; Cadle et al. 1985).

Du point de vue physique, le métamorphisme des cristaux de neige en période froide est le principal processus influençant la composition chimique de la neige. A l'intérieur du couvert, deux formes de métamorphisme sont responsables du rejet des aérosols adsorbés à la surface des cristaux et à la réémission des gaz adsorbés lors de la disparition des cristaux de neige. Il s'agit du métamorphisme destructif et du métamorphisme constructif (Colbeck 1987).

De plus, on note une grande variabilité spatiale dans les caractéristiques physiques du couvert de neige, tant sur une petite échelle (granulométrie des cristaux) que sur une grande échelle (densité, profondeur) (Tranter et al. 1987; Jones 1985; Cadle et al. 1984; Adams et Roulet 1982; Adams 1981). La variabilité des paramètres physiques du couvert entraîne aussi une variabilité dans la composition chimique de la neige. Sous l'effet de plusieurs facteurs, les différentes espèces chimiques pourront être réparties horizontalement et verticalement à l'intérieur du couvert. Il en résultera une grande hétérogénéité physico-chimique (Cadle et al. 1984).

TABLEAU 1: Qualité du couvert de neige à différents endroits de l'hémisphère Nord (tiré de Germain 1991).

LIEU	IONS ( $\mu\text{éq/l}$ )										
	pH	H <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
A	4.45	35.00	62.06	0.13	41.62	32.09	50.46	13.05	27.45	9.05	35.64
B	4.24	57.00	7.90	-	37.10	27.95	-	-	15.97	-	6.10
C	-	-	10.97	-	26.94	55.68	10.01	1.02	6.99	3.29	9.98
D	4.46	34.00	11.57	4.11	24.03	23.81	2.65	5.04	3.89	1.48	6.10
E	4.85	14.00	-	-	20.00	12.63	-	-	14.92	4.36	41.57
F	4.95	11.00	-	-	22.10	19.04	-	-	23.95	7.90	5.21
G	4.44	36.00	81.24	-	9.36	18.42	53.94	-	-	11.93	8.09
H	4.59	25.00	4.49	0.16	21.78	12.21	4.70	0.59	4.39	1.56	5.54
I	5.50	3.00	6.21	-	1.77	2.90	3.05	0.49	2.10	0.74	5.54
J	4.69	20.00	4.20	-	13.50	28.36	11.70	2.28	6.19	3.37	-
K	4.18	65.00	58.81	-	16.94	20.70	33.50	-	2.50	7.41	-

Sources: A: Johansessen 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, E-U, site ouvert.  
 F: Cadle et al. (1984); Michigan, E-U, site couvert.  
 G: Tranter et al. (1986); Cairngorm Mountains, Ecosse.  
 H: Semkin et Jeffries (1986); Turkey Lakes, Ontario.  
 I: Laird et al.; Cascade et Sierra Nevada, E-U.  
 J: Stottlemeyer et al. (1987); Calumet Watershed, Michigan, E-U.  
 K: Abraham et al. (1988); Cairngorm Mountains, Ecosse.

### 2.3 Processus physiques et chimiques lors de la fonte

C'est pendant la fonte printanière que surviennent les transformations les plus importantes à l'intérieur du couvert. Les apports énergétiques tels que les rayonnements solaire et infrarouge ainsi que le flux de chaleur sensible entraînent la fusion du couvert de neige. Pour qu'il fonde, il faut que sa température s'élève d'abord jusqu'à 0 °C. Ce n'est qu'à ce moment que tout apport énergétique supplémentaire pourra servir à la fusion du couvert de neige. Ce transfert de la chaleur absorbée dans la couche superficielle s'effectue vers l'intérieur du couvert par conduction dans le réseau de cristaux et de ponts de glace, par conduction dans les espaces d'air et les pores, par convection et radiation dans les pores, et par diffusion de la vapeur d'eau à travers les espaces vides (Mellor 1977).

La composition chimique des eaux de fonte déchargées du couvert lors de la fonte printanière ne reflète pas nécessairement la concentration des espèces ioniques retrouvées à l'intérieur du couvert de neige. Des études effectuées par Johannessen et Henriksen (1978) ont montré que 50 à 80% des polluants acides ( $H^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) sont relâchés dans le premier 30% de la fonte. La concentration de certaines espèces ioniques peut même être vingt fois supérieure à celle mesurée dans la neige (Suzuki 1982). Ce phénomène est appelé effet de concentration. Cette concentration est due au lessivage des impuretés chimiques à l'interface des cristaux de neige par l'eau de fonte (Tranter et al. 1986). Les cycles de gel et de dégel observés au printemps entraînent les impuretés chimiques de la surface du couvert de neige vers les couches intérieures. Des travaux expérimentaux en laboratoire et sur le terrain ont montré qu'il pouvait y avoir lors de la fonte un phénomène d'élution préférentielle. Ceci se traduit par le

relâchement de certaines espèces ioniques préférentiellement à d'autres (Tranter et al. 1986; Brimblecombe et al. 1986; Tsiouris et al. 1985).

Ces chercheurs ont montré que les sulfates étaient libérés du couvert de neige avant les chlorures. Quant aux nitrates, leur décharge est variable dans la séquence d'élu­tion préférentielle, mais survient généralement avant les chlorures. Selon Johannessen et Henricksen (1978), ces séquences d'élu­tion préférentielle peuvent changer avec la nature de la neige. Des anomalies structurelles dans le couvert de neige peuvent entraîner des changements dans la composition chimique de l'eau de fonte et ainsi masquées complètement l'élu­tion préférentielle des espèces ioniques (Tranter et al., 1986). Par contre, l'effet de concentration est toujours observé (Jones et Stein, 1989).

Dans certains cas, des lentilles de glace présentes dans le couvert peuvent causer des écoulements latéraux et engendrées une augmentation de l'effet de concentration. Ceci est dû en particulier au temps de contact plus long entre la neige et l'eau de fonte (English et al. 1987). L'existence de macropores verticaux dans le couvert peut court-circuiter l'eau de fonte et/ou de pluie vers le sol, causant ainsi en général, une diminution de l'effet de concentration (Jones et Sochanska 1985).

#### 2.4 Les espèces azotées dans le couvert de neige

Les nitrates retrouvés dans le couvert de neige sont principalement d'origine atmosphérique (dépôts secs et humides). L'acide nitrique gazeux ( $\text{HNO}_3$ ) constitue environ 90% des dépôts de nitrates (Cadle et al. 1985). Les dépôts secs de dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) oxydé par l'ozone ( $\text{O}_3$ ) ou le radical hydroxyle (OH) peuvent également conduire à une production de nitrates (Delmas et Jones 1987). Quant aux ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), ils proviennent surtout de l'atmosphère. La matière organique constitue également une source d'azote.

Plusieurs auteurs ont noté une mobilisation de l'azote au cours de la fonte (Jones et Deblois 1987; Cadle et al. 1983; Jeffries et Snyder 1981; McLean 1981). Ils attribuent ces pertes à des facteurs biologiques à l'intérieur du couvert. Lors de travaux effectués sur le terrain et en laboratoire, Jones et Deblois (1987) ont observé des pertes d'azote sous forme de  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ . Cette diminution serait attribuable à des processus d'assimilation biologique.

### 3. REPERCUSSIONS ENVIRONNEMENTALES DE LA FONTE PRINTANIÈRE

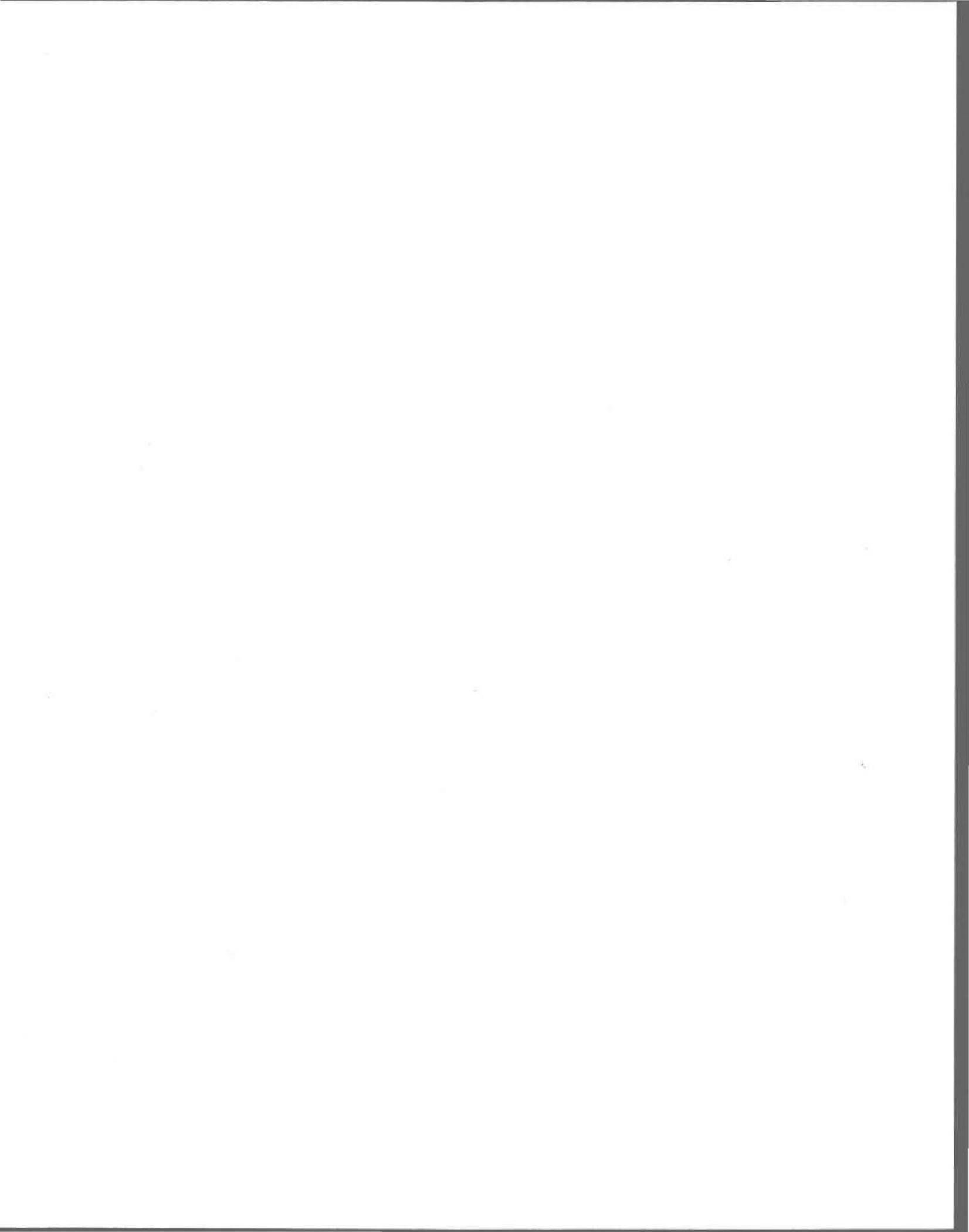
La fonte du couvert de neige libère une quantité massive de polluants acides accumulés durant l'hiver et provoque une augmentation de l'acidité des eaux de surface. L'acidité des eaux de fonte peut augmenter de près de soixante fois dans certains bassins hydrographiques ayant un pouvoir tampon très faible (Galloway et al. 1980). Par exemple, dans de tels écosystèmes, le pH de la neige avant la fonte massive peut être de l'ordre de 4.5 et lorsque cette fonte survient, le pH peut descendre à des valeurs aussi basses que 3.7 (Jones et Bédard 1987).

Ce choc acide entraîne des effets néfastes et très sévères parmi les niveaux trophiques de tous les écosystèmes touchés (Jeffries et al. 1979; Leivestad et al. 1976). Par exemple, cette acidification épisodique peut mener à un appauvrissement de la diversité des espèces de poissons (Likens 1976) et, à la limite, entraîner la mort massive de plusieurs de ces espèces (Leivestad et Muniz 1976). Dans les écosystèmes nordiques où les polluants acides sont relâchés rapidement vers le sol et les eaux de surface lors de la fonte printanière, cet effet de concentration a des conséquences très significatives dans le processus d'acidification.

L'acidification des sols est un processus naturel causée principalement par la respiration de la flore et de la faune du sol, la nitrification bactérienne et la formation d'acides organiques suite à la décomposition microbienne des résidus végétaux. Cependant, l'ère industrielle a accentué le processus d'acidification des sols par son apport supplémentaire de dépôts acides. On observe ainsi une augmentation des ions  $H^+$  qui vont remplacer les cations ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ , etc.) à la surface de l'argile et de la matière organique du sol. Ce lessivage des cations entraîne une augmentation de l'acidité du sol qui se traduit par une diminution de l'activité microbienne responsable de la décomposition de la matière organique, et en une altération du recyclage des éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg, etc.) (Thompson et al. 1987; Mancinelli 1986; Robitaille 1982).

Somme toute, le couvert de neige est enclin à des transformations physico-chimiques durant l'hiver et surtout pendant la fonte printanière. Cette période est critique pour de nombreux écosystèmes au moment où une quantité massive de

polluants acides est libérée du couvert de neige. Cependant, l'assimilation biologique des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) notamment par les algues nivales, pourrait avoir d'importantes répercussions. Par exemple, si certains polluants acides comme l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) sont transformés lors de la fonte, cela diminuerait l'effet de ces polluants sur les écosystèmes touchés. Par contre, si l'ammonium est assimilé préférentiellement aux nitrates par les algues nivales, l'acidité de l'eau de fonte pourrait augmenter.



## II. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Telles que décrit dans l'introduction, la nature et la présence des micro-organismes nivaux sont bien documentées, mais l'interaction existant entre les algues nivales et la physico-chimie de la neige est quant à elle peu connue. La littérature relate deux études où les algues nivales accumulent des métaux traces à des concentrations plusieurs milliers de fois plus grandes que les concentrations retrouvées dans la neige (Einer Fjordingstad 1978; Erik Fjordingstad et al. 1974; Erik Fjordingstad 1973). Les seules études portant sur l'influence des algues nivales sur la physico-chimie de la neige lors de la fonte furent menées par Hoham et al. (1989) et Germain (1991). Cependant, ces investigations n'étaient que préliminaires et le très faible nombre d'échantillons (trois échantillons pour Hoham et al.; cinq pour Germain) ne permettait pas d'en tirer des résultats statistiquement valables. La découverte récente de populations d'algues nivales en grandes quantités dans le couvert de neige en forêt boréale au lac Laflamme dans la forêt Montmorency (Germain 1991; Hoham et al. 1989), a fait ressortir le potentiel de ces organismes à modifier l'acidité des eaux de fonte lors de la fusion du couvert de neige.

Partant de ces considérations, nous nous sommes proposés dans cette recherche d'étudier les interactions existantes entre la chimie de la neige et l'activité microbiologique des algues nivales. Pour ce faire, nous avons posé l'hypothèse que les algues nivales peuvent directement influencer l'acidité de la décharge printanière par l'assimilation des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) des eaux de fonte. Cette étude s'inscrit dans une suite logique à la recherche de Germain (1991) portant sur la dynamique des composés azotés et l'ac-

tivité microbiologique de la neige lors de la fonte. Le projet visa donc les objectifs suivants:

- 1) Etudier la variabilité spatio-temporelle des populations d'algues nivales pendant la fonte printanière de 1989 au lac Laflamme;
- 2) Déterminer le rapport entre les populations d'algues nivales et la dynamique des composés azotés ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ );
- 3) Maintenir en laboratoire des populations viables d'algues nivales;
- 4) Simuler les conditions physico-chimiques du milieu naturel afin d'établir la cinétique de l'assimilation des composés azotés par les algues nivales dans des conditions contrôlées en laboratoire.

L'originalité de cette étude réside dans les interactions existant entre les algues nivales et la physico-chimie de la neige qui n'ont jamais été investiguées de façon exhaustive auparavant.

### III. METHODOLOGIE

#### 1. DESCRIPTION DU LIEU D'ECHANTILLONNAGE

L'emplacement où furent retrouvées les algues nivales est situé dans le bassin versant du lac Laflamme. Cet endroit se trouve dans le parc des Laurentides sur le territoire de la Forêt Montmorency à 80 km au nord de la ville de Québec (figure 2).

Ce bassin versant se trouve sur le bouclier canadien et couvre une superficie de 0,68 km<sup>2</sup>. La latitude et la longitude sont respectivement de 47°19' N et 71°07' O et l'altitude varie de 777 m à 884 m. Le versant nord du bassin montre des élévations supérieures et des pentes plus fortes que le versant sud. On peut voir la topographie du bassin versant du lac Laflamme à la figure 3. La moyenne des précipitations annuelles pour la période de 1981 à 1985 atteint 1,3 mètres dont 34% tombe sous forme de neige (Papineau 1987).

Ce site est occupé par une forêt dominée par le sapin baumier (Abies balsamea) reposant sur un podzol ferro-humique acide. On y retrouve également un peu d'épinettes blanches (Picea glauca) et de bouleaux à papier (Betula papyrifera). Les caractéristiques du bassin versant du lac Laflamme sont présentées au tableau 2.

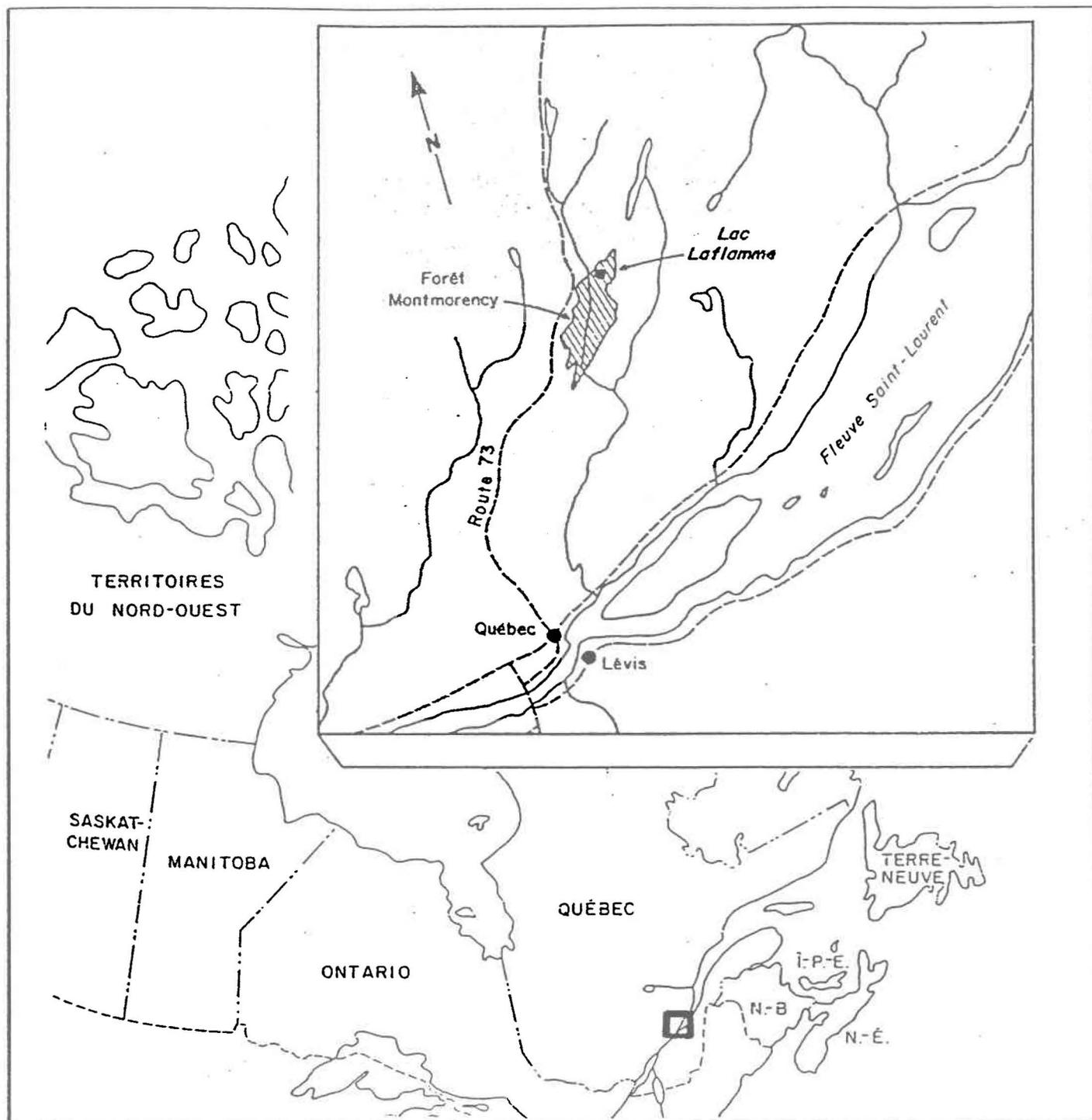


FIGURE 2: Localisation du bassin versant du lac Laflamme (tiré de Papineau 1988).

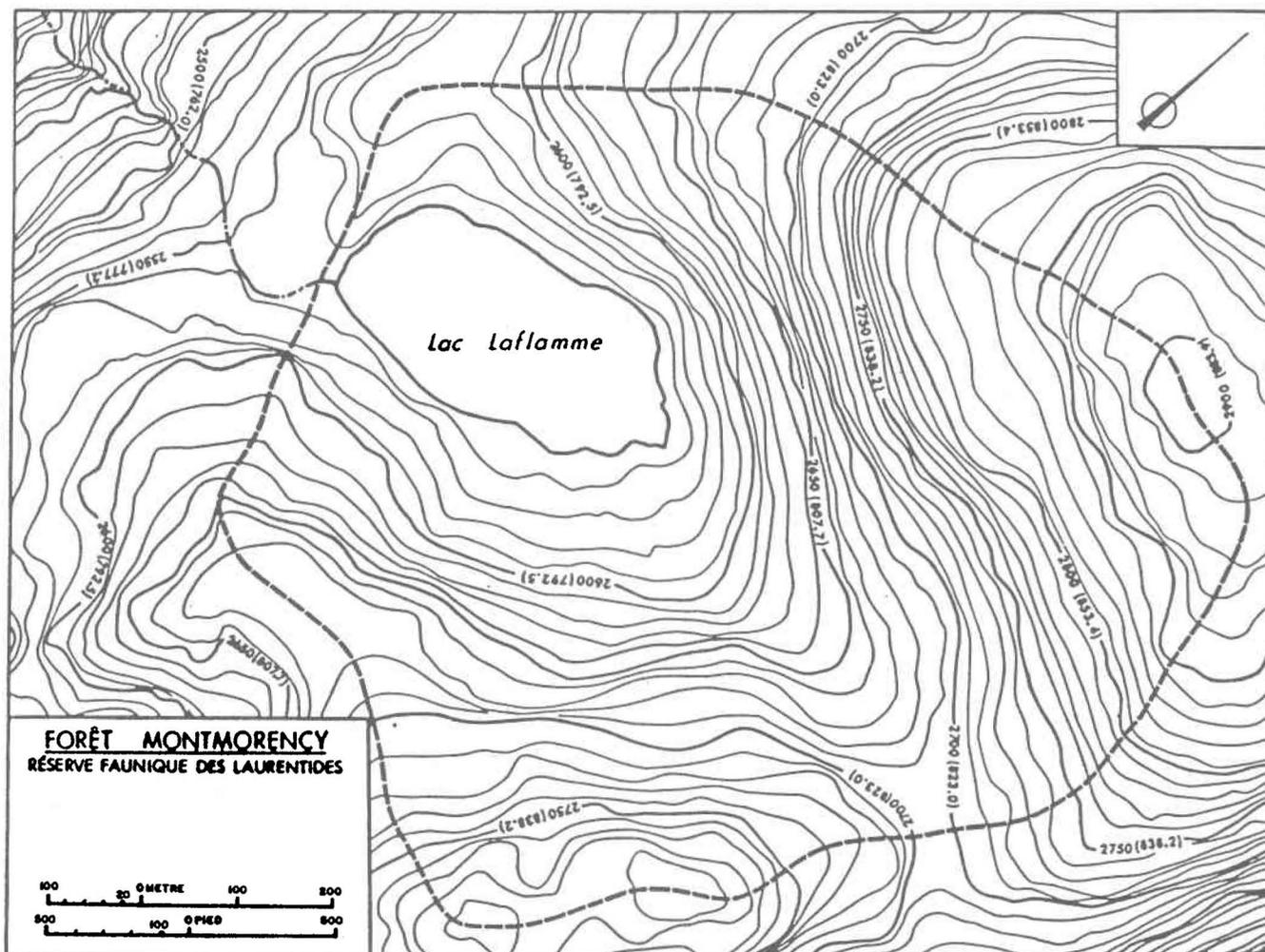


FIGURE 3: Topographie du bassin versant du lac Laflamme (tiré de Papineau 1988).

**TABLEAU 2:** Caractéristiques du bassin versant du lac Laflamme (Papineau 1988).

Latitude	47°19' N
Longitude	71°07' O
Superficie totale du bassin versant	0,684 km <sup>2</sup>
Altitude minimale	777 m
Altitude maximale	884 m
Pente minimale	0 %
Pente maximale	30 %
Superficie du lac	0,061 km <sup>2</sup>
Type de sol	Podzol ferro-humique
Végétation	Sapin baumier ( <u>Abies balsamea</u> ) Epinette blanche ( <u>Picea glauca</u> ) Bouleau à papier ( <u>Betula papyrifera</u> )

## 2. ECHANTILLONNAGE

### 2.1 Choix des sites d'échantillonnage

Puisque les taches verdâtres dues à la présence d'algues nivales se retrouvent un peu aléatoirement dans le couvert de neige, nous avons donc choisi les endroits où leur présence était visible à l'oeil nu pour l'échantillonnage.

## 2.2 Identification des sites d'échantillonnage

Après la localisation des algues, nous avons pris des photographies de la surface du couvert neigeux contenant les algues. Nous avons mesuré la distance de la tache choisie aux arbres environnants. A l'aide de ruban rouge en nylon, nous avons identifié le site en y inscrivant la date et le numéro du site. A l'aide d'une petite pelle d'aluminium, nous avons creusé une tranchée jusqu'au sol de façon à ce que la tache soit coupée en deux. Nous avons alors mesuré la profondeur du couvert et la position des algues à l'aide d'un mètre métallique et d'un ruban à mesurer.

## 2.3 Prélèvement des échantillons témoins

A l'aide d'une spatule plastifiée, et tout en portant des gants de vinyle (Tru-Touch), nous avons recueillis à la même hauteur que la localisation des algues, un échantillon de neige de part et d'autre de cette tache ( $\pm 30$  cm) quand cela était possible. La neige homogénéisée fut placée dans des sacs plastifiés (Whirl-Pak, 14 X 23 cm, capacité de 710 ml). Ces sacs servant de témoins pour les analyses physico-chimiques furent identifiés et placés dans une glacière.

## 2.4 Prélèvement des échantillons servant aux comptages cellulaires

Dans deux sacs de type Whirl-Pak stériles (7,6 X 17,8 cm, capacité de 180 ml) destinés à recevoir la neige provenant des deux sites témoins situés de part et d'autre de la tache d'algues, nous avons ajouté respectivement trois gouttes d'une solution de Lugol. Les deux sacs furent ensuite remplis au

tiers de neige et pétris de façon à ce que la neige soit bien humectée de la solution de Lugol. Dans un autre sac Whirl-Pak (7,6 X 17,8 cm, capacité de 180 ml) destiné à recevoir la neige contenant des algues, trois gouttes de la solution de Lugol furent ajoutées. Ce sac fut ensuite rempli au tiers de neige provenant de la tache d'algues et servit pour les fins de comptage cellulaire.

#### 2.5 Prélèvement des échantillons destinés aux analyses

Toujours en portant des gants et à l'aide d'une spatule plastifiée, nous avons recueillis dans deux sacs Whirl-Pak (14 X 23 cm, capacité de 710 ml) la neige contenant les algues pour les fins d'analyses de laboratoire. Les sacs identifiés furent ensuite placés dans une glacière.

#### 2.6 Prélèvement aux fins d'ensemencement

Une petite quantité de neige contenant des algues fut par la suite recueillie dans un sac Whirl-Pak (7,6 X 17,8 cm, capacité de 180 ml). Cette neige a servi aux ensemencements sur milieu de culture M-1 afin de faire croître ces algues en laboratoire. Ce sac identifié fut placé avec les autres sacs dans une glacière. Tous les sacs recueillis durant une journée d'échantillonnage furent conservés dans une glacière et acheminés le jour même au laboratoire de l'INRS-Eau à Sainte-Foy pour y être traités.

## 2.7 Mesures de paramètres physiques

Suite aux prélèvements des différents échantillons de neige, nous avons déterminé la vitesse d'écoulement de l'eau dans la neige. Pour ce faire, nous avons versé quelques gouttes de colorant alimentaire sur le couvert de neige à proximité du site de prélèvement et chronométré le temps pris par la coloration pour franchir une certaine distance. Comme l'épaisseur du couvert variait d'un lieu d'échantillonnage à un autre, nous avons établi que la distance à parcourir par le colorant devait se situer aux environs du tiers de la hauteur de neige du couvert.

L'utilisation d'un densimètre suédois (AB Produktionmater Stockholm) a permis de déterminer la densité du couvert à proximité des sites d'échantillonnage.

## 3. PREPARATION DES ECHANTILLONS DE TERRAIN POUR ANALYSES

### 3.1 Lavage des récipients

Afin d'éviter tout risque de contamination, tous les récipients destinés à recevoir les échantillons d'eau de fonte furent lavés avec une solution savonneuse, rincés à l'eau déminéralisée suivi d'un trempage de 24 heures à l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ , 15%). Suite à ce trempage, les différents récipients furent rincés à plusieurs reprises à l'eau déminéralisée et remplis du même type d'eau pour subir un autre trempage de 24 heures. Ils furent par la suite rincés plusieurs fois à l'eau ultrapure et remplis de cette eau jusqu'à leur utilisation. Au moment de leur emploi, ils subirent de nouveau des rinçages multiples à l'eau ultrapure.

### 3.2 Réception et préparation des échantillons

Dès l'arrivée des échantillons au laboratoire de l'INRS-Eau à Sainte-Foy, tous les sacs furent placés dans des bacs et entreposés à 4 °C à l'obscurité jusqu'au lendemain matin à l'exception d'un des deux sacs Whirl-Pak (14 X 23 cm, capacité de 710 ml) contenant la neige destinée aux diverses analyses et servant plus particulièrement au dosage de la chlorophylle-a. Ces sacs furent mis dans un bac et fondus à l'obscurité à une température d'environ 22 °C (température du laboratoire) afin de prévenir la dégradation de la chlorophylle. Le temps nécessaire à la fonte de ces échantillons était d'un peu plus de six heures.

### 3.3 Préparation des échantillons pour le dosage de la chlorophylle-a

Immédiatement après la fonte des sacs Whirl-Pak contenant la neige destinée au dosage de la chlorophylle-a, un volume de 200 ml d'eau de fonte, contenant les algues nivales, fut filtré à l'obscurité sur un filtre Whatman GFC (diamètre 5.5 cm) à l'aide d'un système de filtration en verre Millipore et sous un vide de 0,5 atm. Une fois la filtration terminée, les filtres furent enveloppés dans un carré de papier d'aluminium (15 cm X 15 cm), identifiés et conservés à une température de -40 °C jusqu'au dosage.

### 3.4 Préparation des échantillons pour les mesures de pH et de conductivité

Le lendemain suivant la réception des échantillons, 25 ml d'eau de fonte provenant des sacs témoins et de ceux contenant les algues nivales (Whirl-Pak, 14 X 23 cm, capacité de 710 ml) furent prélevés et versés dans des tubes de polycarbonate de 50 ml pour les fins de mesures de pH et de conductivité.

### 3.5 Filtration

L'eau de fonte destinée aux différentes analyses fut filtrée sur un filtre de polycarbonate Nuclepore (diamètre: 0,47 mm, porosité: 0,4  $\mu\text{m}$ ) sous un vide de 0,5 atm à l'aide d'un système de filtration Gelman en polysulfone. Le filtre fut posé à l'aide de pince de plastique et rincé avec environ 75 ml d'eau ultrapure. Après chaque filtration, le système fut rincé de multiples fois à l'eau ultrapure.

### 3.6 Préparation des échantillons pour le dosage de l'ATP

Pour déterminer la concentration d'adénosine triphosphate (ATP) présent dans les échantillons d'eau de fonte, nous avons utilisé une méthode d'extraction indirecte dans le but de contourner le problème d'inhibition enzymatique causée par les substances dissoutes présentes dans la fraction liquide de l'échantillon (Lefebvre et al. 1988). Un volume de 30 ml fut filtré sur un filtre de polycarbonate Nuclepore (diamètre: 0,47 mm, porosité: 0,4  $\mu\text{m}$ ) sous un vide de 0,5 atm à l'aide d'un système de filtration Gelman en polysulfone, et ce, dans le temps le plus court possible afin d'empêcher la transformation des molécules d'ATP.

Après la filtration, le filtre fut immédiatement placé dans un tube à vide à prélèvement sanguin (Vacutainer) contenant 4,5 ml de «diméthyl sulphoxide» (DMSO) et agité à l'aide d'un vortex pendant 40 secondes afin d'en extraire l'ATP. Suivant un temps de repos de 3 minutes, un volume de 5,5 ml de tampon MOPS («4-morpholinpropane sulphonic acid»; 10 mM, pH 7,4) fut ajouté. Les échantillons ainsi traités furent ensuite conservés au congélateur à une température de  $-40^{\circ}\text{C}$  jusqu'au dosage.

### 3.7 Préparation pour les autres analyses

Le reste de l'eau de fonte contenue dans le sac de l'échantillon témoin et du sac contenant les algues fut filtré. Un volume d'environ 60 ml de filtrat fut versé dans des bouteilles Nalgene (volume: 60 ml) pour l'analyse des anions et du carbone organique dissous. Un autre volume de 40 ml fut transvidé dans deux acuvettes (bouteilles Dilu-Vial, Fisher) pour donner respectivement des volumes de 20 ml. Le contenu de ces dernières fut ensuite acidifié avec 200  $\mu\text{l}$  d'acide nitrique Aristar ( $\text{HNO}_3$ , 0,5% v/v). Ces échantillons acidifiés ont servi pour le dosage des cations majeurs.

Finalement, un autre volume de 30 ml d'eau de fonte fut introduit dans une acuvette et acidifié par l'ajout de 60  $\mu\text{l}$  d'acide sulfurique Aristar ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0,2% v/v). Tous les échantillons ainsi préparés furent conservés à une température de  $4^{\circ}\text{C}$  jusqu'au moment de leur dosage respectif. Ces échantillons furent utilisés pour le dosage de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).

### 3.8 Préparation des échantillons destinés aux comptages cellulaires

Une fois que la neige contenant des algues nivales et imbibée de la solution de Lugol fut fondue, le contenu des sacs Whirl-Pak (7,6 X 17,8 cm, cap.: 180 ml) fut transvidé dans un contenant en verre de 20 ml. Ces bouteilles furent gardées à l'obscurité et à la température de la pièce jusqu'au moment du comptage cellulaire.

## 4. ANALYSES

### 4.1 Mesure de conductivité

Les mesures de conductivité furent prises à 25 °C immédiatement après la fonte des échantillons à l'aide d'un conductivimètre Radiometer, modèle CDM 2e.

### 4.2 Mesure de pH

Le pH fut mesuré à 25 °C à l'aide d'un pH-mètre Radiometer, modèle PHM 26, immédiatement après avoir pris les mesures de conductivité. L'appareil fut calibré quotidiennement à l'aide de deux solutions tampons certifiées (Fisher Scientific) ayant respectivement un pH de  $7.00 \pm 0.01$  et  $4.00 \pm 0.01$  à une température de 25 °C.

#### 4.3 Dosage des anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ )

Le dosage des anions inorganiques chlorures, nitrates, phosphates et sulfates fut effectué dans un délai de 48 heures suivant le prélèvement des échantillons par chroma-tographie ionique. L'appareil utilisé fut un chromatographe ionique Dionex AutoIon 12, pourvu d'une colonne anionique Dionex HPIC AS3 et d'une pré-colonne anionique Dionex HPIC AG3, couplé à un enregistreur Shimadzu CR-3A. Les limites de détection étaient de: 0,040 mg/l pour  $\text{NO}_3^-$ , 0,015 mg/l pour  $\text{Cl}^-$ , 0,020 mg/l pour  $\text{SO}_4^{2-}$  et 0,060 mg/l pour  $\text{PO}_4^{3-}$ .

#### 4.4 Dosage des cations majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{K}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ )

Les cations majeurs calcium, potassium, magnésium et sodium furent dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme grâce à un spectrophotomètre Varian, modèle AA-20, à l'intérieur d'une période de trois mois. Dans le cas du calcium et du potassium, l'ajout d'une solution de Na (100 g/l de Na) comme supprimeur à tous les échantillons, à raison de 1 ml par 100 ml d'eau de fonte, a permis d'empêcher l'ionisation du Ca et du K sous l'effet de la flamme acétylène-oxyde nitreux et acétylène-air pour le calcium et le potassium respectivement. La limite de détection pour le calcium est de 0,005 mg/l et de 0,004 mg/l pour le potassium.

Pour ce qui est du magnésium et du sodium, une solution de lanthane-césium (3,16 g de CsCl dans 100 ml d'une solution commerciale pour absorption atomique de  $\text{LaCl}_3$  à 10% p/v en lanthane) fut ajoutée aux échantillons pour atténuer l'effet d'ionisation à raison de 2 ml pour chaque 100 ml d'échantillon d'eau de fonte. La limite de détection pour ces deux cations

#### 4.5 Dosage de l'azote ammoniacal

La concentration de l'ion ammonium fut mesurée par colorimétrie à l'aide d'un auto-analyseur Technicon II. Cette méthode utilise la réaction de Berthelot où le phénol et l'hypochlorite de sodium réagissent avec l'azote ammoniacal pour former un composé de couleur bleuâtre, l'indophénol, dont la concentration est proportionnelle à celle de l'ammoniaque. La coloration est amplifiée par l'ajout de nitroprussiate de sodium. Un agent complexant, l'éthylènediamine tétra acétate de sodium (EDTA), fut ajouté afin de prévenir la précipitation des hydroxydes de métaux lourds tels que le calcium et le magnésium. Le seuil de détection pour l'azote ammoniacal fut de 0,1 mg N/l.

#### 4.6 Dosage du carbone organique dissous (C.O.D.)

La détermination du carbone organique dissous fut effectuée à l'aide d'un auto-analyseur Technicon IV couplé à un conductivimètre Radiometer, modèle CDM 3 et à un enregistreur Radiometer REC 80 Servograph. Cette méthode nécessite l'élimination du carbone inorganique présent dans l'échantillon sous la forme de bicarbonate, de carbonate et d'acide carbonique. Ce pré-traitement automatisé est obtenu en combinant de l'acide sulfurique à l'échantillon afin de ramener tout le carbone inorganique sous la forme d'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ). Les étalons utilisés provenaient d'une solution mère (100 mg/l de C) de biphthalate de potassium anhydre ( $C_8H_5KO_4$ ) et possédaient respectivement des concentrations en carbone organique dissous de 20, 15, 10, 5, 2 et 1 mg/l. La mesure de C.O.D. fut effectuée dans un délai de 48 heures après le prélèvement des échantillons.

#### 4.7 Mesure de la concentration de la chlorophylle-a

La mesure de la concentration de chlorophylle-a dans les échantillons d'eau de fonte fut effectuée à l'aide d'un spectrofluorimètre Turner avec une longueur d'onde d'excitation de 420 nm et de fluorescence de 670 nm. La décomposition de la chlorophylle-a par perte de magnésium donne la phéophytine qui interfère lors de la mesure en émettant de la fluorescence dans la même région spectrale que la chlorophylle-a. Cette interférence est corrigée en mesurant la fluorescence avant et après acidification des échantillons, ce qui transforme la chlorophylle-a en phéophytine.

Au moment de l'analyse, les filtres Whatman GF/C, conservés au congélateur à  $-40^{\circ}\text{C}$ , furent placés dans une éprouvette de verre contenant 3 ml d'acétone 90% et broyés au moyen d'un broyeur-homogénéiseur à tige de téflon pendant une minute en l'absence de lumière. Suite au broyage des filtres, le liquide fut transvidé dans un tube à centrifugation en polypropylène gradué de 15 ml. Le volume fut complété à 10 ml avec de l'acétone 90%. Chaque tube à centrifugation fut protégé de la lumière et placé à  $4^{\circ}\text{C}$  pendant une nuit afin de permettre l'extraction de la chlorophylle-a.

Le lendemain, après avoir réalisé une courbe d'étalonnage du fluorimètre avec des étalons de concentration de  $200\ \mu\text{g/l}$ ,  $100\ \mu\text{g/l}$  et  $50\ \mu\text{g/l}$  de chlorophylle-a, les tubes furent centrifugés à 3000 rpm pendant 10 minutes. Le surnageant fut transvidé dans un tube à analyse en borosilicate pour une mesure de fluorescence. Ensuite, chaque échantillon a reçu un volume de  $100\ \mu\text{l}$  de HCl 5%, et après un temps de repos de 2 minutes, la fluorescence fut à nouveau mesurée. En reportant

sur la courbe d'étalonnage du fluorimètre la différence de fluorescence de chaque échantillon, on obtient la concentration en chlorophylle-a. La limite de détection de cette méthode se situe à 0,0002  $\mu\text{g/l}$ .

#### 4.8 Dosage de l'ATP

La concentration d'ATP fut déterminée par bioluminescence à l'aide du système enzymatique luciférine-luciférase (Sigma, product No. FL-AA). Les molécules d'ATP réagissent avec la luciférine et la lumière émise est mesurée à l'aide d'un luminomètre LKB 1219 dont le seuil de détection est de l'ordre de  $5 \times 10^{-6}$  M d'ATP.

#### 4.9 Dénombrement cellulaire

La numération cellulaire fut effectuée à l'aide d'un hématimètre Neubauer. Cet hématimètre se compose d'une lame de verre épaisse et d'une lamelle. A deux endroits sur la lame sont gravés des quadrillages (réseaux) vis-à-vis lesquels sont comptées les cellules algales sous le microscope. Un petit volume de chaque échantillon contenant du Lugol fut introduit dans chaque chambre de l'hématimètre par capillarité.

Sous le microscope (500 X), le dénombrement fut réalisé dans chacune des deux chambres, chaque chambre étant constituée de quatre sections de seize carrés. Chaque section du réseau possède un volume de  $10^{-4}$  ml. Pour obtenir le nombre moyen de cellules par ml pour une section, il faut multiplier par 10 000 le nombre obtenu. Comme l'hématimètre Neubauer a 8 sections, le compte global des cellules divisé par huit donne le nombre de cellules par ml contenu dans chaque échantillon.

Le tableau 3 résume les différentes méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques utilisées.

**TABLEAU 3:** Méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques des échantillons d'eau de fonte.

PARAMETRES	METHODOLOGIE	TYPE D'APPAREIL
Conductivité	Electrométrie	Conductivimètre Radiometer, modèle CDM 2e
pH	Electrométrie	pH-mètre Radiometer, modèle PHM 26
Anions (Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Chromatographique	Chromatographe ionique Dionex AutoIon 12
Cations majeurs (Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> )	Absorption atomique	Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme Varian (AA-20)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Colorimétrie	Auto-analyseur Technicon II
C.O.D.	Electrométrie	Auto-analyseur Technicon IV
Chlorophylle-a	Fluorimétrie	Spectrofluorimètre Turner
ATP	Enzymatique	Luminomètre LKB 1219
Dénombrement cellulaire	Comptage visuel	Hématimètre Neubauer

## 5. ENSEMENCEMENT A PARTIR DES ECHANTILLONS

L'ensemencement fut effectué sur milieu solide et liquide. Le milieu de culture utilisé fut le milieu M-1 mis au point par Hoham et al. (1979) et dont sa composition est présentée à l'annexe 1. A l'aide d'une boucle à inoculer, un inoculum provenant des échantillons destinés à l'ensemencement fut utilisé pour ensemenecer les milieux solide et liquide.

Les géloses et les erlenmeyers furent placés dans une chambre de croissance (Fisher, modèle 307) à une température de 4 °C avec une photopériode de 16:8 (lumière:obscurité). L'intensité lumineuse maintenue dans l'enceinte de croissance fut d'environ 150 pieds-bougies, c-à-d de 31  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  fournis par 2 fluorescents de 60 cm «cool white». Cette intensité lumineuse correspond à celle retrouvée sous la voûte forestière lors de l'apparition des algues nivales (Hoham 1976).

## 6. EXPERIENCES DE LABORATOIRE

La neige servant aux différentes expériences fut prélevée pendant l'hiver 1989 en milieu ouvert à la station expérimentale de la forêt Montmorency et conservée en chambre froide à une température de -10 °C dans des contenants plastifiés (Rubbermaid, capacités de 77.3 l) sellés hermétiquement. Avant son utilisation, cette neige fut ameublie et homogénéisée.

Tout le matériel utilisé lors des diverses expériences et destiné à recevoir la neige fut lavé avec une solution d'acide chlorhydrique à 10% (v/v), rincé à l'eau déminéralisée et trempé pour une période de 24 heures dans une solution d'HCl

10%. Après plusieurs rinçages à l'eau déminéralisée, le matériel a subi un trempage de 24 heures dans l'eau déminéralisée suivit de multiples rinçages à l'eau déminéralisée. La présence de contaminant anionique fut vérifiée en analysant des échantillons d'eau provenant du trempage à l'eau déminéralisée. Avant d'y introduire la neige, tout le matériel fut placé à  $-10^{\circ}\text{C}$  pour une période de 24 heures.

### 6.1 Croissance des algues nivales en simulateur de fonte

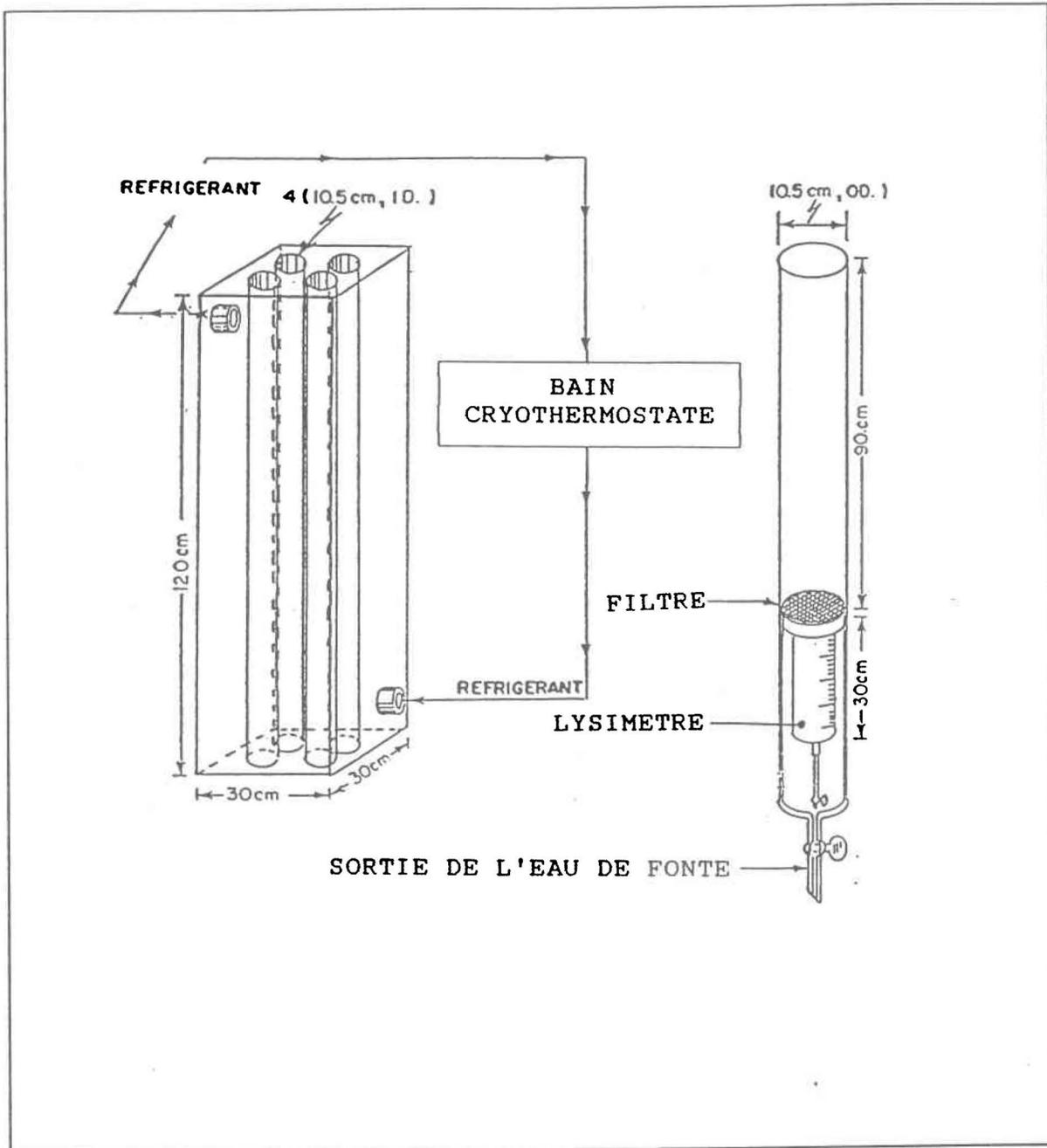
Pour tenter de faire croître des algues nivales lors d'une fonte contrôlée en laboratoire, nous avons utilisé un simulateur de fonte fait de plexiglass (figure 4). Cet appareil consiste en un compartiment de réfrigération où peuvent être insérées quatre colonnes de plexiglass, chacune étant munie d'un lysimètre à son extrémité. Les quatre colonnes peuvent être remplies de neige et la température du compartiment principal peut y être maintenue à la température désirée à l'aide d'un bain cryothermostaté de marque Hakke (modèle C/F3) avec une solution eau-antigel (5:1) comme réfrigérant).

Deux colonnes (colonnes #1 et #2) furent remplies de neige seule. Quant aux deux autres (colonnes #3 et #4), elles furent remplies de neige enrichie de matières organiques en proportion équivalente à ce qu'on retrouve dans le couvert de neige en milieu forestier boréal à raison de 0,66 gramme d'écorces d'Abies balsamea, 0,66 gramme de feuilles d'Abies balsamea et 0,18 gramme d'écorces de Picea glauca et de Betula papyrifera pour un total de 1,5 gramme pour chaque trois litres de neige (Germain, communication personnelle). L'équivalent en eau de chaque colonne de neige était d'environ 360 mm.

Aux colonnes #2, #3 et #4, un inoculum d'algues nivales (vol. 0,55 ml, conc. de 900 000 cell./ml) recueillies au lac Laflamme lors de la fonte printanière de 1989 et conservées en chambre de croissance dans le milieu liquide M-1, fut ajouté à la neige à mi-hauteur des colonnes lors du remplissage.

Chaque colonne fut introduite dans le simulateur où la température du réfrigérant était maintenue à 0.1 °C. Les colonnes furent recouvertes d'une pellicule de cellophane (marque Handi-Wrap) afin d'éviter toute contamination de la neige par la déposition de particules ou l'adsorption de gaz provenant de l'air ambiant du laboratoire. Des mesures d'absorbance de cette pellicule dans les longueurs d'onde du spectre d'absorption des pigments photosynthétiques ont indiquées une absorption négligeable à ces longueurs d'onde. La lumière nécessaire à l'activité photosynthétique des algues fut fournie par deux fluorescents de 40 watts (Power Twist de DuraLite) fournissant environ  $31 \text{ umol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (150 pieds-bougies), intensité lumineuse retrouvée sous la voûte forestière lors de l'apparition des algues nivales (Hoham 1976). La photopériode fut fixée à 15:9 (lumière:obscurité) en conformité avec celle existant au mois de mai au lac Laflamme.

Pour simuler aussi bien que possible les conditions naturelles prévalant lors de la fonte printanière, les colonnes furent hissées de leur compartiment respectif à tous les jours de façon à ce que la surface de la neige soit toujours située à la jonction entre l'air du laboratoire et le compartiment de réfrigération afin de permettre la fusion de la neige. L'eau de fonte accumulée dans les lysimètres de chaque colonne fut prélevée à chaque 24 heures jusqu'à la disparition complète de la neige pour fin d'analyses physico-chimiques.

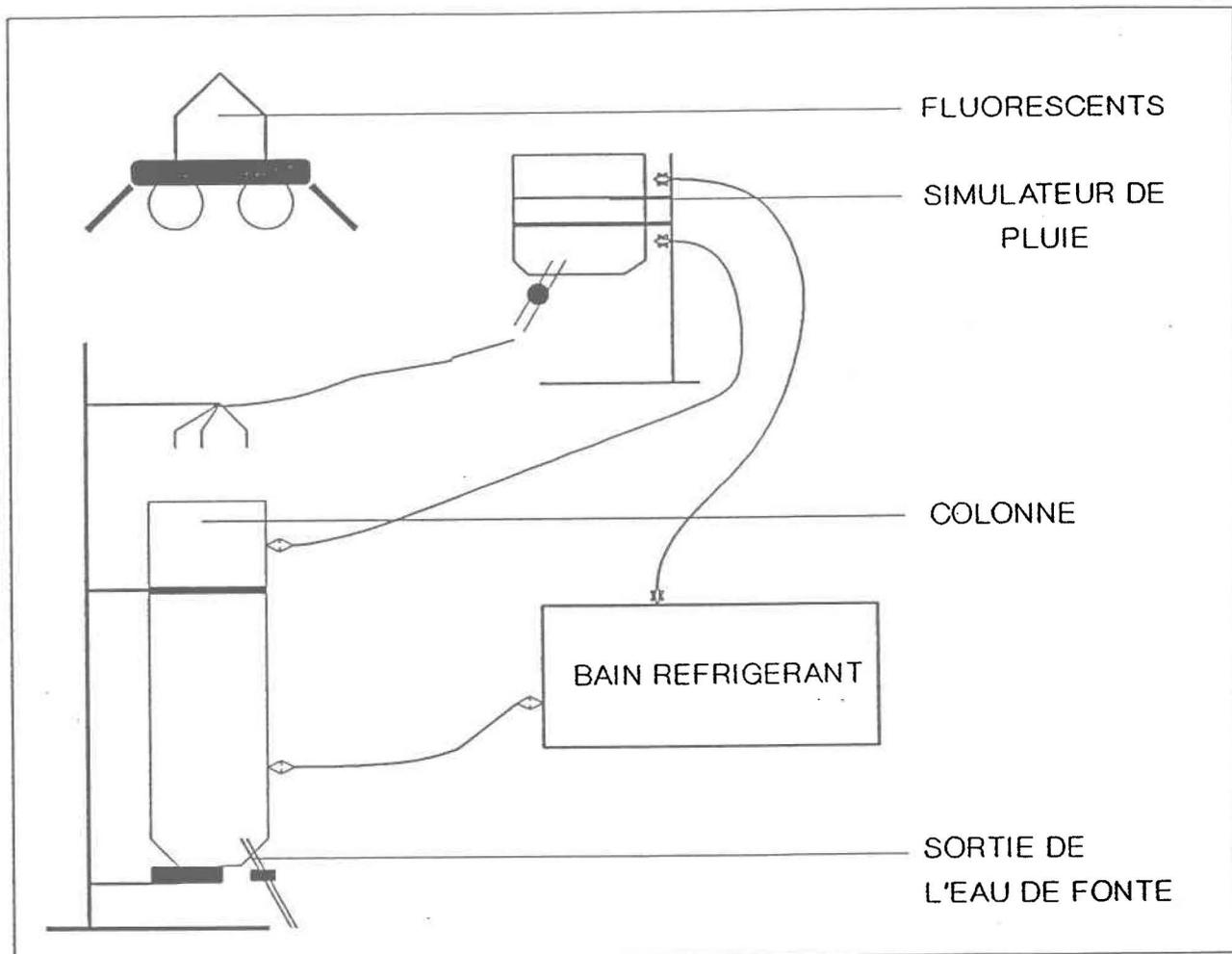


**FIGURE 4:** Montage expérimental utilisé lors de la croissance des algues nivales en simulateur de fonte.

## 6.2 Croissance des algues nivales dans une colonne de neige

Dans le but de faire croître des algues nivales en laboratoire afin d'observer une floraison algale donnant une coloration verte à la neige, nous avons tenté de recréer les conditions similaires à celles existantes au lac Laflamme au printemps 1989 dans une petite colonne de verre (ACE Glass, capacité de 2 l) à double parois permettant la circulation d'un liquide réfrigérant et pourvue d'une sortie à son extrémité inférieure. Nous avons remplis cette colonne avec de la neige traitée de la même manière que dans l'expérience de croissance en simulateur de fonte. L'ouverture supérieure fut laissée dégagée pour permettre un échange de chaleur avec le milieu environnant. La circulation du réfrigérant (méthanol-eau, 1:9) et le maintien d'une température de 0.5 °C fut assurés par l'utilisation d'un bain circulant de marque Hotpack, modèle 603-340 (figure 5).

L'inoculum introduit à mi-hauteur de la colonne provenait des populations recueillies au lac Laflamme lors de la fonte printanière de 1989 et conservées en laboratoire. Un volume de 2,5 ml (concentration de 2 250 000 cellules/ml) fut ainsi inoculé à la neige. La lumière fut fournie par deux fluorescents «coolwhite» de 40 cm et placés au-dessus de la colonne de façon à ce que l'intensité lumineuse soit d'environ  $31 \text{ } \mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . La photopériode fut la même que celle observée sur le terrain, c'est-à-dire de 15:9 (lumière:obscurité). A mesure que progressait la fonte, l'eau issue de la fusion de la neige était évacuée par le bas de la colonne.



**FIGURE 5:** Montage expérimental utilisé lors de la croissance des algues nivales dans une colonne de neige afin de visualiser une floraison algale.

Deux jours après le début de l'expérience, une pluie intermittente d'une intensité de 8 ml/heure pendant 12 heures fut simulée. L'appareil utilisé pour simuler une pluie est constitué d'un contenant fait de deux couches de plexiglass entre lesquelles circulait un liquide réfrigérant et d'un robinet à son extrémité inférieure permettant d'ajuster l'intensité de la pluie artificielle. Le simulateur de pluie fut relié au bain réfrigérant de façon à ce que la température de la solution contenue à l'intérieur du simulateur soit près de 0 °C. De cette manière, la température de la pluie artificielle sortant du simulateur n'excédait pas 4 à 5 °C. Tout le matériel fut entouré de laine isolante afin de minimiser l'échange de chaleur avec le milieu environnant.

Cette pluie artificielle fut de composition chimique semblable à celle observée pour une pluie sous le couvert forestier au lac Laflamme. Le tableau 4 résume sa composition. Suivant cette première pluie, nous avons simulé une autre pluie deux jours plus tard avec cette fois une intensité de 8 ml/heure pendant une période de 10 heures. Quarante-huit heures après, ce fut au tour d'une pluie ayant une intensité de 5 ml/heure durant un temps de 10 heures. L'expérience fut arrêtée après la fusion complète du stock de neige présent initialement dans la colonne.

**TABLEAU 4:** Composition chimique d'une pluie sous couvert forestier au lac Laflamme selon Papineau (1987).

ESPECES CHIMIQUES	CONCENTRATION $\mu\text{eq/l}$
$\text{H}^+$	39,8
$\text{Ca}^{2+}$	24,9
$\text{Mg}^{2+}$	10,7
$\text{Na}^+$	13,0
$\text{K}^+$	19,8
$\text{NH}_4^+$	trace
$\text{SO}_4^{2-}$	73,6
$\text{NO}_3^-$	0,2
$\text{Cl}^-$	17,2
$\text{PO}_4^{3-}$	7,8

#### IV. RESULTATS ET DISCUSSION

##### 1. RESULTATS DE TERRAIN

###### 1.1 Conditions environnementales

La présence d'algues nivales dans le couvert de neige au lac Laflamme au cours du printemps 1989 fut observée pour la première fois le 6 mai. Cette floraison algale provoquait l'irruption de taches verdâtres visibles à la surface du couvert. Des taches de couleur jaunâtre furent aussi observées. Ce phénomène s'est estompé avec la disparition du couvert de neige. Les premiers échantillons furent recueillis le 7 mai et les derniers le 20 mai. La figure 6 montre une coupe transversale du couvert de neige contenant des algues nivales.

Les algues nivales retrouvées dans le couvert de neige pendant cette période appartiendraient au genre Chloromonas et s'apparenteraient à l'espèce Chloromonas polyptera comb. nov. (Hoham, communication personnelle). La figure 7 présente des photographies au microscope des algues nivales retrouvées au lac Laflamme en mai 1989. Les cellules sont de forme légèrement allongée avec des largeurs de 5 à 8  $\mu\text{m}$  et des longueurs de 10 à 15  $\mu\text{m}$ .

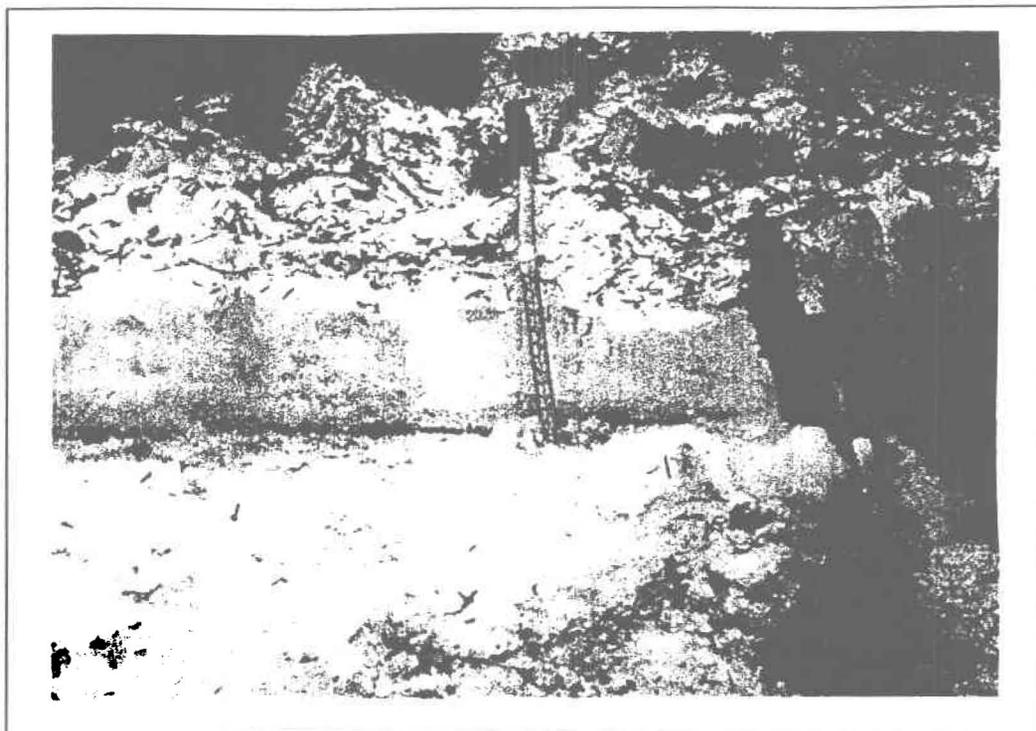
Selon Hoham (1980), dans les régions tempérées des latitudes nordiques, la présence des algues ne devient visible qu'en avril et/ou mai dans les basses élévations comme au lac Laflamme et qu'en juin et/ou juillet dans les hautes élévations. A cette période de l'année, la température de l'air demeure au-dessus du point de congélation causant la fusion du couvert de neige. Il en résulte un écoulement de l'eau de fonte vers le sol. Ceci engendre la germination des zygo-

spores à l'interface neige-sol. D'autres facteurs tels que la lumière, la photopériode, la disponibilité des éléments nutritifs, et les gaz dissous sont également important.

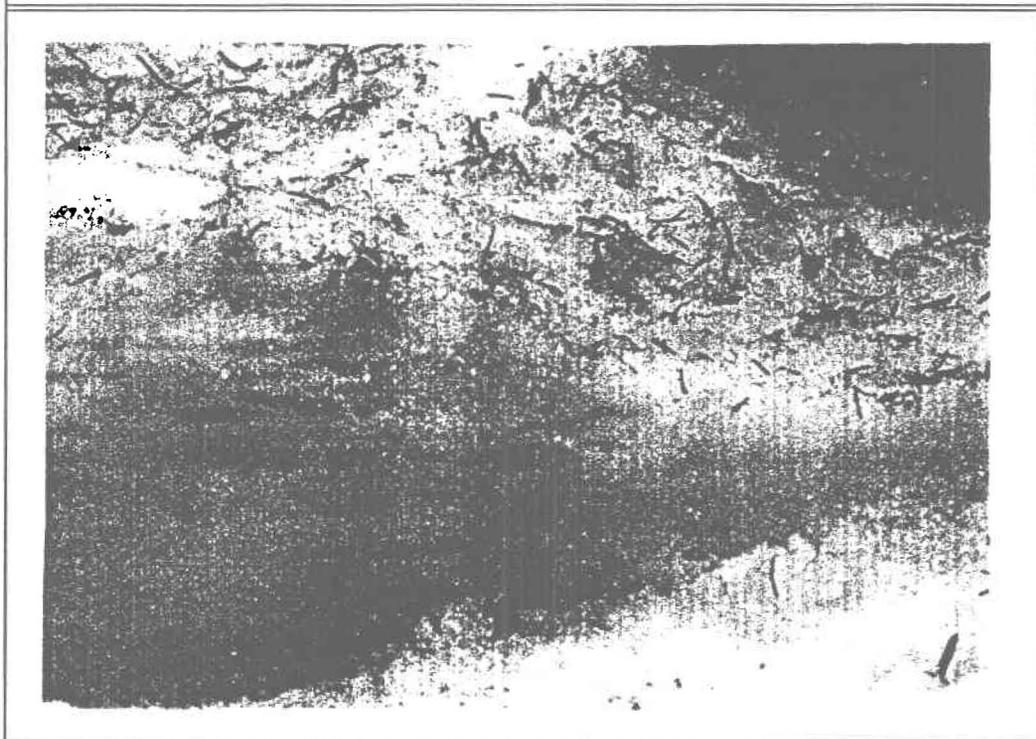
En plus des algues nivales, le champignon de neige Chionaster nivalis (Bohl.) Wille fut aussi identifié lors des observations au microscope ainsi que l'algue associée aux lichens, Trebouxia (Germain, comm. pers.) Ses interactions avec le milieu sont peu connues (Hoham et al. 1989). Néanmoins, il puise probablement ses éléments nutritifs des algues, des bactéries et de la matière organique (Hoham et al. 1989).

Durant la période d'échantillonnage, la température de l'air, enregistrée à la station Montmorency située en clairière à quelques centaines de mètres du bassin versant du lac Laflamme, variait de  $-3.0^{\circ}\text{C}$  à  $26.0^{\circ}\text{C}$ . A ce temps de l'année, la photopériode était approximativement de 15 heures de lumière et 9 heures d'obscurité). Pendant ces deux semaines, des précipitations de 84.3 mm de pluie furent mesurées à la station Montmorency et il n'y a eu aucune chute de neige. Il faut noter également la forte pluie (45.0 mm) enregistrée le 6 mai. On peut voir à la figure 8 un aperçu des conditions météorologiques prévalant lors de la période d'échantillonnage. Il est fort probable que la forte pluie du 6 mai ait favorisé la germination des zygospores en lessivant beaucoup d'éléments nutritifs de la voûte forestière et des débris présents à la surface du couvert.

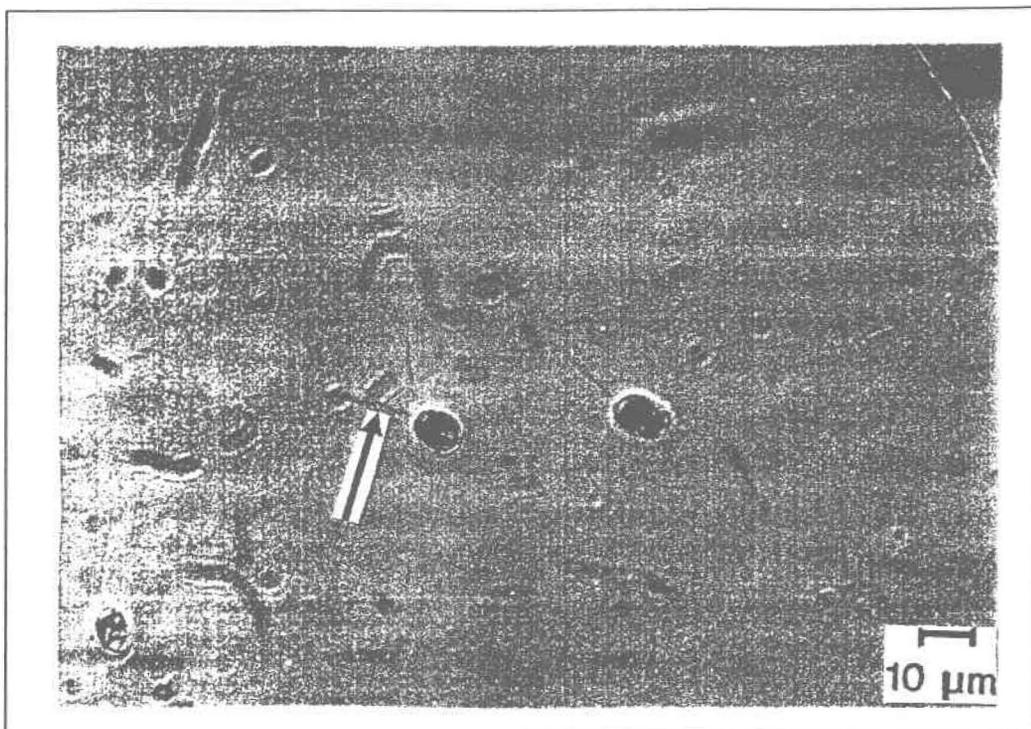
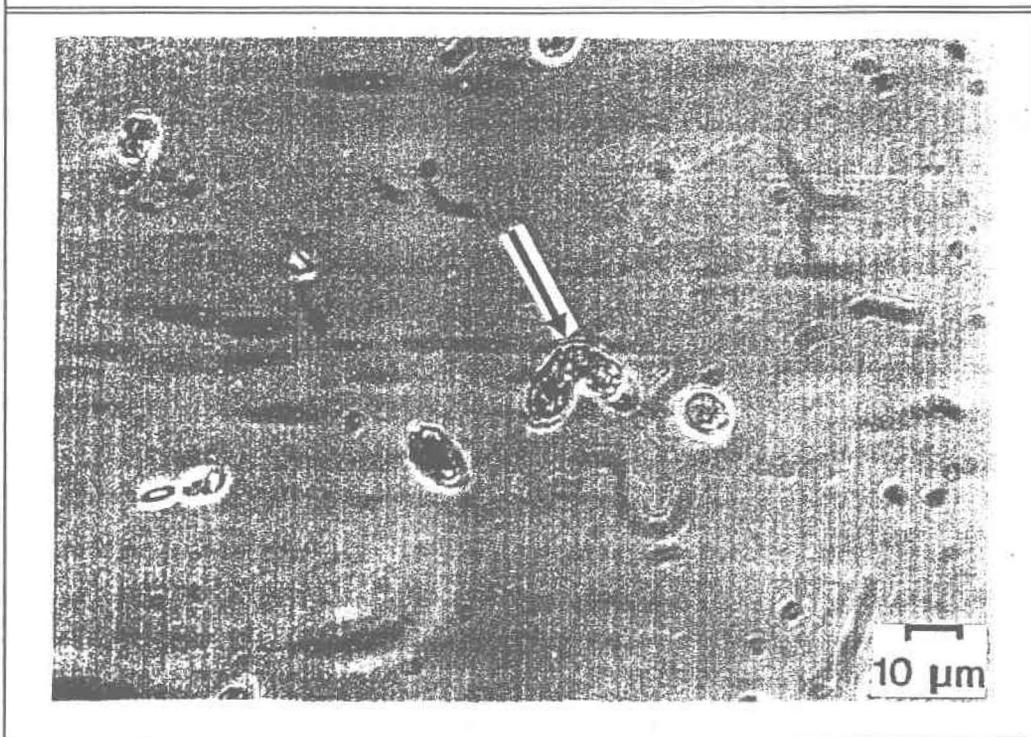
A:



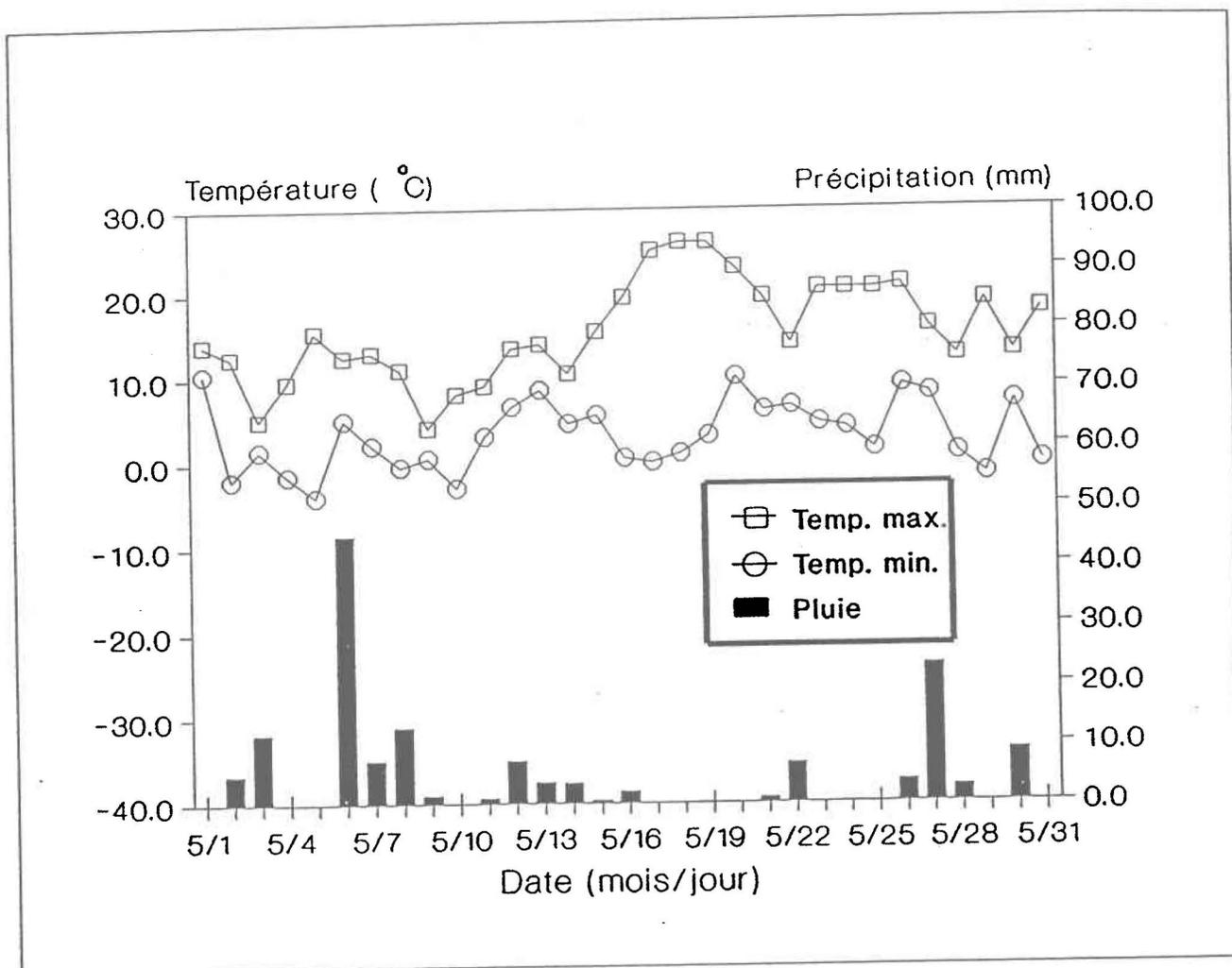
B:



**FIGURE 6:** Coupes transversales du couvert de neige contenant des algues nivales. En A, on voit des bandes verticales de neige colonisée par des algues nivales. En B, une tache verticale diffuse (au centre) contenant des algues. Notez la surface de la neige couverte par des débris.

**A:****B:**

**FIGURE 7:** Photographies au microscope (400 X) des algues nivales recueillies dans le couvert de neige au lac Laflamme en mai 1989 et préservées dans une solution de Lugol. En A, la flèche indique un flagelle. En B, la flèche montre deux cellules en reproduction anisogamme.



**FIGURE 8:** Conditions météorologiques enregistrées à la station Montmorency du 1er mai au 31 mai 1989 (source: Forêt Montmorency, Environnement Québec)

La presque totalité des endroits où furent retrouvés les algues nivales étaient localisés sous la voûte forestière sur les côtés nord et sud du bassin versant du lac Laflamme. Ce fait est en accord avec ce que rapporte la littérature où les neiges vertes occasionnées par la présence d'algues nivales étaient caractéristiques des couverts de neige ombragés (Hoham et Blinn 1979; Hoham 1971; Pollock 1970; Kol 1968; Fukushima 1963).

La hauteur du couvert de neige où furent retrouvés les algues nivales variait de 9 à 50 cm. Les algues furent observées à une profondeur variant de 1 à 50 cm sous la surface du couvert. Le tableau 5 résume les caractéristiques physiques et microbiologiques du couvert où des échantillons de neige colonisée par des algues nivales furent prélevées. L'annexe 2 présente l'ensemble des données résumé dans le tableau 5. Verticalement, la présence visible des algues s'étendait sur une distance variant de 4 à 20 cm, soient sous forme de taches diffuses, ou plus rarement, sous forme de bandes horizontales ou verticales.

Dans les Adirondacks (WhiteFace Mountains, E.U.), la présence de neige verte était associée avec des bancs de neige résiduelle ayant habituellement moins de 40 cm de profondeur. La presque totalité des populations algales furent trouvées dans les neiges situées sur les pentes orientées vers le nord et ombragées par la voûte forestière (Hoham 1987).

Dans l'ouest des Etats-Unis, les espèces Chloromonas brevispina et Chloromonas nivalis, qui croissent généralement ensembles dans les mêmes conditions environnementales, sont fréquemment retrouvées dans les couverts de neige ayant une profondeur de 30 à 100 cm et situés près ou sous la voûte

forestière (Hoham et Blinn 1979, Hoham et al. 1979). Dans des couverts de neige de l'état de Washington entre 1973 et 1976 où l'espèce Chloromonas polyptera était dominante, Hoham (1983) a mesuré des profondeurs variant de 10 à 30 cm. Dans d'autres couverts de l'Arizona et du Montana où la même espèce était prédominante, les profondeurs variaient entre 5 et 35 cm (Hoham 1983).

La vitesse d'écoulement de l'eau dans le couvert déterminée à certains sites d'échantillonnage variait de 2,0 à 7,0 cm/min. Dans l'ouest américain, Hoham (1983) a observé dans le couvert de neige contenant des algues nivales appartenant à l'espèce Chloromonas polyptera des vitesses d'écoulement de l'eau de fonte de l'ordre de 15 à 25 cm/heure. Ces différences entre la vitesse d'écoulement observée au lac Laflamme et celle de l'ouest du continent peuvent s'expliquer par la mésostructure physique différente de la neige au sol dans l'ouest du continent nord-américain, et surtout par la présence de macropores sous la voûte forestière au lac Laflamme (Jones 1986).

Le contenu en eau de la neige (densité) se situait autour de 40 à 60%. La lumière pouvait alors pénétrer facilement dans le couvert de neige. Certains auteurs rapportent que la lumière peut pénétrer jusqu'à 110 cm sous la surface du couvert (Curl et al. 1972; Hoham 1975b). Hoham et al. (1982) ont observé dans des congères de neige du sud-ouest américain que les zygotes de Chloromonas polyptera germaient plus tard que ceux de Chloromonas nivalis, Chloromonas brevispina et Chloromonas pichincae. Selon ces auteurs, comparativement aux autres espèces nivales du genre Chloromonas, les zygotes de C. polyptera sembleraient exiger pour initier leur germination, une intensité lumineuse plus élevée et des conditions

de plus grande saturation en eau. Il apparaît donc y avoir une succession algale.

**TABLEAU 5:** Résumé des caractéristiques physiques et microbiologiques moyennes du couvert de neige au lac Laflamme où furent prélevés des échantillons de neiges contenant des algues nivales. La période de prélèvement s'échelonne du 07/05/89 au 20/05/89.

CARACTERISTIQUES	MOYENNE	MINIMUM	MAXIMUM
Hauteur du couvert (cm)	26.2	9.0	50.0
Nombre de cellules/ml	154 183	30 000	640 000
Vitesse d'écoulement de l'eau de fonte (cm/min)	4.00	2.14	7.00
Température de l'air (°C)	9.4	-3.0	26.0
Précipitation pluie (mm)	6.0	0.0	12.9
Précipitation neige (mm)	0.0	0.0	0.0

## 1.2 Paramètres physico-chimiques et biologiques du couvert

Nous avons effectué des analyses physico-chimiques et biologiques sur des échantillons de neige colonisée par les algues nivales 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. L'annexe 3 présente l'ensemble des données se rapportant aux différentes caractéristiques physico-chimiques et biologiques de l'eau de fonte des échantillons de neige avec et sans algues nivales recueillis au lac Laflamme en mai 1989. Les échantillons avec algues portent une numérotation numérique. Les échantillons sans algue correspondants (témoins) portent une numérotation alphanumérique. Un total de 49 sites furent échantillonnés.

Il faut garder à l'esprit que les mesures physico-chimiques furent effectuées sur l'eau de fonte des échantillons de neige et que la fonte de ces derniers s'est effectuée dans le temps le plus bref possible (entre 5 et 6 heures). Cependant, il est possible que dans ce temps de latence entre le prélèvement des échantillons de neige contenant des algues nivales et la filtration des échantillons d'eau de fonte, les algues nivales aient pu modifier d'une façon ou d'une autre la qualité physico-chimique de l'eau de fonte. Il est très difficile, voir presque impossible, de pouvoir réaliser des mesures physico-chimiques sur les échantillons de neige avec algues dans un temps plus rapide (c'est-à-dire avec apport calorifique) sans faire éclater les cellules algales. L'éclatement de ces cellules modifierait la qualité physico-chimique de l'eau de fonte.

A l'aide d'un test t de Student pour échantillons appariés, nous avons comparé les moyennes des données physico-chimiques des échantillons de neige avec et sans algues (tableau 6). Notons que seulement 44 des 49 sites furent retenus parce qu'il n'a pas été possible d'y recueillir d'échantillon témoin (échantillons #20, 21, 27, 32, 42). Des différences significatives furent observées dans le cas de la densité cellulaire, la concentration des nitrates, de l'ammonium, des sulfates, ainsi qu'au niveau de la conductivité.

Aucune concentration de chlorophylle-a et d'ATP ne fut déterminée pour les échantillons de neige sans algue en raison de la trop faible densité algale. Ceci aurait demandé d'énormes volumes d'eau de fonte et des temps de filtration considérables.

**TABLEAU 6:** Comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés sur les échantillons de neige avec et sans algues déterminées par un test t de Student pour échantillons appariés (n = 44).

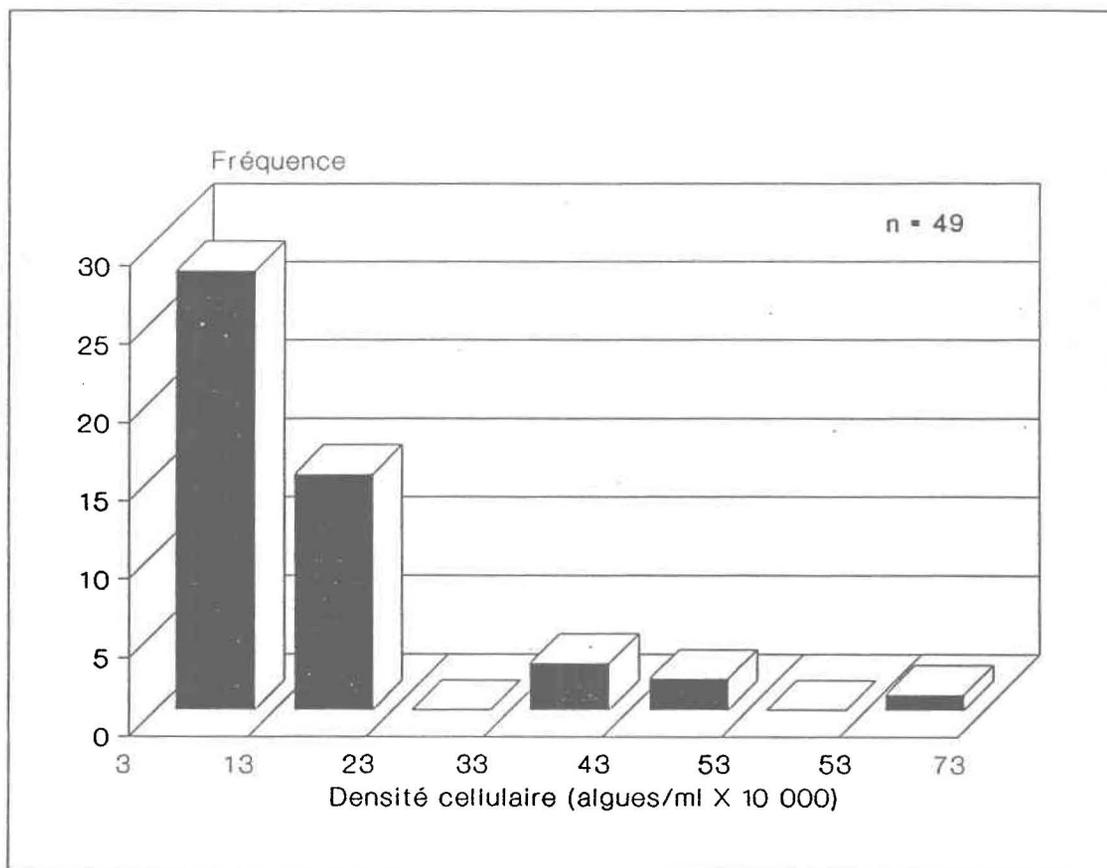
PARAMETRES	MOYENNES ± ECARTS TYPES		DIFFERENCE A 1%
	Avec algues	Sans algue	
Cellules/ml	153 807 ± 141 394	4233 ± 3146	<b>OUI</b>
*pH	5.04 ± 0.14	5.00 ± 0.15	non
*Cond. (µmhos/cm)	6.090 ± 2.291	7.330 ± 2.096	<b>OUI</b>
H <sup>+</sup> (µéq/l)	9.728 ± 3.737	10.509 ± 3.724	non
Cl <sup>-</sup> (µéq/l)	3.592 ± 1.713	3.993 ± 1.341	non
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µéq/l)	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	non
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µéq/l)	2.382 ± 3.198	9.256 ± 4.673	<b>OUI</b>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (µéq/l)	4.100 ± 2.940	7.808 ± 3.506	<b>OUI</b>
Ca <sup>2+</sup> (µéq/l)	3.366 ± 1.286	3.589 ± 1.386	non
Na <sup>+</sup> (µéq/l)	3.274 ± 3.614	2.898 ± 1.442	non
Mg <sup>2+</sup> (µéq/l)	1.487 ± 1.181	1.580 ± 0.974	non
K <sup>+</sup> (µéq/l)	3.457 ± 2.913	3.545 ± 2.870	non
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µéq/l)	4.796 ± 3.274	9.216 ± 4.168	<b>OUI</b>
C.O.D. (mg/l)	1.542 ± 1.204	1.281 ± 1.021	non
Chl-a (µg/l)	23.102 ± 7.462	-	-
ATP (µg/l)	3.496 ± 1.237	-	-

\* à 25 °C.

### Densité cellulaire

La concentration moyenne d'algues nivales dans les échantillons avec algues fut de 153 807 cellules/ml d'eau de fonte. La plus faible concentration retrouvée dans ces échantillons fut de 30 000 cellules/ml et la plus grande de 640 000 cellules/ml. La figure 9 présente l'histogramme de la distribution de fréquence de la densité algale retrouvée dans les échantillons de neige colonisée par des algues nivales. On peut y voir que la grande majorité des échantillons possèdent une densité cellulaire se situant entre 30 000 et 230 000 cellules/ml. Deux échantillons (#1 et #44) possédaient la plus grande densité cellulaire parmi tous ceux recueillis (517 000 et 640 000 algues/ml respectivement). Pour ces deux échantillons, la hauteur du couvert de neige où ils furent prélevés n'atteignait que 9 cm. Ces fortes densités algales peuvent être attribuées à un effet de concentration suite à l'ablation du couvert de neige.

Les échantillons de neige colonisée par des algues nivales lors d'une recherche de Germain (1991) au printemps 1988 au lac Laflamme montraient des densités algales supérieures à 200 000 cellules/ml d'eau de fonte. Dans les Whiteface Mountains dans l'est des Etats-Unis, cette concentration atteint 270 000 cellules/ml (Hoham 1987; Hoham et Blinn 1979; Hoham et al. 1979). Dans l'ouest du continent américain, la concentration de cellules engendrant une floraison algale donnant une coloration verte à la neige atteint 500 000 à 1 000 000 algues/ml d'eau de fonte. La densité d'algues nivales dans l'est de l'Amérique du Nord ne représente donc que seulement 25 à 60% du dénombrement algal maximal rapporté pour les neiges verdâtres de l'ouest du continent.



**FIGURE 9:** Distribution de la densité algale des échantillons de neige contenant des algues nivales.

Pour les échantillons de neige servant de témoin et ayant été prélevés dans le couvert où la présence de floraison algale n'était pas visible, le dénombrement cellulaire moyen était de 4233 algues/ml d'eau de fonte. Il s'étendait de 0 à 15 000 cellules/ml. L'échantillon témoin de concentration cellulaire maximale fut prélevé au site #1 où la hauteur n'atteignait que 9 cm. Il est probable que cette forte valeur soit attribuable à un effet de concentration dû à l'ablation du couvert de neige. Tous les autres échantillons témoins présentaient une densité cellulaire inférieure à 10 000 algues/ml d'eau de fonte.

Dans certains échantillons témoins, la présence d'algues nivales a pu affecter la physico-chimie de l'eau de fonte. Cependant, à priori il était impossible de s'assurer que la neige prélevée comme témoin était exempte de toute présence d'algue nivale. La densité cellulaire minimale provoquant une floraison algale visible dans le couvert de neige au lac Laflamme en mai 1989 était donc de 30 000 algues/ml d'eau de fonte. En deçà de cette concentration algale, la présence visible des algues nivales dans la neige n'était pas possible.

#### Chlorophylle-a et ATP

Le rapport entre les concentrations moyennes d'ATP et de chlorophylle-a dans les échantillons de neige colonisées par les algues nivales au lac Laflamme était de 0,15. Dans la littérature scientifique, chez les algues, ce rapport s'établit à 0,22 (Jorgensen 1979). Le rapport ATP/chl-a est très variable chez les algues pour des raisons physiologiques telles que l'état nutritionnel et l'adaptation à l'intensité solaire (Bold et Wynne 1978).

Pour les échantillons avec algues, en comparant la concentration d'ATP versus le nombre de cellules, nous obtenons un rapport de  $2,3 \times 10^{-14}$  g/cellule. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle donnée par la littérature chez les algues ( $3,7 \times 10^{-13}$  g/cellule; Jorgensen 1979).

Quant à la concentration de la chlorophylle-a versus la densité cellulaire des échantillons de neige contenant des algues nivales au lac Laflamme, nous obtenons un rapport de  $1,5 \times 10^{-13}$  g/cellule comparativement à  $2,2 \times 10^{-12}$  g/cellule chez les algues en général (Jorgensen 1979).

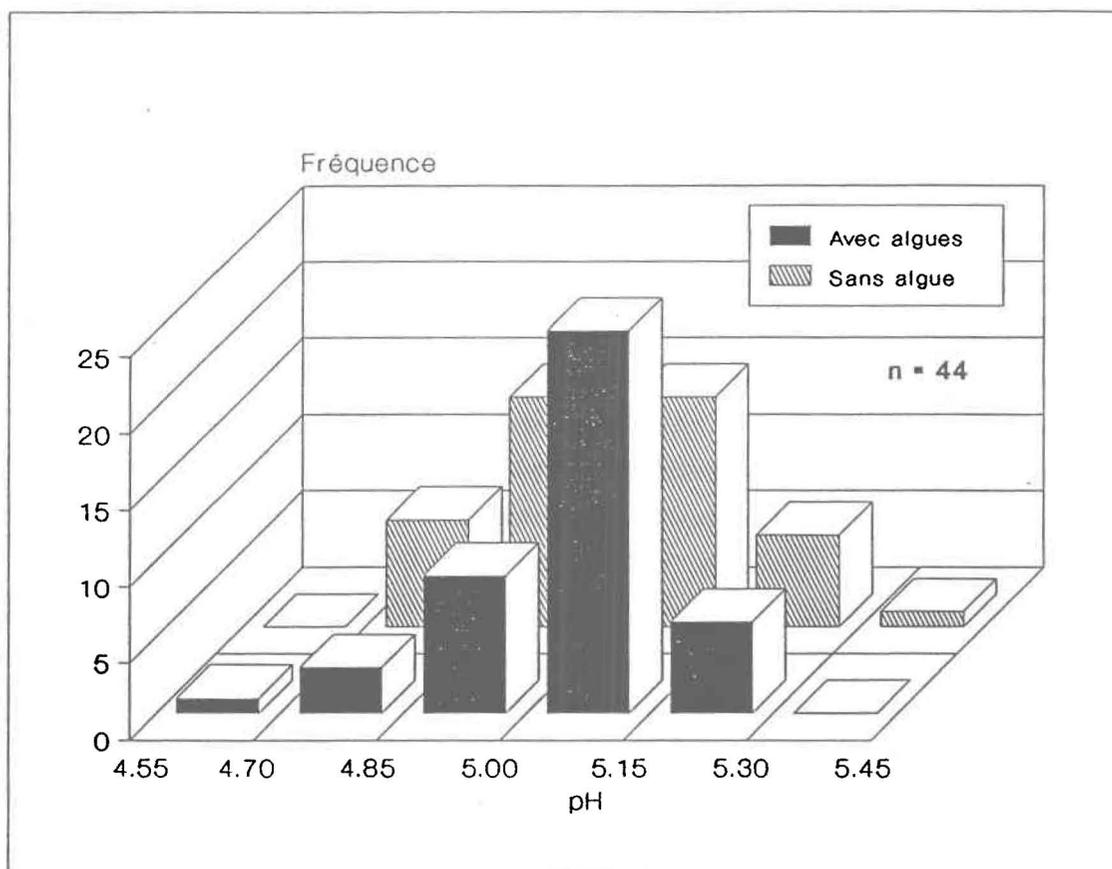
C'est donc dire que dans les échantillons de neige colonisées par des algues nivales au lac Laflamme en mai 1989, les rapports ATP/cellule, chlorophylle-a/cellule et ATP/chlorophylle-a se situent dans le même ordre de grandeur que ceux rapportés dans la littérature.

### pH

Le pH moyen de l'eau de fonte des échantillons de neige contenant des algues nivales mesuré à 25 °C fut de 5.04. Pour ce type d'échantillon, le pH variait de 4.59 à 5.27. Dans le cas des échantillons témoins, le pH moyen était de 5.00 et variait de 4.70 à 5.33. Un test de Kolmogorov-Smirnov pratiqué sur les deux distributions du pH de l'eau de fonte pour les échantillons avec et sans algues indique qu'il n'existe aucune différence significative entre ces deux distributions au seuil de 5%. La figure 10 présente la distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur pH.

Lors d'une étude préliminaire en 1987 effectuée par Hoham (1987) dans les Whiteface Mountains (état de New York), les deux échantillons de neige colonisés par des algues nivales appartenant au genre Chloromonas montraient un pH plus basique que les échantillons témoins recueillis au même endroit (site #1: 5.87 vs 5.63; site #2: 5.17 vs 4.98). Comme ces échantillons furent prélevés en fin d'après-midi, Hoham attribua ces différences à la consommation de CO<sub>2</sub> durant le processus de photosynthèse dans les échantillons contenant les algues nivales. Germain (1991) a également obtenu des valeurs de pH plus basiques dans les échantillons de neige contenant des algues au lac Laflamme au printemps 1988.

Dans l'ouest américain, le pH de l'eau de fonte des neiges colonisées principalement par l'espèce Chloromonas polyp-tera était de 4.9 en Arizona, entre 4.7 et 5.2 au Montana et entre 5.0 et 5.1 dans l'état de Washington (Hoham 1983). Dans ce même état où Chloromonas pichincha (Lagerh) Wille était prédominante, le pH de l'eau de fonte variait de 4.9 à 5.2 (Hoham et al. 1989; Hoham 1971). Kol (1941) rapporte des pH de l'ordre de 5.5 à 6.5 pour l'eau de fonte provenant de neiges vertes recueillies un peu partout en Europe. Au Japon, la neige verte due à la présence d'algues nivales montrait un pH variant de 4.2 à 4.8 (Kobayashi et Fukushima 1952).



**FIGURE 10:** Distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur pH.

Dans une étude sur la neige provenant de l'Archipel du Spitzberg (Svalbard, océan Arctique, nord-est du Grönland) et colonisée par l'espèce Chlamydomonas nivalis (Bauer) Wille, Newton (1982) rapporte que les algues nivales abaissent le pH à 6.2 dans la neige qu'ils occupent. Le plus bas pH mesuré dans la neige sans algue était de 6.8.

Le pH de la neige est un facteur pouvant affecter la croissance des algues nivales. Selon Lewin (1962), les espèces d'algues trouvées dans la neige varient avec le pH de la neige. Selon cet auteur, les différences de pH peuvent être dues: 1) au type de roc sous la neige; 2) aux matières transportées par le vent et/ou aux précipitations acides accumulées dans le couvert; 3) à l'activité biologique et/ou à la décomposition de la matière organique.

Kol (1941) et Sieminska (1951) ont proposé eux-aussi que le pH de l'eau de fonte était le facteur principal régularisant la distribution des espèces d'algues dans la neige. Ils ont suggéré que les étendues de neige où se retrouvent ces micro-organismes soient classifiées de silicotrophique (pH 4.5 à 5.8) et de calcitrophique (pH 6.0 à 6.5). Plus tard, Kol (1968) a proposé un type intermédiaire de neige (pH 5.7 à 6.2). Cette classification repose sur le fait que le roc en-dessous du couvert de neige influencerait le pH de la neige et l'espèce d'algue nivale pouvant y croître. Kol (1968) a de plus suggéré que plusieurs espèces de Chloromonas et de Chlamydomonas étaient restreint à un ou deux types de neige. Puisque le mouvement de l'eau de fonte à l'intérieur du couvert de neige est gravitationnel ou latéral (Jones 1985), il est difficile de voir comment le roc sous-jacent peut influencer le pH de la neige.

Fukushima (1963) a vérifié la théorie de Kol et Sieminska au Japon et a trouvé que les espèces d'algues nivales étaient distribuées selon l'exposition au soleil et non selon le type de roc sous la neige. Il rapporte dans son étude des neiges rouges et vertes sur un roc neutre (probablement le type intermédiaire de Kol, c'est-à-dire de pH 5.7 à 6.2), des neiges verdâtres dans des endroits ombragés, et des neiges rougeâtres dans les lieux complètement exposés au soleil. Garric (1965) a également conclu que la théorie silicotrophique-calcitrophique de Kol n'était pas valide pour expliquer la distribution dans la neige des espèces algales dans le nord-ouest des Etats-Unis. Il a plutôt suggéré que le degré d'illumination était sans doute le facteur prédominant.

Tout comme au lac Laflamme, dans les autres sites du monde le pH de l'eau de fonte de la neige colonisée par des algues nivales est acide. C'est donc dire que ces algues cryophiles vivent dans un milieu acide et peuvent être définies comme des micro-organismes acidophiles (Hoham 1985). Bien que Hoham et al. (1989) et Germain (1991) observent une tendance vers des pH de l'eau de fonte plus élevés lorsque des algues nivales du genre Chloromonas sont présentes, nos résultats montrent de façon statistique que les algues retrouvées au lac Laflamme, et appartenant au même genre, ne modifient pas le pH de l'eau de fonte de la neige où elles se retrouvent.

Par contre, Newton (1982) a constaté que le pH de la neige rougeâtre colonisée principalement par l'espèce Chlamydomonas nivalis dans l'Archipel du Svalbard était plus bas que dans les neiges non colonisées. Selon cet auteur, cette espèce d'algue affecterait le pH de l'eau de fonte par la

production de composés organiques solubles dans le milieu. Allen (1965) a montré que six espèces de Chlamydomonas excrétaient des composés organiques oxydables tels que des acides organiques et des polysaccharides.

Les résultats de Newton sont en opposition avec ceux de Hoham et al. et de Germain (1991) tandis que nos résultats indiquent de façon statistique qu'il n'y a pas de différence. Une explication plausible est que les neiges considérées dans ces études n'étaient pas colonisées par le même genre d'algue (Chloromonas vs Chlamydomonas) d'une part, et que d'autre part les études de Newton, Germain et de Hoham et al. ne portaient pas sur un nombre de sites qui était statistiquement valable.

### Conductivité

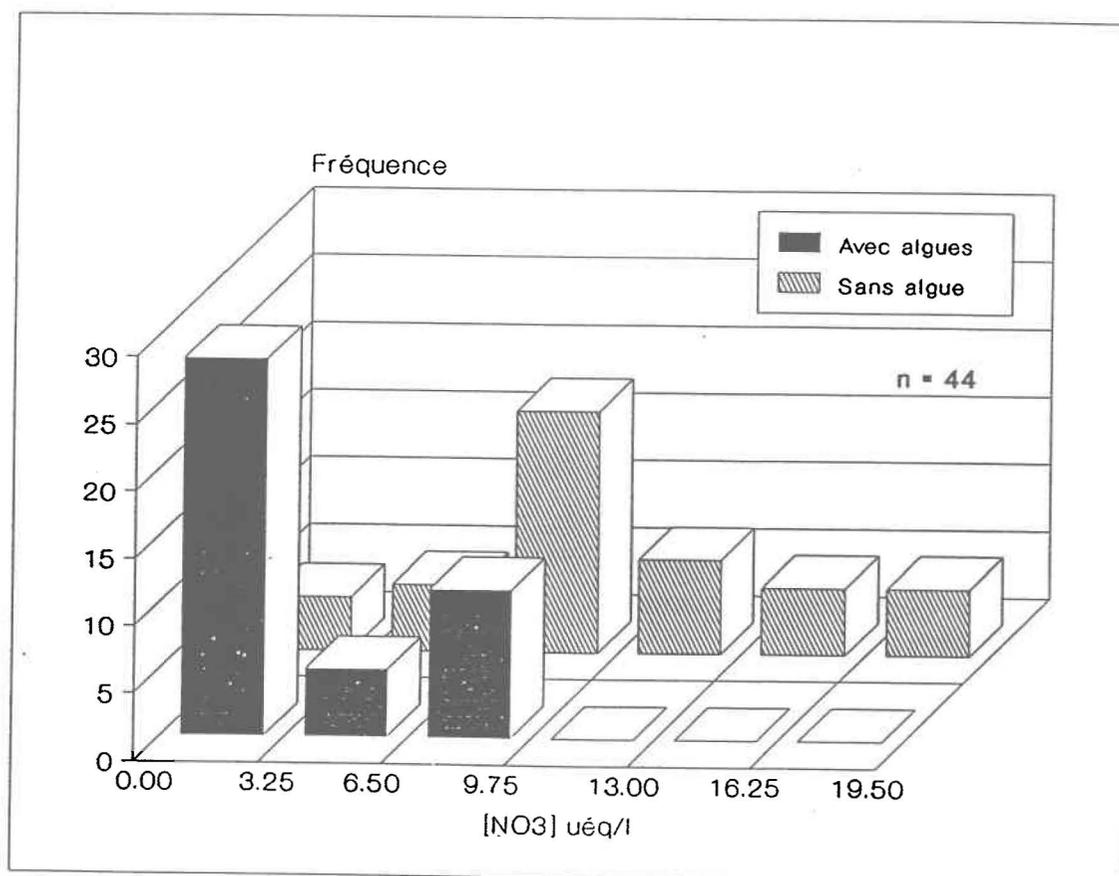
Les résultats du tableau 7 montrent qu'il existe une différence significative dans la conductivité de l'eau de fonte des échantillons de neige avec et sans algues. Les échantillons avec algues présentent une conductivité moyenne de 6.09  $\mu\text{mhos/cm}$  tandis qu'elle est de 7.33  $\mu\text{mhos/cm}$  pour les échantillons témoins. Les pertes de certaines espèces chimiques dans la neige colonisée par les algues nivales tels que les nitrates et l'ammonium expliquent cette différence.

Lors de son étude préliminaire dans les Adirondacks, Hoham (1987) a observé une diminution de la conductivité dans les échantillons contenant des algues nivales appartenant au genre Chloromonas. Germain (1991) a observé la même tendance au lac Laflamme au printemps 1988.

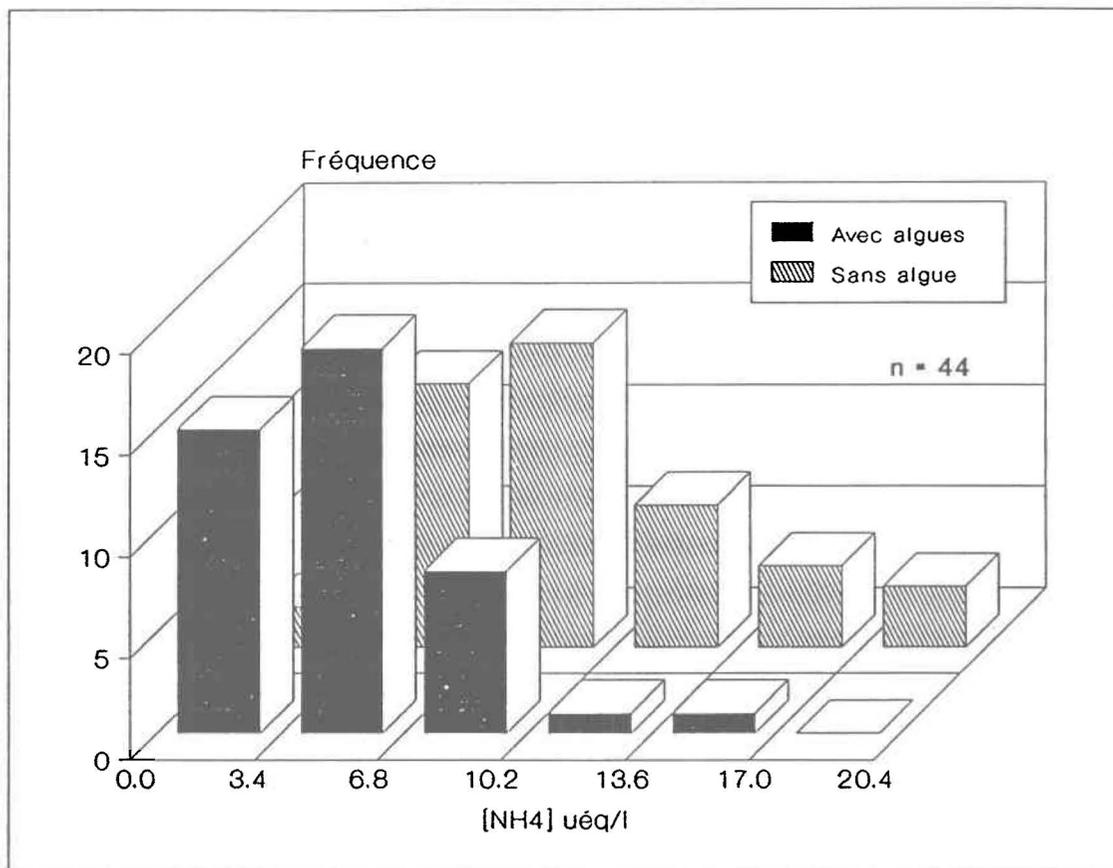
### Composés azotés $\text{NO}_3^-$ et $\text{NH}_4^+$

Les concentrations de nitrate et d'ammonium montrent des valeurs moyennes significativement plus faibles (à 0.01) dans les échantillons de neige où la présence d'algues nivales fut observée. Les histogrammes de la distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leurs concentrations en nitrate et ammonium montrent bien les différences significatives obtenues lors du test t pour échantillons appariés (figures 11 et 12). Pour les nitrates, un test de Kolmogorov-Smirnov nous a permis d'observer que les deux distributions sont significativement différentes au seuil de 5%. Il en est de même pour l'ammonium. La concentration moyenne de nitrate dans l'eau de fonte pour les échantillons de neige contenant des algues nivales fut de  $2.382 \mu\text{éq/l}$  en comparaison de  $9.256 \mu\text{éq/l}$  pour les échantillons témoins. La concentration moyenne d'ammonium fut de  $4,769 \mu\text{éq/l}$  pour les échantillons de neige colonisés par les algues contre  $9.216 \mu\text{éq/l}$  pour les témoins.

Une variété de composés azotés, inorganiques ou organiques, peuvent servir de source d'azote pour la croissance des algues. La capacité d'utiliser le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), le nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) ou l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) semblent être généralisée chez les algues. Un taux de croissance maximal similaire est observé avec le  $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{NH}_4^+$  comme source d'azote (Richmond 1986). Lorsque les algues sont alimentées avec du nitrate et de l'ammonium comme seule source d'azote, le  $\text{NO}_3^-$  est souvent inutilisé jusqu'à ce que tout le  $\text{NH}_4^+$  ait disparu (Flores et al. 1980; Pistorius et al. 1978; Eppley et al. 1969; Syrett et Morris 1963). Cette situation est expliquée par le fait que l'ammonium est le produit final de la réduction du nitrate et cause une inhibition négative ainsi qu'une répression du système enzymatique responsable de l'assimilation du nitrate et de sa réduction (Richmond 1986).



**FIGURE 11:** Comparaison de la distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur concentration en  $\text{NO}_3^-$ .



**FIGURE 12:** Comparaison de la distribution de fréquence des échantillons de neige avec et sans algues en fonction de leur concentration en  $\text{NH}_4^+$

Les algues nivales ont aussi la capacité elle-aussi d'utiliser des sources d'azote organique et inorganique pour leurs besoins nutritifs. Par exemple en laboratoire, Hoham (1971) a montré que Chloromonas pichincha pouvait assimiler une source inorganique ( $\text{NH}_4^+$  sous forme de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) et une source organique (acide-L-glutaminique,  $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$ ). Cependant, la littérature ne rapporte que très peu de chose sur les besoins nutritifs des algues nivales dans la neige, tant au niveau des composés azotés qu'au niveau des autres éléments nutritifs essentiels à leur croissance.

Germain (1991) ainsi que Hoham et al. (1989) rapportent aussi une diminution des composés azotés nitrate et ammonium dans les neiges colonisées par l'algue nivale appartenant au genre Chloromonas. Jones et Deblois (1987) lors d'une étude sur les bilans hydrochimiques des eaux de fonte collectées à l'aide de lysimètres au lac Laflamme et dans des conditions contrôlées de laboratoire, ont noté une diminution des espèces ioniques azotées ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) dans la neige lorsque le contenu en eau de la neige était important. Ces auteurs suggèrent que des processus microbiologiques soient à l'origine de cette diminution. Selon ces mêmes auteurs, les micro-organismes métabolisant ces formes azotées seraient des micro-épiphytes, des lichens, des algues, des bactéries et des champignons associés aux débris organiques présents dans la neige.

Très peu d'études portant sur les bilans hydrochimiques des composés azotés dans le couvert de neige furent effectuées (Jones 1987). Ainsi, des pertes de  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  dans le couvert de neige en période froide furent rapportées par Jeffries et Snyder (1981). Ces auteurs attribuèrent ces diminutions à une migration physique vers le sol des espèces ioniques  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ . Aucun mécanisme de nature biologique ne fut proposé pour expliquer ces pertes.

Cadle et al. (1984) conclurent que l'espèce  $\text{NO}_3^-$  était stable dans le couvert avant la fonte sous une voûte forestière de cèdres mais que la stabilité de l'espèce  $\text{NH}_4^+$  était incertaine. Cependant, aucune perte de ces ions dans le couvert de neige ne fut observée lors de la période de fonte. Barry et Price (1987) rapportèrent des pertes de nitrate pendant la fonte lors d'une étude sous le couvert forestier d'arbres à feuilles caduques.

Les résultats obtenus lors de notre étude montrent que les algues nivales semblent assimiler les composés azotés sous forme de  $\text{NO}_3^-$  et de  $\text{NH}_4^+$  comme source d'éléments nutritifs dans la neige où elles se retrouvent. Les algues nivales du lac Laflamme semblent préférer les nitrates à l'ammonium. Dans les échantillons de neige recueillis comme témoin, la concentration moyenne de  $\text{NH}_4^+$  est légèrement inférieure à la concentration de  $\text{NO}_3^-$  (9.216  $\mu\text{éq/l}$  vs 9.256  $\mu\text{éq/l}$ ) tandis que les échantillons de neige colonisés par les algues nivales montraient une concentration moyenne de  $\text{NO}_3^-$  nettement inférieure à celle de  $\text{NH}_4^+$  (2.382  $\mu\text{éq/l}$  vs 4.796  $\mu\text{éq/l}$ ).

De plus, dans bien des cas, les échantillons de neige avec algues possédaient des concentrations de  $\text{NO}_3^-$  inférieures à la limite de détection des méthodes utilisées tandis que les concentrations de  $\text{NH}_4^+$  étaient presque toujours au-dessus de cette limite. Cela semble donc montrer que les algues nivales "préfèrent" le nitrate à l'ammonium.

Cette consommation de nitrate de la part des algues nivales accroît le pH de l'eau dans laquelle elles vivent. Ceci entraîne donc une diminution de l'acidité de l'eau de

fonte. A l'inverse, l'assimilation de l'ammonium par ces micro-organismes diminue le pH de la neige d'où une augmentation de l'acidité.

La consommation des deux seules sources importantes d'azote dans ce biotope engendre deux phénomènes antagonistes au niveau de l'acidité de l'eau de fonte. Par conséquent, la présence d'algues nivales ne semble pas influencée directement l'acidité et ceci explique les résultats obtenus lors des mesures de pH où ce dernier était semblable à celui des échantillons témoins (5.04 vs 5.00).

Mais est-ce que la diminution des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) est apparente ou réelle ? C'est-à-dire est-ce qu'elle est le résultat de la présence des algues nivales ou de l'action d'un lessivage engendré par un écoulement préférentiel de l'eau de fonte ? Comme les algues nivales croissent dans des endroits où la neige a un contenu en eau élevée et qu'il existe dans le couvert des macropores se gorgeant d'eau lors de la fonte printanière, il est possible que cette perte soit imputable à un lessivage préférentiel de ces espèces ioniques azotées dans les endroits où se retrouvaient les algues et que ce phénomène ne se soit pas produit là où les échantillons témoins furent recueillis.

Si tel était le cas, l'espèce ionique  $\text{Cl}^-$  considérée comme conservatrice dans le couvert de neige et l'eau de fonte (Skartveit et Gjessing 1979) devrait normalement montrer des concentrations moyennes significativement différentes entre les échantillons de neige avec algues et sans algue suite à ce lessivage préférentiel. Or, ce n'est pas ce qu'on observe.

La concentration moyenne des échantillons de neige colonisée par les algues nivales ne montrent pas de différence significative (à 0.01) avec celle des échantillons témoins (3.592  $\mu\text{éq/l}$  vs 3.993  $\mu\text{éq/l}$ ).

La diminution de la concentration des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) est donc une réduction réelle causée par la présence des algues nivales. Il est à noter que la présence d'algues nivales fut aussi observée, quoiqu'en nombre restreint (< 15 000 cellules/ml), dans les échantillons témoins. Ceci suggère qu'il existe peu de différences physiques entre les endroits où furent prélevés la neige colonisée par des algues et les sites où furent recueillis la neige servant de témoin (situés à moins de 30 cm du site de prélèvement des échantillons de neige contenant des algues).

L'annexe 4 présente la moyenne des différents paramètres mesurés à chaque jour d'échantillonnage. Les figures 13 et 14 présentent l'évolution temporelle des concentrations moyennes des composés azotés  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ . Il faut noter que la journée du 20 mai 1989 n'apparaît pas parce qu'un seul échantillon fut prélevé ce jour-là. On peut voir que la concentration moyenne des nitrates et de l'ammonium est toujours plus élevée dans les échantillons sans algues qu'avec algues. Dans le cas des échantillons de neige colonisée par les algues, on note qu'entre le 8 et le 14 mai, la concentration moyenne des composés azotés ne suit pas la même configuration que celle des échantillons témoins. Par rapport aux échantillons de neige sans algue, les échantillons de neige colonisée par les algues nivales montrent durant cette période une diminution de leur teneur en azote. Après le 14 mai, la concentration moyenne des échantillons avec algues suit la même variation que celle des témoins.

Hoham et al. (1989) expliquent que ce phénomène pourrait être attribuable à un changement de phase dans le cycle vital des algues nivales. Entre ces deux périodes, l'algue Chloromonas serait passée de la phase végétative nécessitant une utilisation importante de composés azotés à une phase "post-sexuée" où les cellules nécessitent peu d'azote pour leur croissance. De plus, parmi d'autres phénomènes, on doit souligner l'apport possible de  $\text{NO}_3^-$  et de  $\text{NH}_4^+$  de la voûte coniférienne par la pluie ainsi qu'une perte possible lors de périodes de fonte.

On ne peut voir de relation entre l'utilisation de l'azote et le type de cellules présentes. La raison est que nous avons effectué qu'un compte global de toutes les cellules, c'est-à-dire que nous n'avons pas comptabilisé le nombre d'algues de tous les stades cellulaires présents. La tâche aurait été trop longue et ardue.

Il est donc évident que les espèces ioniques azotées  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  sont assimilées durant la photosynthèse lors de la période de croissance des algues nivales. Lors de la photosynthèse, l'utilisation de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) couplée à la métabolisation du nitrate augmente le pH des eaux naturelles (Stumm et Morgan 1981). Dans le cas des algues nivales, Hoham et al. (1989) ont remarqué des valeurs de pH de l'eau de fonte plus élevées quand le  $\text{CO}_2$  était consommé durant la photosynthèse.

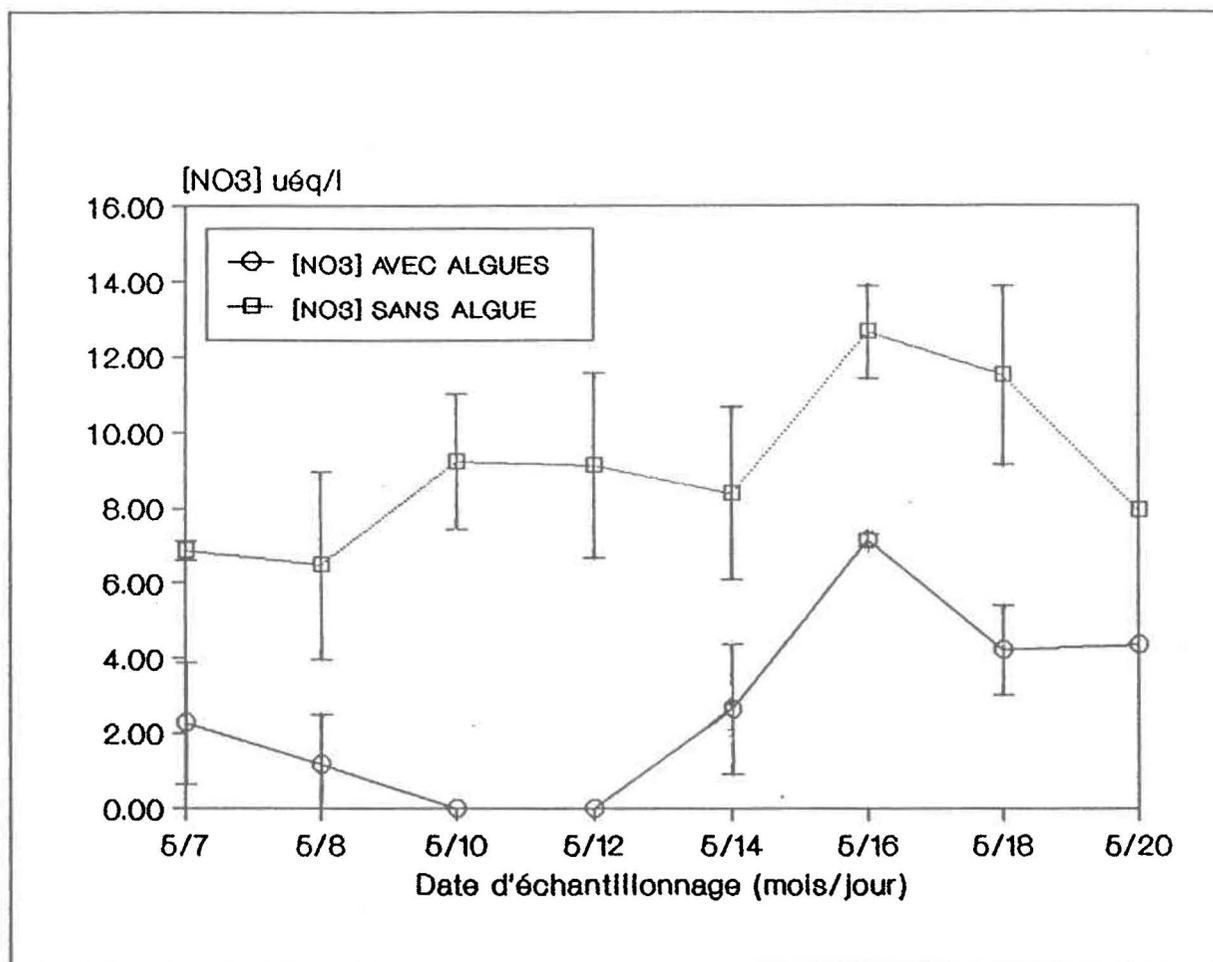
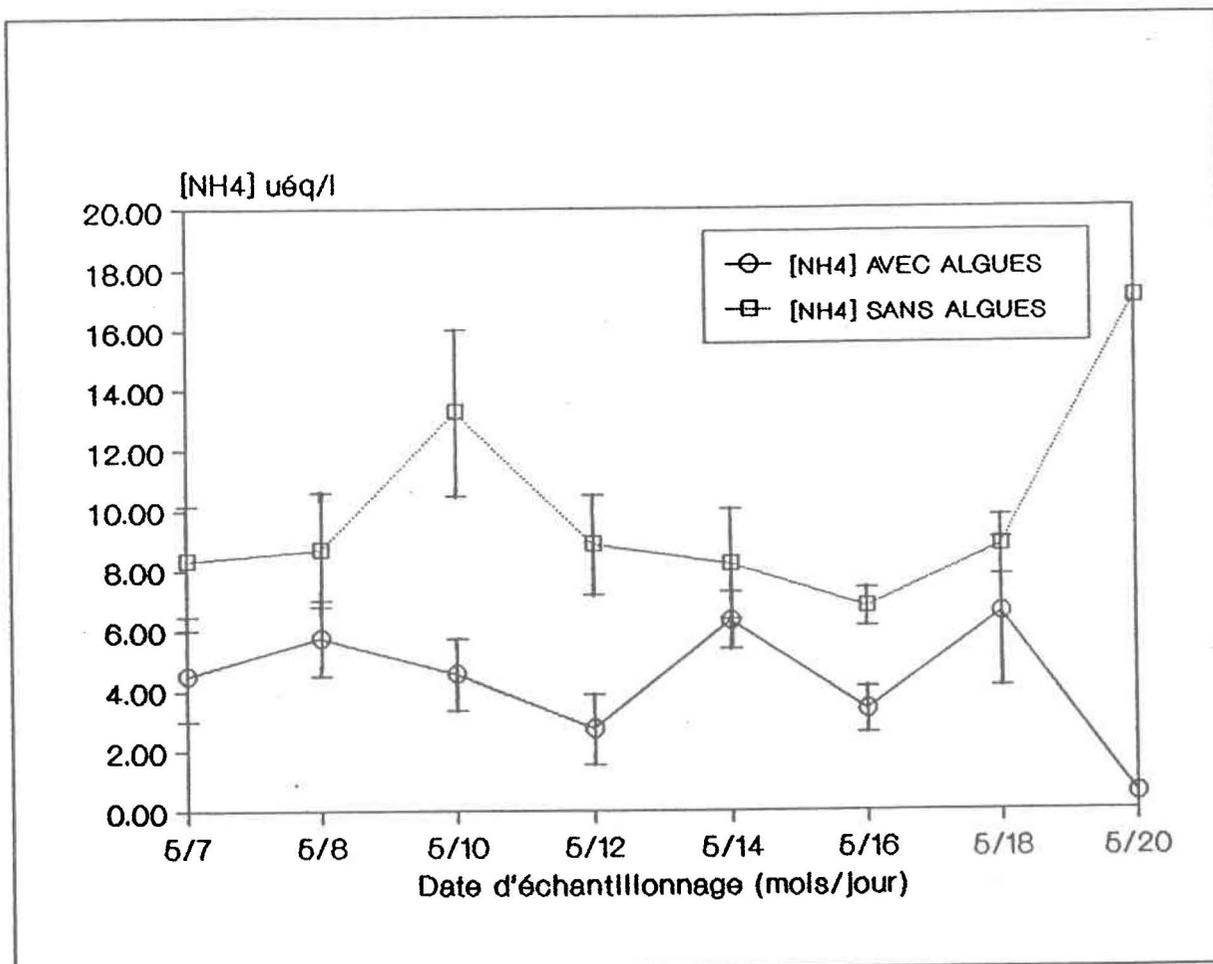


FIGURE 13: Evolution temporelle des concentrations moyennes de nitrate dans les échantillons de neige colonisée par les algues nivales en mai 1989 au lac Laflamme.



**FIGURE 14:** Evolution temporelle des concentrations moyennes d'ammonium dans les échantillons de neige colonisée par les algues nivales en mai 1989 au lac Laflamme.

La consommation du nitrate par les algues affecte à la hausse le pH des eaux naturelles tandis que l'utilisation de l'ammonium a l'effet contraire (Wetzel 1975). La majorité des algues possèdent un meilleur taux de croissance avec du  $\text{NO}_3^-$  comme source d'azote qu'avec du  $\text{NH}_4^+$ , même si le nitrate doit être réduit enzymatiquement par la nitrate réductase en ammonium auparavant (Wetzel 1975). De façon générale, les algues préfèrent utilisées l'ammonium au nitrate (Round 1973).

Au lac Laflamme, nous avons observé une diminution simultanée des espèces azotées ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) quoique l'utilisation du nitrate comme source d'azote était plus importante. Cependant, cela n'a pas affecté à la hausse, et ce de façon significative, les valeurs de pH de l'eau de fonte des échantillons de neige colonisée par les algues nivales.

#### Anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ )

Le phosphore est l'un des éléments nutritifs majeurs requis pour une croissance normale chez les algues. Il joue un rôle majeur dans la plupart des processus cellulaires, particulièrement ceux impliqués dans le transfert d'énergie, dans la synthèse des acides nucléiques et des phospholipides (Bold et Wynne 1978). Le phosphate inorganique ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  et  $\text{PO}_4^{3-}$ ) constitue la forme principale de phosphore accessible aux algues. Pour que le phosphore organique puisse servir, il doit être hydrolysé en phosphate inorganique par des enzymes extra-cellulaires tels que les phosphoestérases et les phosphatases (Reichardt et al. 1968; Strickland et Solorzano 1966). Très souvent, le phosphore est un élément limitant de la croissance des algues (Healey et Hendzel 1980). Lors d'une

étude de Hoham (1971), l'algue nivale Chloromonas pichincae pouvait assimiler du phosphate inorganique ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) et du phosphate organique ( $\text{Na}_2\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_2\text{PO}_4$ ) pour ses besoins de croissance.

Les concentrations de phosphate retrouvées dans les échantillons de neige recueillis au lac Laflamme lors de la campagne d'échantillonnage de mai 1989 sont sous la limite de détection de la technique utilisée. Il nous est donc impossible de savoir si les algues nivales ont assimilé ou non le phosphate présent. A priori, on peut penser qu'il y a eu assimilation de phosphate par les algues et que la faible concentration de phosphate limite sans doute la croissance de ces micro-organismes. La forme  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  constitue la forme prédominante de phosphate inorganique présente dans l'eau de fonte de la neige au lac Laflamme à cette période de l'année (c'est-à-dire à des pH de 4.59 à 5.33). Hoham et al. (1989) et Germain (1991) n'ont pu eux-aussi déterminer la concentration de  $\text{PO}_4^{3-}$  en raison de la très faible concentration présente.

Le chlorure est considéré comme un élément conservateur dans les systèmes aquatiques (Overrein et al. 1980; Skartveit et Gjessing 1979; Gjessing et al. 1976). Il ne doit donc subir aucune transformation.

Les résultats obtenus lors de cette étude montrent qu'il n'existe pas de différence significative (test t de Student pour échantillons appariés) entre la concentration moyenne de chlorure des échantillons de neige où furent retrouvés les algues nivales et celle des échantillons témoins ( $3.592 \mu\text{éq/l}$

vs 3.993  $\mu\text{eq/l}$ ). Comme cette espèce ionique est conservatrice dans le système, un lessivage des espèces ioniques engendré par un écoulement préférentiel de l'eau de fonte au niveau des sites colonisés par les algues peut être écarté.

Le soufre est essentiel à tous les organismes vivants. La plupart des algues obtiennent leur soufre à partir de sulfate inorganique qu'ils réduisent en groupements sulfydryles (-SH) pour la synthèse d'acides aminés (méthionine, cystine, cystéine) et de protéines (Richmond 1986; Round 1973). De façon générale dans le couvert de neige en période froide et de fonte, les sulfates sont considérés comme ayant un caractère plutôt conservateur, dépendant des conditions du milieu (Johannessen et al. 1980).

La concentration moyenne de  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les échantillons d'eau de fonte provenant de la neige colonisée par les algues nivales montre une valeur significativement différente (à 0.99) que celle des échantillons témoins (7.808  $\mu\text{eq/l}$  vs 4.100  $\mu\text{eq/l}$ ). Dans une étude préliminaire dans les Adirondacks sur des neiges vertes colonisées par l'espèce Chloromonas, Hoham et al. (1989) ont également observé un tel changement. Ils expliquent cette diminution de  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les échantillons de neige avec algues par une assimilation à des fins métaboliques. Au lac Laflamme au printemps 1988, Germain (1991) a observé lui-aussi une diminution de  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la neige colonisée par les algues.

Considérons maintenant une bande de neige contenant des algues nivales caractéristique de ce qui fut observé au lac Laflamme en mai 1989. Des dimensions de 10 cm par 10 cm de

côté par 5 cm de hauteur peuvent être considérées. On peut alors se demander quelle hauteur de neige doit-il y avoir au-dessus de cette bande colonisée par les algues nivales pour fournir assez d'azote à ces algues pour répondre à leurs besoins ?

Les algues sont contenues dans un volume de 0,5 l (10 cm X 10 cm X 10 cm = 500 cm<sup>3</sup>) et la densité cellulaire moyenne est de 153 000 cellules/ml. En considérant une masse volumique algale de 1 g/cm<sup>3</sup>, nous obtenons un poids humide d'algues de 0,04 g. Comme chez les algues le poids sec équivaut à 10% du poids humide et que le poids en carbone équivaut à 50% du poids sec (Jorgensen 1979), le poids total en carbone des algues est de 2,0 mg. Pour obtenir le contenu en azote des algues de cette bande, nous utilisons le rapport C:N = 106:16 (Jorgensen 1979). Alors, les algues de cette bande caractéristique devons obtenir 0,35 mg d'azote pour répondre à leurs besoins.

En considérant une concentration en azote de 10 µég/l, valeur réaliste à cette époque de la fonte (Jones, comm. pers.), il faudra, au-dessus de cette bande d'algues, une hauteur de neige équivalente à 25 cm afin de fournir assez d'azote pour répondre aux besoins des algues nivales. Cette hauteur est du même ordre de grandeur que celles observées sur le terrain (voir annexe 2).

En effectuant les mêmes types de calculs pour le soufre, et en considérant que le contenu en soufre des algues est équivalent à 0,6% du poids sec (Jorgensen 1979), nous obtenons une demande de 0,24 mg en soufre. Or, en considérant à cette

époque de la fonte une concentration de l'eau de fonte en soufre d'environ 20,0  $\mu\text{éq/l}$  (Jones et al. 1986), la hauteur au-dessus de cette bande doit alors être de 7,5 cm afin de répondre aux besoins des algues nivales. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celles mesurées au lac Laflamme en mai 1989.

Ces hauteurs de neige sont maximales car elles ne considèrent que l'eau de fonte comme source d'azote et de soufre alors qu'en réalité, il y a aussi apports par les précipitations incidentes et par le lessivage de la voûte coniférienne.

#### Cations ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ )

Les cations divalents calcium et magnésium sont requis en général par les algues comme macronutriments. Les besoins en  $\text{Ca}^{2+}$  pour une croissance maximum ont été démontré pour les algues vertes, les cyanobactéries et les diatomées (Richmond 1986). Physiologiquement, on ne connaît pas très bien le rôle du calcium chez les algues, mais on pense qu'il interviendrait dans le maintien des membranes cytoplasmiques (Richmond 1986; Round 1973; Healey 1973). Le magnésium est impliqué dans plusieurs fonctions cruciales au sein du métabolisme cellulaire. Il est un constituant important des molécules de chlorophylle en plus d'agir comme cofacteur dans plusieurs réactions biochimiques. La majeure partie du  $\text{Mg}^{2+}$  dans les cellules serait probablement impliquée dans l'agrégation des ribosomes en unités fonctionnelles (Richmond 1986).

Quant au cation monovalent potassium, il agirait comme cofacteur pour une variété d'enzymes et serait probablement

universellement requis comme micronutriment par les algues (Richmond 1986). Le sodium ne semble requis seulement que par les algues bleu-vert (Round 1973; Bostwick et al. 1968).

Les concentrations moyennes des ces cations dans l'eau de fonte des échantillons de neige où furent observées les algues nivales ne montrent aucune différence significative ( $\alpha = 0.99$ ) avec les concentrations moyennes des échantillons de neige témoins ( $\text{Ca}^{2+}$ : 3.366  $\mu\text{éq/l}$  vs 3.589  $\mu\text{éq/l}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$ : 1.487  $\mu\text{éq/l}$  vs 1.580  $\mu\text{éq/l}$ ;  $\text{Na}^+$ : 3.274  $\mu\text{éq/l}$  vs 2.89  $\mu\text{éq/l}$ ;  $\text{K}^+$ : 3.457  $\mu\text{éq/l}$  vs 3.545  $\mu\text{éq/l}$ ; pour les échantillons avec et sans algues respectivement).

Hoham et al. (1989) dans leur étude préliminaire dans les Adirondacks ont noté une baisse importante de la concentration de  $\text{K}^+$  dans la neige colonisée par les algues nivales. Comme le nombre d'échantillon était trop petit ( $n = 3$ ), ils n'ont pu en tirer de conclusion statistiquement valable. Par contre, Germain (1991) a observé le phénomène inverse au lac Laflamme au printemps 1988. Il a noté une augmentation de  $\text{K}^+$  dans l'eau de fonte de ses cinq échantillons avec algues.

Les coefficients de corrélation entre les concentrations des espèces ioniques et certains paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés dans la neige colonisée par les algues nivales au lac Laflamme en mai 1989 (cellules/ml, ATP, chlorophylle-a) sont présentés au tableau 7. Le nombre de cellules est corrélé avec la concentration d'ATP retrouvée dans l'eau de fonte pour les échantillons de neige contenant des algues ( $r^2 = 0.48$ ;  $P < 0.001$ ). L'analyse en composantes principales (figure 15) montre également cette forte association. Ce

résultat s'explique car la concentration d'ATP dans l'eau de fonte est une mesure de la biomasse (Champiat et Larpent 1978; Hodson et al. 1976). Par contre, il n'existe aucune corrélation significative ( $P < 0.01$ ) entre le nombre de cellules et les autres paramètres mesurés.

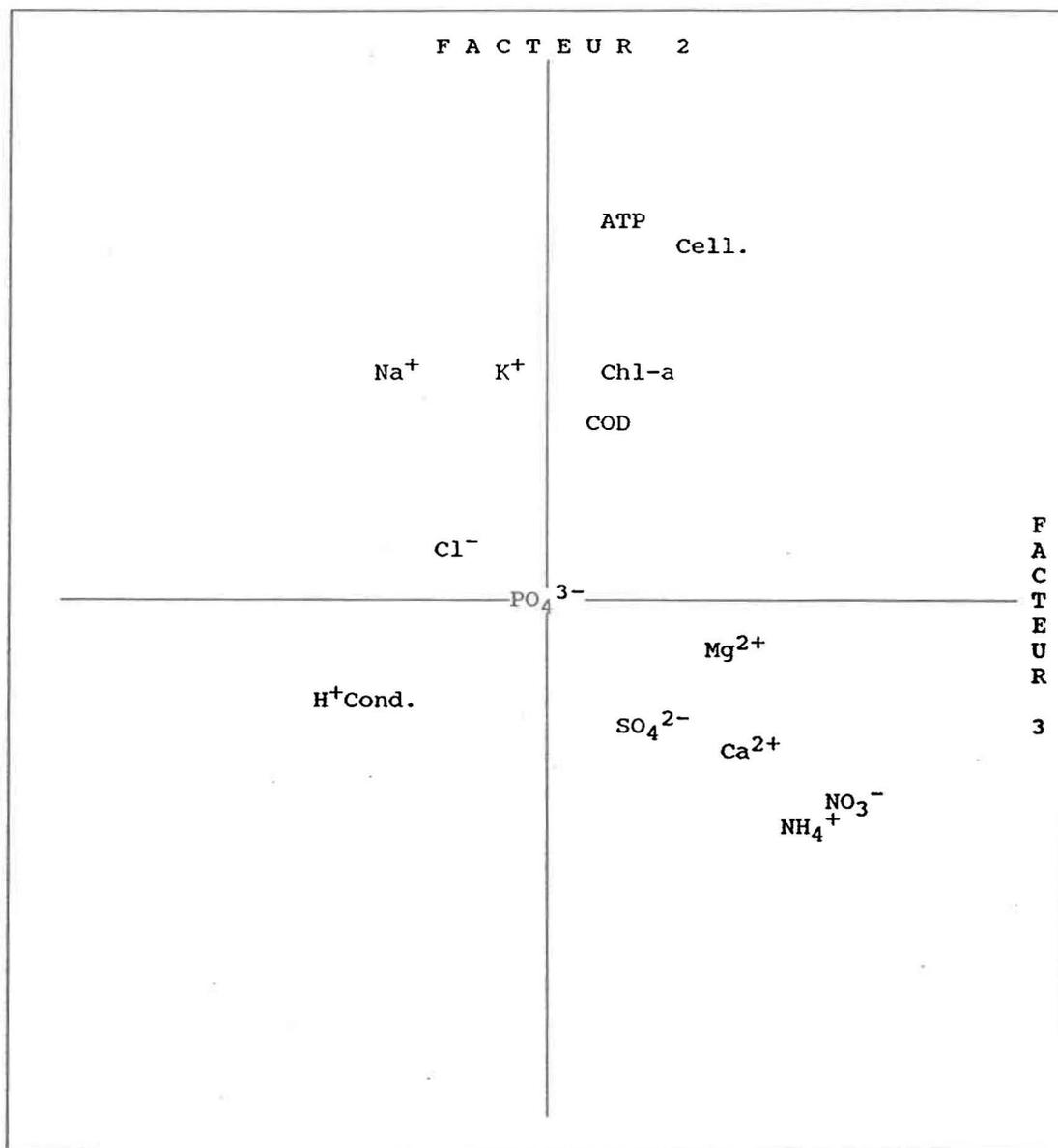
L'analyse en composantes principales des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans les échantillons de neige colonisée par les algues nivales (figure 15) montre un regroupement des paramètres biologiques le long de l'axe vertical (facteur 2). A l'opposé sur ce même axe, on note le regroupement des composés azotés  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ . Ceci peut être interprété comme une relation inversement proportionnelle entre la présence des algues et des composés azotés: plus il y a d'algues nivales, moins grande est la concentration des composés azotés.

Sur la figure 16, l'analyse en composantes principales des différents paramètres physico-chimiques et biologiques pour les échantillons de neige sans algue montre une forte association entre  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ . Le facteur expliquant l'évolution semblable de ces espèces chimiques est leur origine commune. En effet, ces éléments sont fortement associés à la matière organique provenant du transport local par turbulence atmosphérique et de la déposition local de débris organiques de la voûte forestière (Jones et Sochanska 1985; Abrahamsen et al. 1977). Les concentrations de ces cations sont également significativement corrélées entre elles (tableau 7). Cette même figure montre aussi une légère association entre  $\text{H}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$  et l'axe vertical. Ceci peut être interprété comme étant la contribution atmosphérique au couvert de neige résiduelle (Jones 1985).

**TABLEAU 7:** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés dans la neige colonisée par les algues nivales au lac Laflamme au mois de mai 1989.

Cell/ml	Cond.	H <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Σ <sup>+</sup>	Σ <sup>-</sup>	Chl-a	ATP	COD	
	-0.15	-0.23	0.00	-	0.12	-0.17	-0.11	0.18	0.03	0.26	0.07	0.07	-0.02	0.26	0.48 <sup>b</sup>	0.23	Cell
		0.94 <sup>c</sup>	0.72 <sup>c</sup>	-	-0.03	0.54 <sup>b</sup>	0.41 <sup>a</sup>	0.18	0.27	0.61 <sup>c</sup>	0.17	0.80 <sup>c</sup>	0.49 <sup>b</sup>	-0.24	-0.07	0.38	Cond.
			0.60 <sup>c</sup>	-	-0.12	0.51 <sup>b</sup>	0.36	0.10	0.19	0.50 <sup>b</sup>	0.13	0.72 <sup>c</sup>	0.39 <sup>b</sup>	-0.16	-0.06	0.33	H <sup>+</sup>
				-	-0.07	0.42	0.50 <sup>a</sup>	0.30	0.46 <sup>b</sup>	0.74 <sup>c</sup>	0.08	0.75 <sup>c</sup>	0.50 <sup>b</sup>	-0.20	0.19	0.55 <sup>c</sup>	Cl <sup>-</sup>
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
						0.24	0.32	-0.17	0.32	-0.07	0.13	0.00	0.69 <sup>a</sup>	0.02	-0.17	-0.03	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
							0.67 <sup>c</sup>	0.03	0.45 <sup>b</sup>	0.48 <sup>b</sup>	0.35	0.65 <sup>c</sup>	0.81 <sup>c</sup>	-0.07	-0.02	0.45 <sup>a</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
								0.00	0.80 <sup>c</sup>	0.37 <sup>a</sup>	0.28	0.60 <sup>c</sup>	0.71 <sup>c</sup>	-0.22	-0.02	0.50 <sup>b</sup>	Ca <sup>2+</sup>
									0.09	0.41 <sup>a</sup>	-0.24	0.49 <sup>b</sup>	0.01	0.03	0.09	0.27	Na <sup>+</sup>
										0.38 <sup>a</sup>	0.00	0.47 <sup>a</sup>	0.57 <sup>c</sup>	-0.27	0.05	0.47 <sup>a</sup>	Mg <sup>2+</sup>
											-0.03	0.77 <sup>c</sup>	0.45 <sup>a</sup>	-0.01	0.32	0.85 <sup>c</sup>	K <sup>+</sup>
												0.35	0.29	0.06	-0.16	0.03	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
													0.59 <sup>c</sup>	-0.10	0.05	0.65 <sup>c</sup>	Σ <sup>+</sup>
														-0.09	-0.05	0.40 <sup>b</sup>	Σ <sup>-</sup>
															0.30	-0.05	Chl-a
																0.28	ATP
																	COD

n = 44, a: P ≤ 0.01, b: P ≤ 0.001, c: P ≤ 0.0001



**FIGURE 15:** Analyse en composantes principales des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans la neige contenant des algues nivales au lac Laflamme (mai 1989).

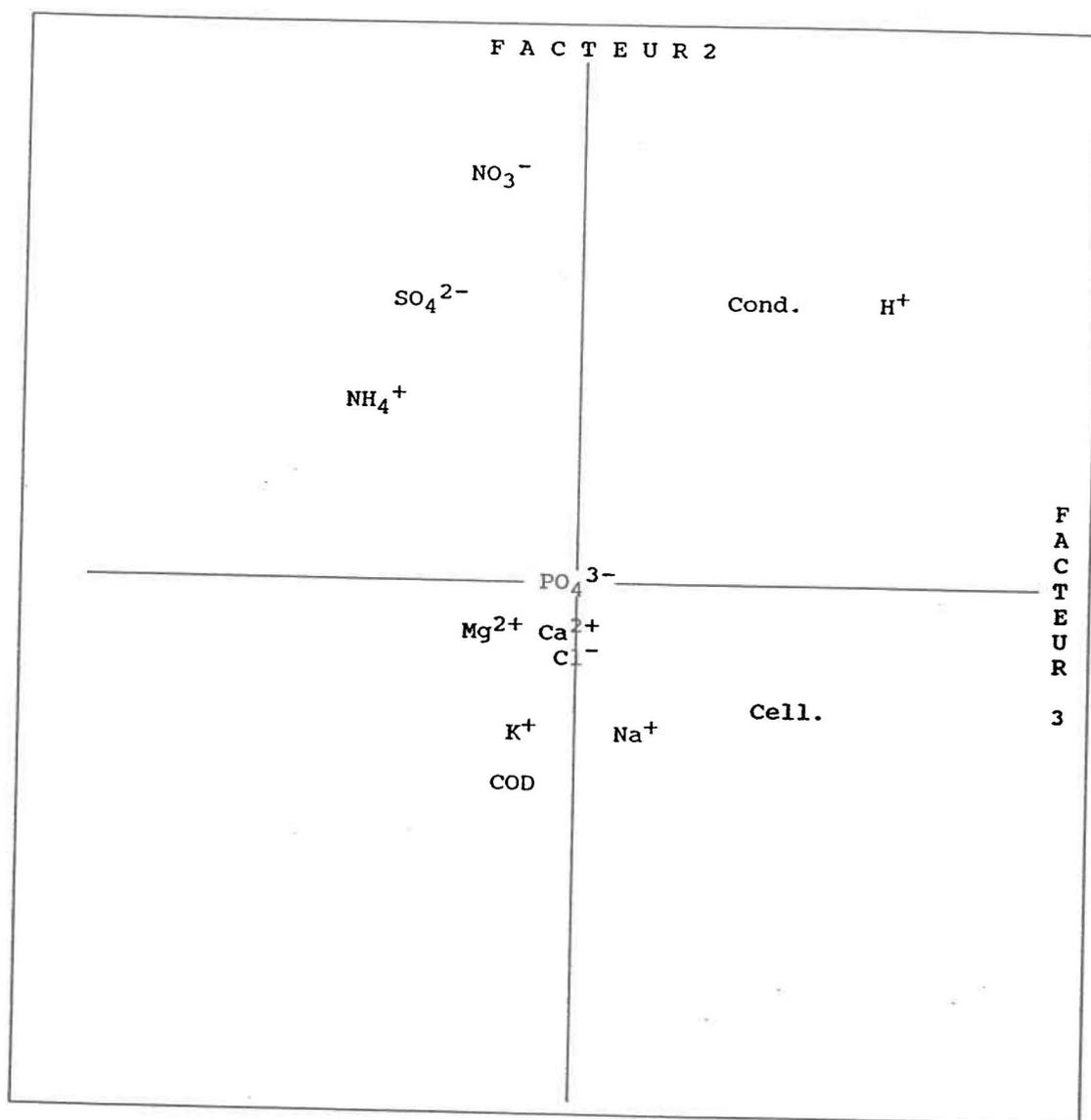


FIGURE 16: Analyse en composantes principales des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans la neige ne contenant pas d'algue nivale au lac Laflamme (mai 1989).

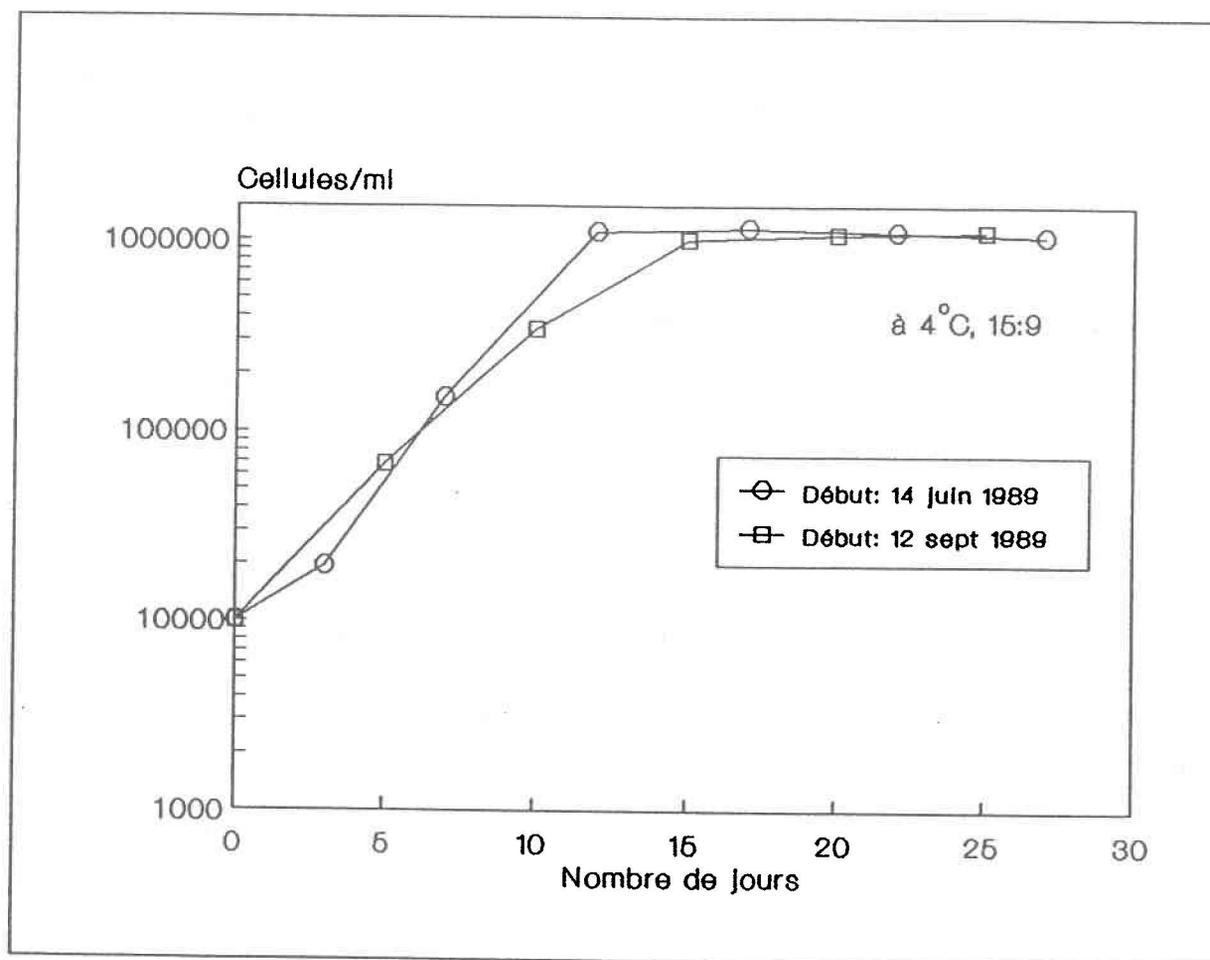
L'analyse en composantes principales comportant les facteurs 1 et 2 ne fut pas considérée en raison d'un possible effet de concentration le long de l'axe représentant le facteur 1 (Jones, comm. pers.). Les annexes 5 et 6 présentent les analyses en composantes principales des facteurs 1 et 2 pour les échantillons avec et sans algues nivales.

## 2. RESULTATS DE LABORATOIRE

### 1. MAINTIEN DES ALGUES NIVALES DANS LE MILIEU M-1

Deux séries d'ensemencement dans le milieu liquide M-1 furent effectuées avec un inoculum de départ de 10 000 cellules par ml. Ces algues avaient été prélevé dans la neige au lac Laflamme en mai 1989. Un compte cellulaire fut fait à tous les quatre ou cinq jours. La figure 17 montre les courbes de croissance des populations d'algues nivales obtenues en laboratoire lors de ces deux séries d'ensemencement. La température de la chambre de croissance fut maintenue à 4 °C avec une photopériode de 15:9 (lumière:obscurité) en conformité avec les conditions prévalant au lac Laflamme en mai 1989. Ces algues ont servis dans les expériences de laboratoire où un ensemencement fut nécessaire.

Sur cette figure, lors de la phase exponentielle de croissance, on obtient des constantes de croissance de 0,448 jour<sup>-1</sup> pour la courbe débutant le 14 juin et de 0,307 jour<sup>-1</sup> pour celle du 12 septembre. Cette constante a été obtenu à l'aide de la relation  $N = N_0 e^{kt}$  où  $N_0$  est le nombre de cellules par ml dans la culture au temps zéro,  $N$  le nombre de cellules par ml après la période de temps  $t$ ,  $e$  la base des logarithmes naturels, et  $k$ , la constante de croissance (Fogg 1966).



**FIGURE 17:** Courbes de croissance dans le milieu M-1 des populations d'algues nivales prélevées au lac Laflamme en mai 1989 (à 4 °C, photopériode 15:9).

## 2. CROISSANCE DES ALGUES NIVALES EN SIMULATEUR DE FONTE

### Caractéristiques physico-chimiques de la neige avant la fonte

Cette fonte en simulateur a duré 18 jours. Les premiers millilitres d'eau de fonte furent recueillis lors de la troisième journée. Rappelons que la colonne #1 contenait uniquement de la neige. Un inoculum de 0,55 ml d'algues nivales (concentration de 900 000 cellules/ml) fut ajouté aux colonnes #2, #3 et #4. Les colonnes #3 et #4 furent enrichies avec de la matière organique dont les proportions sont données au chapitre 3. Notons ici que comparativement à la neige colonisée au lac Laflamme en mai 1989, aucune colonneensemencée d'algues nivales n'a montré de neige à l'apparence verdâtre.

Le tableau 8 présente les charges des espèces ioniques de la neige utilisée lors de cette fonte. Les charges ioniques furent calculées à l'aide de la formule 1:

$$[I] = [C] \cdot WE \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

où

[I] = charge ionique (még/m<sup>2</sup>).

[C] = concentration ionique (μég/l).

WE = équivalent en eau recueillie par les lysimètres (mm).

La composition ionique de la neige des colonnes #3 et #4 diffère particulièrement des deux autres colonnes en raison de l'ajout de matière organique. Dans les colonnes #1 et #2, les nitrates contribuent le plus au total anionique tandis que ce sont les ions H<sup>+</sup> du côté cationique. Les nitrates et les ions

potassium contribuent le plus aux charges anioniques et cationiques respectivement pour la colonne #3. Quant à la colonne #4, les phosphates prédominent du côté de la charge anionique tandis que les ions potassium font de même du côté cationique.

La présence d'une grande quantité de potassium provient de la dissolution de la matière organique ajoutée aux colonnes #3 et #4 (Jones 1984). Le même phénomène expliquerait les différences significatives observées entre la neige des colonnes #1 et #2 et des colonnes #3 et #4.

**TABLEAU 8:** Bilan des charges ioniques de la neige avant la fonte en laboratoire.

COLONNES	ANIONS (mécq/m <sup>2</sup> )					CATIONS (mécq/m <sup>2</sup> )							DIFFERENCE (%) Anions - Cations
	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TOTAL	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	TOTAL	
1	2.76	0.00	4.61	3.61	10.98	0.51	1.30	0.59	0.31	3.19	6.07	11.97	-4.31
2	2.90	0.00	4.64	3.56	11.10	0.51	1.16	0.60	0.42	3.28	5.51	11.48	-1.71
3	4.03	6.84	7.31	5.68	23.85	1.54	2.31	3.87	9.17	4.28	7.98	29.14	-9.98
4	4.03	7.37	7.05	5.64	24.09	1.68	2.28	3.81	8.84	4.25	8.10	28.96	-9.18

Pour les colonnes #1 et #2, l'écart des charges ioniques entre les cations et les anions est inférieur à 5%, ce qui respecte le principe d'électronégativité compte tenu des erreurs expérimentales. De leur côté, les colonnes #3 et #4 présentent des écarts de charge ionique inférieurs à 10% et le déficit anionique observé peut être attribué à la présence de carbone organique dissous provenant des acides organiques humiques et fulviques.

### Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fonte

Les eaux de fonte furent recueillies quotidiennement à partir de la troisième journée d'expérimentation. Le tableau 9 présente le bilan des charges ioniques des eaux de fonte. Comme c'était le cas pour la colonne #1 avant la fonte, nous observons pour cette colonne un léger déficit anionique. Pour la colonne #2, l'écart entre les charges anioniques et cationiques atteint 9.71% en faveur des cations. Un écart important favorisant les cations est observé pour les colonnes #3 et #4. Cet écart important peut être expliqué par la présence d'algues nivales d'une part et par l'ajout de matière organique d'autre part.

**TABLEAU 9:** Bilan des charges ioniques lors de la fonte en laboratoire.

COLONNES	ANIONS (mécq/m <sup>2</sup> )					CATIONS (mécq/m <sup>2</sup> )							DIFFERENCE (%) Anions - Cations
	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TOTAL	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	TOTAL	
1	3.40	0.00	4.82	3.44	11.67	0.50	1.48	0.64	0.33	4.11	5.07	12.13	-1.95
2	4.12	0.00	3.09	3.20	10.42	0.42	1.39	0.72	0.43	4.62	5.09	12.66	-9.71
3	5.44	3.79	3.25	3.88	16.36	0.53	3.68	6.30	14.58	11.70	6.45	43.24	-45.11
4	4.03	6.88	2.92	3.75	17.85	0.43	4.48	5.50	13.52	10.35	6.34	40.62	-38.95

Les tableaux 10 et 11 présentent le bilan des pertes et des gains anioniques et cationiques lors de cette fonte. Les pertes ou les gains pour chaque colonne furent calculés à l'aide de la formule 2:

$$\Delta I_i = \frac{\sum C_{ij} - C_{in}}{C_{in}} \times 100 \quad (2)$$

où  $\Delta I_i$  = gain ou perte de l'espèce ionique i (%).

$\sum C_{ij}$  = somme des charges de l'espèce ionique i au jour j de la fonte ( $\text{még/m}^2$ ).

$C_{in}$  = charge de l'espèce ionique i dans la neige avant la fonte ( $\text{még/m}^2$ ).

Au niveau des charges anioniques, on observe un gain en chlorures dans toutes les colonnes au cours de la fonte (de 3.25% à 17.45%). Dans la neige des colonnes #1 et #2, la concentration de phosphate fut sous la limite de détection analytique. Dans la colonne #3, nous observons une importante perte (-28.68%) tandis qu'une légère perte est enregistrée à l'intérieur de la colonne #4 (-3.45%).

La neige de la colonne #1 montre un très léger gain (2.25%) en nitrate. Par contre, on observe des pertes importantes de nitrate dans les autres colonnes. La colonne #2 qui futensemencée uniquement avec des algues nivales présente une perte de l'ordre de 20%. Quant aux colonnes #3 et #4 qui furent enrichies de débris de la voûte forestière etensemencées d'algues nivales, des pertes importantes de nitrate sont observées (colonne #3: -38.45%; colonne #4: -40.36%).

**TABEAU 10:** Bilan des pertes et des gains anioniques lors de la fonte en laboratoire.

ANION	COLONNES	CHARGE (méq/m <sup>2</sup> )			GAIN ou PERTE (%)
		APRES LA FONTE	AVANT LA FONTE	DIFF.	
Cl <sup>-</sup>	1	3.403	2.758	0.645	10.47
	2	4.122	2.897	1.225	17.45
	3	5.439	4.030	1.409	14.88
	4	4.305	4.034	0.271	3.25
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1	0.000	0.000	0.000	0.00
	2	0.000	0.000	0.000	0.00
	3	3.791	6.840	-3.049	-28.68
	4	6.880	7.371	-0.491	-3.45
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	4.819	4.607	0.213	2.25
	2	3.093	4.640	-1.547	-20.01
	3	3.249	7.309	-4.060	-38.45
	4	2.921	6.875	-3.954	-40.36
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1	3.444	3.612	-0.168	-2.39
	2	3.203	3.558	-0.355	-5.25
	3	3.878	5.677	-1.799	-18.83
	4	3.746	5.637	-1.891	-20.15

**TABLEAU 11:** Bilan des pertes et des gains cationiques lors de la fonte en simulateur.

CATION	COLONNES	CHARGE (méq/m <sup>2</sup> )			GAIN ou PERTE (%)
		APRES LA FONTE	AVANT LA FONTE	DIFF.	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1	0.502	0.512	-0.010	-1.01
	2	0.421	0.509	-0.088	-9.46
	3	0.527	1.540	-1.013	-49.01
	4	0.431	1.675	-1.244	-59.07
Na <sup>+</sup>	1	1.476	1.302	0.174	6.25
	2	1.386	1.160	0.226	8.88
	3	3.679	2.305	1.374	22.96
	4	4.483	2.283	2.200	32.52
Mg <sup>2+</sup>	1	0.637	0.586	0.051	4.18
	2	0.715	0.598	0.117	8.91
	3	6.298	3.868	2.430	23.90
	4	5.495	3.811	1.684	18.10
K <sup>+</sup>	1	0.330	0.308	0.022	3.45
	2	0.430	0.423	0.007	0.82
	3	14.581	9.172	5.409	22.77
	4	13.526	8.844	4.682	20.93
Ca <sup>2+</sup>	1	4.111	3.187	0.924	12.66
	2	4.618	3.276	1.342	17.00
	3	11.705	4.279	7.426	46.46
	4	10.351	4.247	6.104	41.81
H <sup>+</sup>	1	5.073	6.070	-0.997	-8.95
	2	5.088	5.513	-0.425	-4.01
	3	6.453	7.979	-1.526	-10.57
	4	6.336	8.104	-1.768	-12.24

De légères pertes de sulfate furent observées durant la fonte pour les colonnes #1 et #2 (-2.39% et -5.25%). Des pertes de plus grande importance furent notées à l'intérieur des colonnes #3 et #4 (-18.83% et -20.15%).

Au niveau cationique, seuls l'ammonium et les ions  $H^+$  ont montré une diminution au cours de la fonte. La colonne #1 a montré des pertes de 1.01% en  $NH_4^+$  et de 8.95 % en  $H^+$ . Les colonnes #2, #3 et #4 ont présentées des pertes importantes d'ammonium (colonne #2: -9.46%; colonne #3: -49.01%; colonne #4: -59.07%). Des pertes d' $H^+$  variant de 4.01 à 12.24% furent aussi observées dans ces trois colonnes.

Pour les quatre autres cations ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ), de légers gains furent enregistrés dans les colonnes #1 et #2 tandis que les colonnes #3 et #4 montraient des gains importants. C'est particulièrement le cas du  $Ca^{2+}$  où des gains de l'ordre de 47% et 42% furent observés. Jones et Sochanska (1985) ont également observé des augmentations importantes des espèces cationiques  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  lors de la fonte. Ils attribuent ces gains au lessivage de la matière organique et à la dégradation biologique de cette matière.

Jones et Deblois (1987) ont montré lors d'études en laboratoire et sur le terrain que les nitrates et les ions ammonium disparaissaient pendant la fonte. Ils attribuent la disparition de ces composés azotés à des processus d'assimilation biologique. De plus, ces auteurs ont montré que l'assimilation était plus grande dans la neige contenant une quantité importante de matière organique provenant de la voûte forestière.

Au lac Laflamme, les pertes de  $\text{NO}_3^-$  attribuables aux algues nivales étaient de 6,874  $\mu\text{éq/l}$  (tableau 6, figure 13). Lors de la fonte en simulateur, la colonne #1 présentait un gain en  $\text{NO}_3^-$  de 1,840  $\mu\text{éq/l}$ ; la colonne #2, une perte de 13,480  $\mu\text{éq/l}$ ; la colonne #3, une perte de 35,160  $\mu\text{éq/l}$ ; la colonne #4, une perte de 34,240  $\mu\text{éq/l}$  (tableau 10).

Quant à l'ammonium, les pertes dues aux algues au lac Laflamme furent de 4,420  $\mu\text{éq/l}$  (tableau 6, figure 14). Lors de l'expérimentation en laboratoire, toutes les colonnes montraient des pertes: colonne #1, perte de 0,086  $\mu\text{éq/l}$ ; colonne #2, perte de 0,762  $\mu\text{éq/l}$ ; colonne #3, perte de 8,772  $\mu\text{éq/l}$ ; colonne #4, perte de 10,772  $\mu\text{éq/l}$  (tableau 11).

Nos résultats mettent en évidence une perte de composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) dans la neigeensemencée d'algues nivales et enrichie de matière organique de la voûte forestière. On note une diminution significative de  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  dans la colonne #2 où la neige fut uniquement inoculée d'algues nivales. Comme la colonne #1 ne montre que de légères variations des espèces azotées (perte de 1.01% en  $\text{NH}_4^+$  et gain de 2.25% en  $\text{NO}_3^-$ ), les pertes de ces composés dans la colonne #2 peuvent être attribuées à l'activité des algues nivales. Pour les colonnes #3 et #4, les pertes importantes en azote enregistrées au cours de la fonte peuvent être imputées d'une part à l'activité des algues nivales et d'autre part à l'activité microbiologique associée à la matière organique.

Ces résultats concordent avec ceux du lac Laflamme où il y avait une différence significative dans les concentrations des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) entre les neiges colonisées

par les algues nivales et les neiges non colonisées (tableau 6). Les algues nivales assimilaient les nitrates et l'ammonium dans la neige où elles étaient présentes.

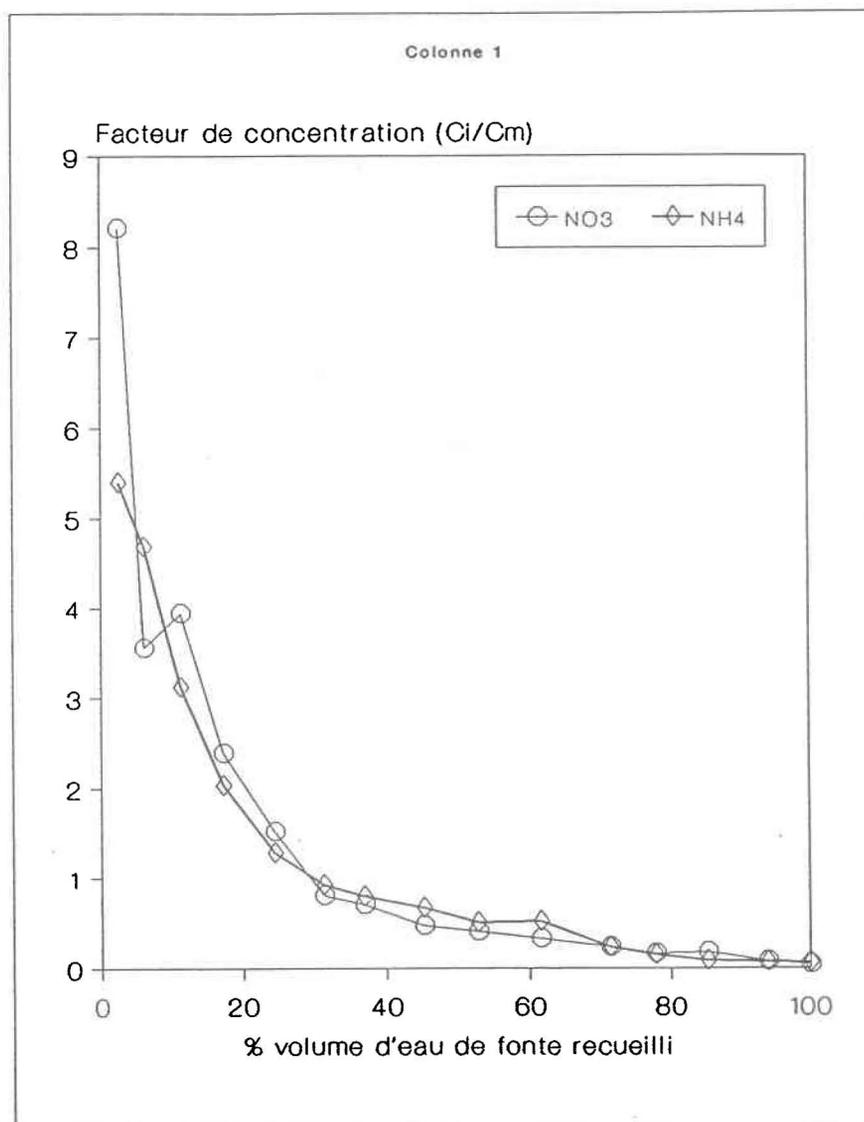
Comparativement aux colonnes #3 et #4 où la mobilisation de l'azote est imputable aux algues nivales et aux micro-organismes associés à la matière organique, la perte d'azote observée dans la neige au lac Laflamme est attribuable aux algues nivales. En effet, les deux types d'échantillon de neige (avec et sans algues) contenaient tous les deux de la matière organique susceptible de maintenir des micro-organismes et de mobiliser une quantité comparable d'azote.

Les figures 18 à 21 montrent l'enlèvement des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) pendant la fonte en simulateur. Le rapport  $C_i/C_m$  représente un facteur de concentration pour une espèce chimique donnée où  $C_i$  est la concentration mesurée dans la  $i$ ème fraction de la fonte et  $C_m$  la concentration de cette espèce dans la neige avant la fonte. De façon générale, l'enlèvement des nitrates et de l'ammonium suit le même schème. L'essentiel de l'azote est enlevé dans le premier tiers de la fonte. Dans les colonnes #3 et #4, on note une diminution plus rapide que dans le cas des deux autres colonnes. Ce fait s'explique par la présence de deux processus de mobilisation de l'azote. La colonne #2 montre une diminution moins rapide dû à la présence unique d'algues nivales dans la neige. Après la moitié de la fonte, les colonnes #2, #3 et #4 présentent des concentrations presque nulles. Par contre, la colonne #1 montre la présence d'azote jusqu'à la toute fin de la fonte.

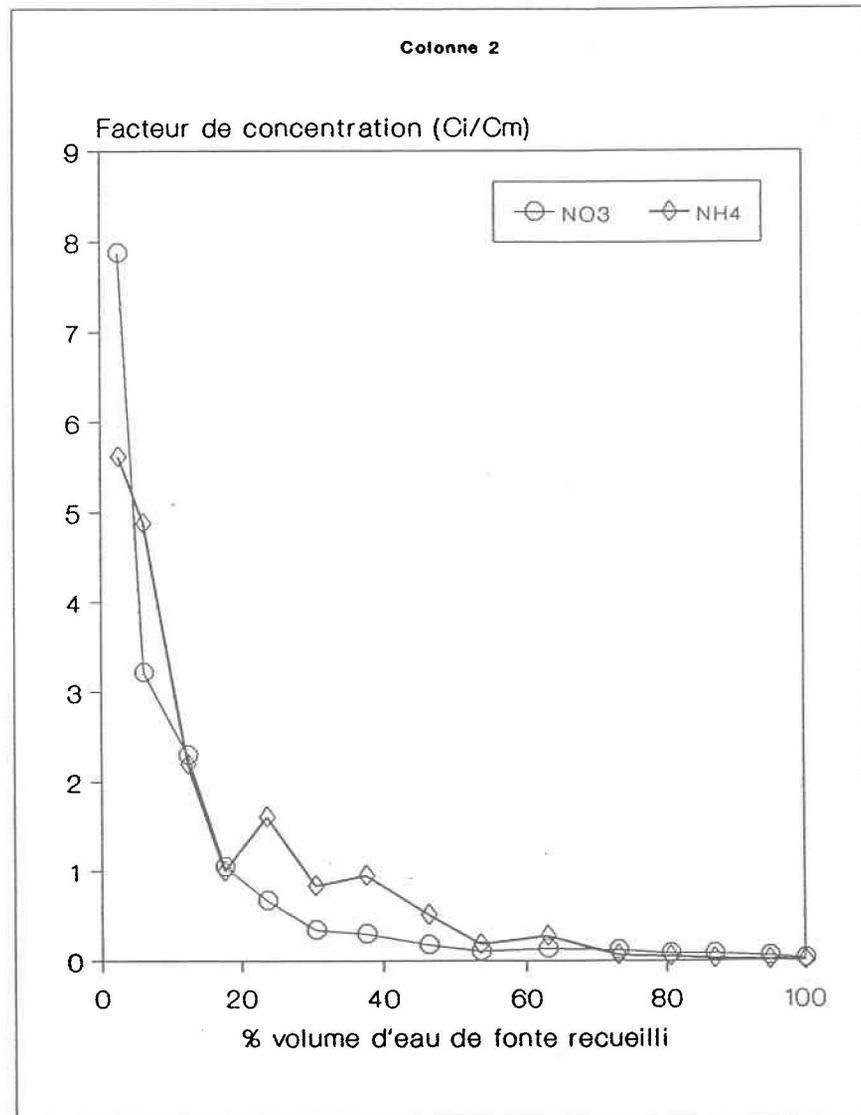
Pour l'ensemble de ces figures, on voit bien le processus de fractionnement où la majorité des espèces ioniques de la neige sont enlevées pendant les premiers jours de la fonte (Johannessen et Henriksen 1978). Pour les colonnes #2, #3 et #4, ce processus est accéléré par la présence d'algues nivales et de matière organique.

Les figures 22 et 23 présentent la charge cumulative de nitrate et d'ammonium en fonction du pourcentage du volume d'eau de fonte recueilli lors de la fonte en laboratoire. Sur la figure 22, on voit que le  $\text{NO}_3^-$  est enlevé beaucoup plus rapidement dans les colonnes où les algues nivales étaient présentes (colonnes #2, #3 et #4). Sur la figure 23, on note que l'enlèvement de l'ammonium s'effectue à une vitesse plus grande dans la colonne #2 ne contenant que des algues nivales et aucune matière organique.

Le comportement au cours de la fonte des phosphates est quelque peu ambigu. Dans les colonnes #3 et #4 où l'ajout de matière organique a enrichie la neige en phosphate, nous avons assisté à une perte importante dans la colonne #3 (-28.68%) et à une légère diminution dans la colonne #4 (-3.45%). Nous aurions dû assister normalement à des pertes comparables dans les colonnes #3 et #4 car le contenu de ces deux colonnes était très semblable.



**FIGURE 18:** Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #1 lors de la fonte en laboratoire.



**FIGURE 19:** Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #2 lors de la fonte en laboratoire.

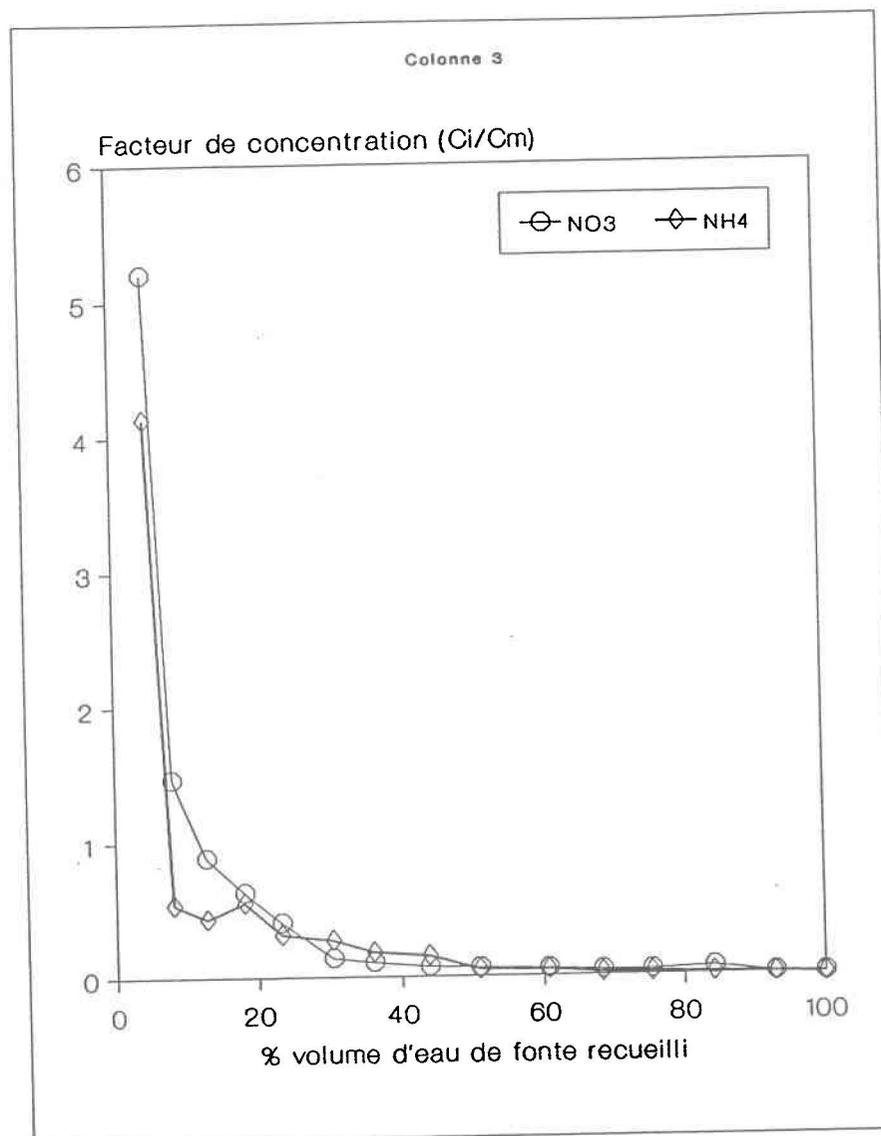


FIGURE 20: Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #3 lors de la fonte en laboratoire.

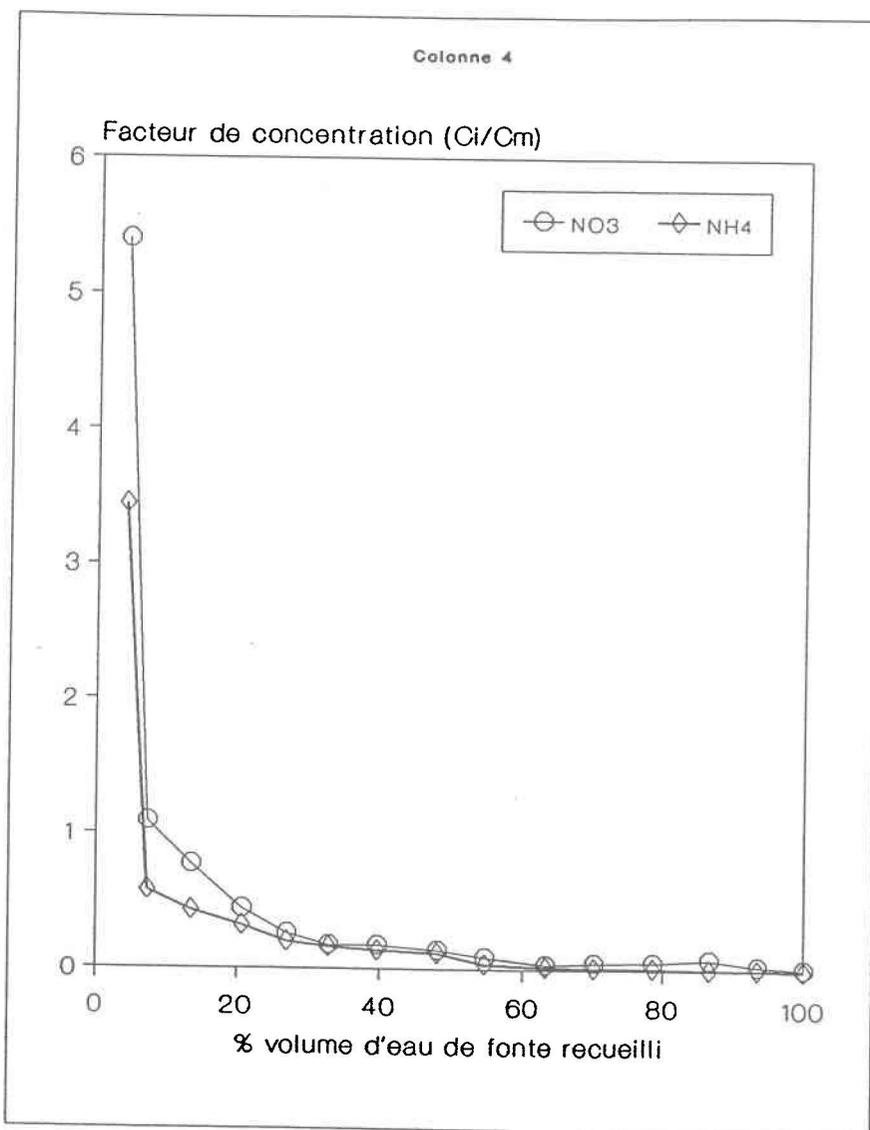
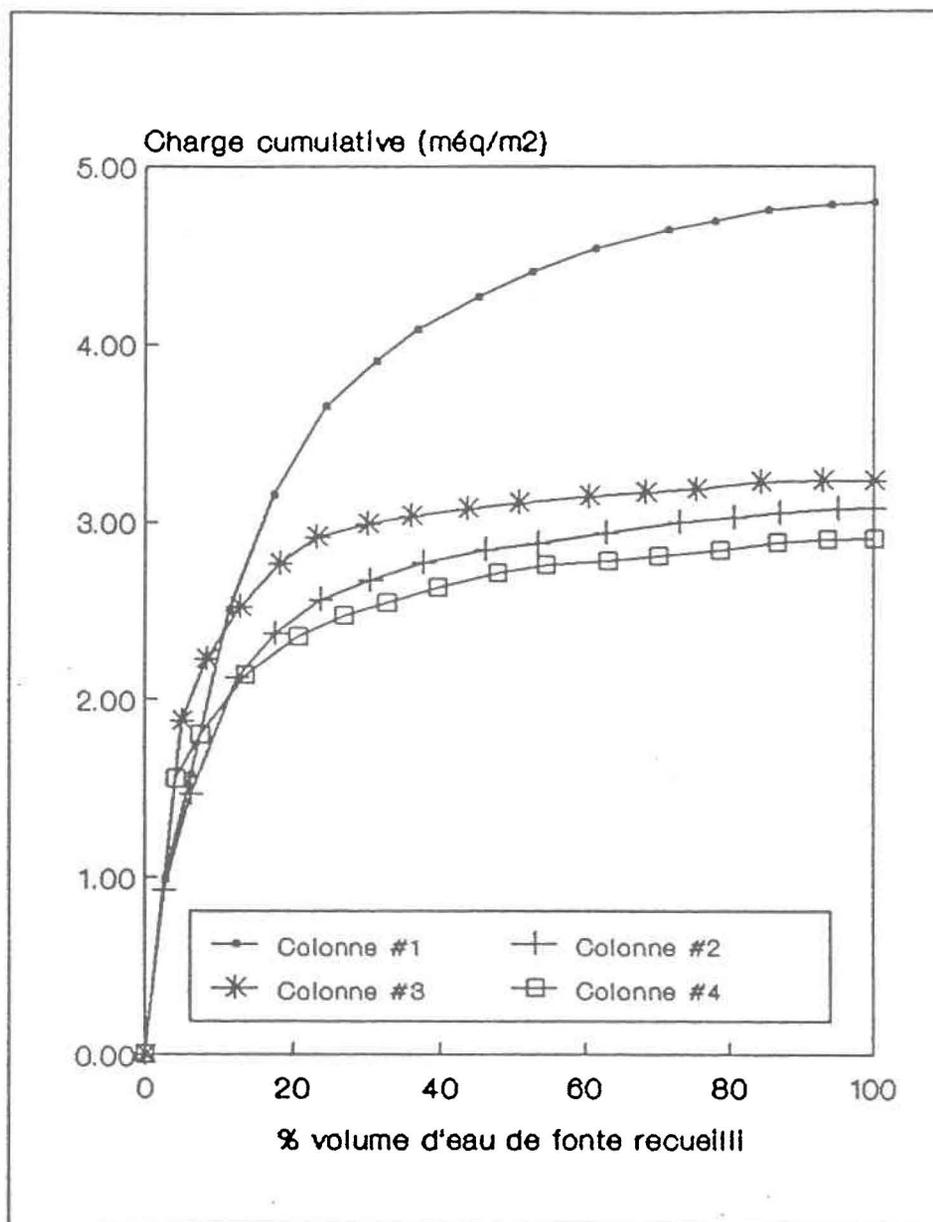


FIGURE 21: Enlèvement du nitrate et de l'ammonium pour la colonne #4 lors de la fonte en laboratoire.



**FIGURE 22:** Charge cumulative du nitrate en fonction du pourcentage du volume d'eau de fonte recueilli dans chaque colonne lors de la fonte en laboratoire.

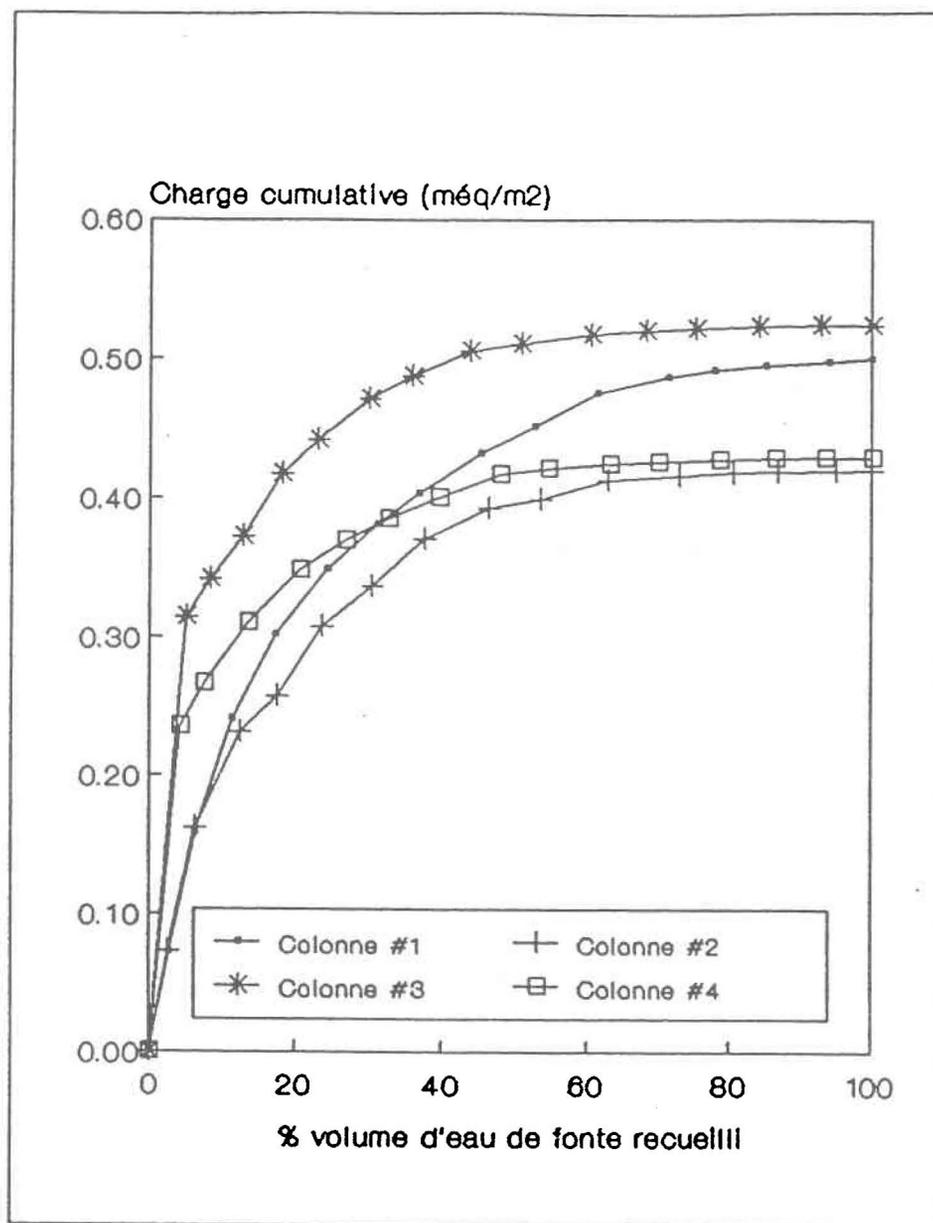
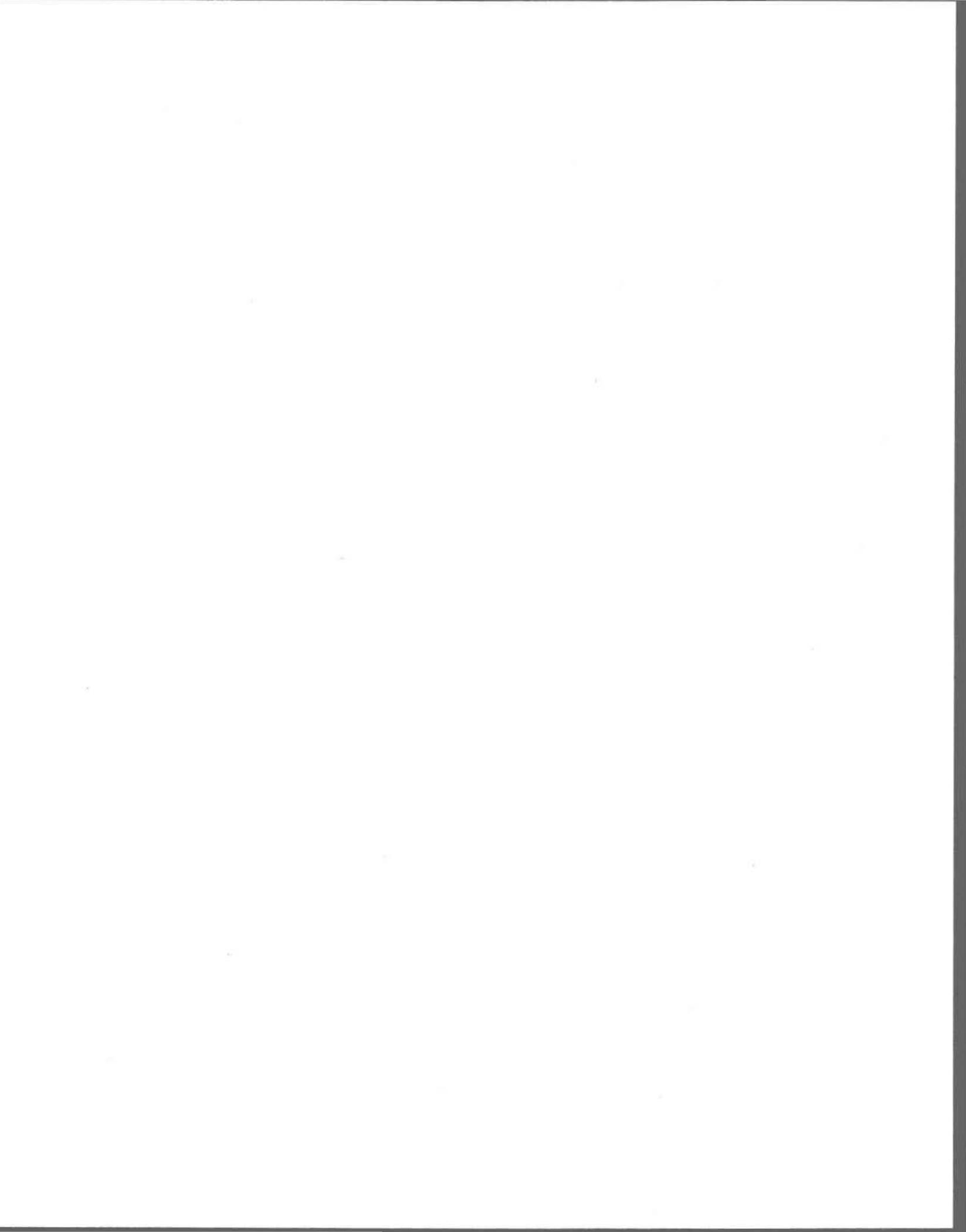


FIGURE 23: Charge cumulative d'ammonium en fonction du pourcentage du volume d'eau de fonte recueilli dans chaque colonne lors de la fonte en laboratoire.

Les sulfates ont montré également des pertes importantes dans les colonnes #3 et #4 (colonne #3: -18.83%; colonne #4: -20.15%). Les colonnes #1 et #2 montrent quant à elle de légères pertes mais qui sont plus significatives dans la colonne #2 (colonne #1: -2.39%; colonne #2: -5.25%). Jones et Bédard (1987) signalent d'ailleurs des pertes de sulfates au cours de la fonte qu'ils imputent à l'activité microbiologique associée à la matière organique provenant de la voûte forestière. Hoham et al. (1989) ainsi que Germain (1991) ont aussi observé une diminution de  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la neige où les algues nivales étaient présentes. Les résultats de terrain au lac Laflamme en mai 1989 montrent également une diminution en sulfate dans la neige colonisée par les algues nivales. Le sulfate peut être utilisé par plusieurs micro-organismes à des fins de synthèse de certains acides aminés (Richmond 1986; Bold et Wynne 1978; Round 1973; Brock 1970).

### 3. CROISSANCE DANS UNE COLONNE DE NEIGE

La tentative d'obtenir une floraison algale donnant une coloration verte à la neige à l'intérieur d'une petite colonne de verre placée dans des conditions similaires à celles observées sur le terrain s'est avérée un échec. Aucune floraison algale ne fut aperçue pendant les 7 jours que dura l'expérience. Des conditions de laboratoires inadéquates, une durée de fonte trop courte, des algues ayant perdues leur capacité de se reproduire dans le milieu naturel, en sont peut-être la ou les causes.



## V. CONCLUSION

En somme, les résultats de l'étude au lac Laflamme montrent que la diminution des composés azotés ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ ) observée dans la neige lors de la fonte peut être attribuée à la présence d'algues nivales. Les expériences de laboratoire ont montré que l'azote sous forme de  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  pouvait être mobilisé dans la neige par les algues nivales d'une part et par les micro-organismes associés à la matière organique de la voûte forestière d'autre part. Cependant au lac Laflamme, la mobilisation de l'azote est imputable uniquement aux algues nivales car les concentrations de cations associés à la matière organique n'ont présentées aucune différence significative entre les échantillons de neige colonisée par les algues et les échantillons de neige sans algue. Le lessivage des composés azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) par un écoulement préférentiel de l'eau de fonte là où se trouvent les algues nivales peut être également exclu en raison des concentrations semblables de chlorures retrouvées dans les échantillons de neige avec et sans algue; les chlorures étant une espèce ionique conservatrice dans le couvert de neige.

Comme la relation entre la physico-chimie de la neige et l'activité biologique nivale est un domaine de recherche nouveau, la poursuite des recherches est essentielle afin de mieux comprendre le fonctionnement à l'intérieur du biotope qu'est le couvert de neige et ainsi améliorer notre compréhension des mécanismes liés à l'acidification des écosystèmes où la neige est présente. De plus, il serait intéressant dans les prochaines études de tenter de comprendre les relations existantes entre les différents stades cellulaires des algues nivales et leur besoin nutritif. Comme le cycle de vie de ces espèces d'algue ne dure qu'une à deux semaines, il faut donc

être au bon endroit au bon moment afin de pouvoir observer ces différents stades cellulaires. De plus, une concentration suffisante d'algues doit être présente dans le couvert de neige pour révéler leur présence sous forme d'une floraison algale verdâtre.

Somme toute, on peut penser que la répartition des algues nivales est plus étendue qu'on le pense. Par exemple, à la fin de mai 1989 où la neige avait entièrement disparue au lac Laflamme, des neiges colonisées par des algues nivales et ayant une coloration verte furent aperçues au lac Noir situé à une altitude plus élevée dans le parc des Laurentides. Selon que certains facteurs soient présents tels que le temps de fonte, la température de l'air, la disponibilité des éléments nutritifs, l'intensité de la lumière solaire, etc., il est plausible de penser que des algues nivales existent ailleurs dans l'est du Canada. Alors même si la présence des algues nivales survient généralement vers la fin de la fonte printanière au moment où la majorité de la charge de polluants acides est passée, les modèles hydrogéochemiques de fonte devraient donc prendre en considération l'impact de ces micro-organismes sur la physico-chimie de l'eau de fonte.

## VI. BIBLIOGRAPHIE

ADAMS, W.P. et N.T. ROULET (1982); Areal differentiation of land and lake snowcover in a small subarctic drainage basin; Nordic Hydrology; 13: 139-156.

ADAMS, W.P. (1981); Snow and ice on lakes; Dans: Handbook of snow (édité par D.M. Gray et D.H. Male); Pergamon Press; Oxford.

BARRY, P.J. et A.G. PRICE (1987); Short term changes in the fluxes of water and dissolved solutes during snowmelt; Dans: Seasonal snowcovers: Physics, chemistry, hydrology (édité par H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas).

BOLD, H.C. et M.J. WYNNE (1978); Introduction to the algae: structure and reproduction; Prentice-Hall Inc.; New Jersey; 706 pages.

BOSTWICK, C.D., L.R. BROWN et R.G. TISCHER (1968); Some observations on the sodium and potassium interaction in the blue-green alga Anabaena flosaquae A-37; Physiol. Plant,; 21: 466.

BRIMBLECOMBE, P., M. TRANTER, S. TSIOURIS, T.D. DAVIES et C.E. VINCENT (1986); The chemical evolution of snow and meltwater; Dans: Modelling snowmelt-Induced Processes; IAHS Publ.; 15: 283-296.

CADLE, S.H., J.M. DASCH et P.A. MULAWA (1985); Atmospheric concentrations and the deposition velocity to snow of nitric acid, sulfur dioxide and various particulate species; Atmos. Environ,; vol 18, 11: 1819-1827.

CADLE, S.H., J.M. DASCH et N.E. GROSSNICKLE (1984); Retention and release of chemical species by a northern Michigan snowpack; Water Air Soil Pollut.; 22: 303-319.

CADLE, S.H., J.M. DASCH et N.E. GROSSNICKLE (1983); Northern Michigan snowpack - A study of acid stability and release; *Atm. Env.*; 18: 807-916.

CHAMPIAT, D. et J.P. LARPENT (1978); Aquatic microflora enumeration by means of adenylic nucleotides dosage; *Hydrobiologia*; 58: 37.

COLBECK, S.C. (1987); Snow metamorphism and classification; Dans: *Seasonal snowcover: Physics, chemistry, hydrology* (édité par H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas).

COLBECK, S.C. (1981); A simulation of the enrichment of atmospheric pollutants in snow cover runoff; *Water Resour. Res.*; 17(5): 1383-1388.

CURL, H. JR, J.T. HARDY et R. ELLERMEIR (1972); Spectral absorption of solar radiation in alpine snowfields; *Ecology*; 53: 1189-1194.

CZYGAN, F.C. (1970); Blutregen und blutschnee: Stickstoffmangelzellen von Haemotococcus pluvialis und Chlamydomonas nivalis; *Arch. Mikrobiol.*; 74: 69-76.

DAVIES, T.D, P.W. ABRAHAM, M. TRANTER, I. BLACKWOOD, P. BRIMBLECOMBE et C.E. VINCENT (1984); Black acid snow in the remote Scottish Highlands; *Nature* 312: 58-61.

DELMAS, V. et H.G. JONES (1987); Wind as a factor in a direct measurement of the dry deposition of acid pollutants to snowcovers; Dans: *Seasonal snowcovers: Physics, chemistry, hydrology* (édité par H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas).

ENGLISH, M.C., R.G. SEMKIN, D.S. JEFFRIES, P.W. HAZLETT et N.W. FOSTER (1987); Methodology for investigation of snowmelt hydrology and chemistry within an undisturbed Canadian shield watershed; Dans: *Seasonal snowcovers: Physics, chemistry, hydrology* (édité par H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas); pages: 467-501.

EPPLEY, R.W., J.L. COATSWORTH et L. SALORZANA (1969); Studies on nitrate reductase in marine phytoplankton; Limnol. Oceanogr.; 14: 194.

FLORES, F., M.G. GUERRERS et M. LOSADA (1980); Short term ammonium inhibition of nitrate utilization by Anacystis nidulans and other cyanobacteria; Arch. Microbiol.; 128: 137.

FOTT, B. (1970); Kryobiologie; Limnol. Oceanogr.; 15: 660-661.

FUKUSHIMA, H. (1963); Studies on cryophytes in Japan; The Journal of the Yokohama Municipal University; Series C-43; 144: 1-147.

GALLOWAY, J.N., C.L. SCHOFIELD, G.R. HERREY et E.R. ALTWICKER (1980); An analysis of lake acidification using annual budgets; Dans: Ecological impact of acid precipitation (édité par D. Drablos et A. Tollan); SNSF; Oslo; pages: 254-255.

GARRIC, R.K. (1965); The cryoflora of the Pacific Northwest; Am. J. Bot.; 52: 1-8.

GERMAIN, L. (1991); Dynamique des composés azotés et activité microbiologique de la neige au cours de la fonte printanière; Mémoire de maîtrise; INRS-Eau.

GERRATH, J.F. et K.H. NICHOLLS (1974); A red snow in Ontario caused by the dinoflagellate GYMNODINIUM PASCHERI; Can. J. Bot.; 52: 682-685.

GJESSING, E.T., A. HENRIKSEN, M. JOHANNESSEN et R.F. WRIGHT (1976); Effects of acid precipitation on freshwater chemistry; Dans: Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway (édité par: F.H. Braekke); SNSF-Project Fr 6/76; pages: 65-85.

HARDY, J.T. et H. Jr CURL (1972); The candy-colored, snowflaked alpine biome; Nat. Hist.; 81 (9): 74-78.

HEALEY, F.P. et L.L. HENDZEL (1980); Physiological indicators of nutrient deficiency in lake phytoplankton; Can. J. Fish. Aquat. Sci.; 37: 422.

HODSON, R.E., O. HOLM-HANSEN et F. AZAM (1976); Improved methodology for ATP determination in marine environments; Mar. Biol.; 34: 143.

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

HOHAM, R.W. (1987); Snow algae from high-elevation temperate latitudes and semi-permanent snow: their interaction with their environment; Dans: Proceedings of the Eastern Snow Conference, 44th annual meeting, Fredericton, N.B., June 3 & 4; pages: 73-79.

HOHAM, R.W. et W.W. MOHN (1985); The optimum pH for four strains of acidophilic snow algal in the genus Chloromonas (Chlorophyta) and possible effects of acid precipitation; Journ. Phycol.; 21: 603-609.

HOHAM, R.W., J.E. MULLET et S.C. ROEMER (1983); The life history and ecology of the snow alga CHLOROMONAS POLYPTERA comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales); Can. J. Bot.; 61: 2416-2429.

HOHAM, R.W. (1980); Unicellular chlorophytes - Snow algae; Dans: Phytoflagellates; Edité par E. Cox. Elsevier North Holland Inc.; New York; pages: 61-84.

HOHAM, R.W., S.C. ROEMER et J.E. MULLET (1979); The life history and ecology of the snow alga CHLOROMONAS BREVISPIINA comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales); Phycologia; 18: 55-70.

HOHAM, R.W. et D.W. BLINN (1979); Distribution of cryophilic algae in an arid region, the American Southwest; Phycologia; 18: 133-145.

HOHAM, R.W. et J.E. MULLET (1977); The life history and ecology of the snow alga CHLOROMONAS CRYOPHILA sp. nov. (Chlorophyta, Volvocales); Phycologia; 16: 53-68.

HOHAM, R.W. (1976); The effect of coniferous litter and different snow meltwaters upon the growth of two species of snow algae in axenic culture; Arct. Alp. Res.; 8: 377-386.

HOHAM, R.W. (1975a); Optimum temperature and temperature ranges for growth of snow algae; Arct. Alp. Res.; 1: 13-24.

HOHAM, R.W. (1975b); The life history and ecology of the snow alga Chloromonas pichincha (Chlorophyta, Volvocales); Phycologia; 14: 213-226.

HOHAM, R.W. (1974a); New findings in the life history of the snow alga, CHLAINOMONAS RUBRA (Stein & Brooke) comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales); Syesis; 7: 239-247.

HOHAM, R.W. (1974b); Chlainomonas kolii (Hardy et Curl) comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales), a revision of the snow alga, Trache-lomonas Kolii Hardy et Curl (Euglenophyta, Euglenales); Journ. phycol.; 10: 392-396.

HOHAM, R.W. (1971); Laboratory and field studies on snow algae of the Pacific Northwest; Thèse de doctorat; Université de Washington; 208 pages.

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

JEFFRIES, D.S., C.M. COX et P.J. DILLON (1979); Depression of pH in lakes and streams in central Ontario during snowmelt; J. Fish. Res. Board. Canada; 36:640-646.

JOHANNESSEN ,M., A. SKARTVEIT et R.F. WRIGHT (1980); Streamwater chemistry before, during and after snowmelt; Dans: Ecological impact of acid precipitation (édité par D. Drablos et A. Tollan); Norvège; pages: 224-225.

JOHANNESSEN, M. et A. HENRIKSEN (1978); Chemistry of snowmelt: changes in concentration during melting; Wat. Ressources.Res.; 14: 615.

JONES, H.G. et J. Stein (1990); Hydrogeochemistry of snow and snowmelt in catchment hydrology; Dans: Process studies in hillslope hydrology (édité par M.G. Anderson et T.P. Burt), pages: 255-297.

JONES, H.G. (1987); Chemical dynamics of snowcover and snowmelt in a boreal forest; Dans: Seasonal snowcovers: Physics, chemistry, hydrology (édité par H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas); pages: 531-574.

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

JONES, H.G. et Y. BEDARD (1987); The dynamics and mass balances of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in meltwater and surface-runoff during spring melt in a boreal forest; Dans: Forest hydrology and watershed management; IAHS Publication; 167: 19-31.

JONES, H.G. (1986); Composition of meltwater: state of the science and proposed research; Dans: Workshop on acid deposition monitoring for snowfall and snow pack; pages: 1-29.

JONES, H.G. et W. SOCHANSKA (1985); The chemical characteristics of snowcover in a northern boreal forest during the spring runoff period; Annals of Glaciology; 7: 167-174.

JONES, H.G. (1985); The chemistry of snow and meltwaters within the mesostructure of a boreal forest snowcover; Annals Glaciol.; 7: 161:166.

JORGENSEN, S.E. (1979); Handbook of environmental data and ecological parameters; International society for ecological modeling.

KOBAYASHI, Y. (1967); Coloured snow with Chlamydomonas nivalis in the Alaskan arctic and Spitzbergen; Bull. Nat. Sci. Mus.; 10: 207-210.

KOBAYASHI, Y. et H. FUKUSHIMA (1952); On the red and green snow newly found in Japan; Bot. Mag.; Tokyo; 65: 765:766.

KOL, E. et S. EURDA (1974); Red snow algae from Spitsbergen; Astarte; 7: 61-66.

KOL, E. (1968); Kryobiologie; Dans: Biologie und Limnologie des Schnees und Eises; Stuttgart; pages: 198-208.

KOL, E. (1941); The green snow of Yellowstone National Park; Amer. Jour. Bot.; 28: 185-191.

LEFEBVRE, Y., P. COUTURE et D. COUILLARD (1988); An analytical procedure for the measurement of ATP extracted from activated sludge; Can. J. Microbiol.; 34: 1275-1279.

LEIVESTAD, G.E. et I.P. MUNIZ (1976); Fish kill at low pH in a Norwegian river; Nature; 259: 391-392.

LEIVESTAD, G.E., G. HENREY, I.P. MUNIZ et E. SNEKVIK (1976); Effects of acid precipitation on freshwater organisms; Dans: Impacts of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems Norway (édité par F. Braekke); pages: 87-111.

LEWIN, R.A. (1962); Physiology and biochemistry of algae; Academic Press; New York; page: 543.

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

MANCINELLI, R.L. (1986); Alpine tundra soil bacterial responses to increased soil loading rates of acid precipitation, nitrate, and sulfate; Arctic and Alpine Research; 18: 269-275.

MARCHANT, H.J. (1982); Snow algae from the Australian Snowy Mountains; Phycologia; 21: 178-184.

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; 31: 1184-1187.

MELLOR, M. (1977); Engineering properties of snow; J. Glaciology; 19: 15-65.

MERRIAM, G., J. WEGNER et D. CALDWELL (1983); Invertebrate activity under snow in deciduous woods; Holarctic ecology; 6: 89-94.

OVERREIN, L.N., H.M. SEIP et A. TOLLAN (1980); Acid precipitation, effects on forest and fish; Final report SNSF-Project 1972-1980, Oslo (Norvège); 175 pages.

PAPINEAU, M. (1988); Les études du bilan ionique du lac Laflamme en 1985 et 1986; Environnement Canada; Direction des eaux intérieures; Québec; 105 pages.

PAPINEAU, M. (1987); Effects of acid precipitation on a boreal forest ecosystem: ion budgets and change in water chemistry for the Laflamme lake watershed; Environnement Canada; Direction des eaux intérieures; Québec; 108 pages.

PISTORIUS, E.K., E.A. FUNKHOUSSER et H. VOSS (1978); Effect of ammonium and ferricyanide on nitrate utilization by Chlorella vulgaris; Planta; 141: 279.

POLLOCK, R. (1970); What colors the mountain snow ?; Sierra Club Bull.; 55: 18-20.

PRESCOTT, G.W. (1968); The algae: a review; Houghton Mifflin ed.; New York; 436 pages.

RAYNOR, G.S. et J.V. HAYNES (1983); Differential rain and snow scavenging efficiency implied by ionic concentration differences in winter precipitation; Dans: Precipitation scavenging, dry deposition and resuspension, Elsevier, New York; 1: 249-264.

REICHARDT, W., J. OVERBECK et L. STEUBING (1968); Free dissolved enzymes in lake waters; Nature; 216: 1345.

RICHMOND, A. (1986); Handbook of microalgal mass culture; CRC Press; 528 pages.

ROUND, F.E. (1973); The biology of the algae; 2e édition; St.Martin's Press; New York; 278 pages.

SIEMINSKA, J. (1951); The red snow in Tatra (Chlamydomonas nivalis Wille); Acta Soc. Bot. Polon.; 21: 1-4.

SKARTVEIT, A. et Y.T. GJESSING (1979); Chemical budgets and chemical quality of snow and runoff during spring snowmelt; Nordic Hydrology; 10: 141-154.

STEIN, J.R. et C.C. AMUNDSEN (1967); Studies on snow algae and fungi from the front range of Colorado; Can. J. Bot.; 45: 2033-2043.

STEIN, J.R. et R.C. BROOKE (1964); Red snow from Mt. Seymour, British Columbia; Can. J. Bot.; 42: 1183-1188.

STRICKLAND, J.D.H. et L. SOLORZANO (1966); Determination of mono-esterase hydrolysable phosphate and phosphorus esterase activity in seawater; Dans: Some contemporary studies in marine science (édité par H. Barnes, Londres); 665 pages.

SUZUKI, K. (1982); Chemical changes of snow cover by melting; Jap. J. Limnol.; 43(2): 102-112.

SYRETT, P. et I. MORRIS (1963); The inhibition of nitrate assimilation by ammonium in Chlorella; Biochem. Biophys. Acta; 67: 566.

THOMAS, W.H. (1972); Observations on snow algae in California; J. Phycol.; 8: 1-9.

THOMPSON, I.P., I.L. BLACKWOOD et T.D. DAVIES (1987); The effect of polluted and leached snow meltwaters on the soil bacterial community. Quantitative response; Env. Pollution; 43: 143-154.

THORNTON, J.D. et S.J. EISENREICH (1982); Impact of land-use on the acid and trace element composition of precipitation in the North central U.S.; Atm. Env.; 16: 1945-1955.

TRANTER, M., T.D. DAVIES, P.W. ABRAHAMS, I. BLACKWOOD, C.E. VINCENT et P. BRIMBLECOMBE (1987); Spatial variability in the chemical composition of snowcover in a small, remote, Scottish catchment; Atmospheric Environment; 21: 853-862.

TRANTER, M., P. BRIMBLECOMBE, T.D. DAVIES, C.E. VINCENT, P.W. ABRAHAMS et I. BLACKWOOD (1986); The composition of snowfall snowpack and meltwater in the Scottish Highlands - Evidence for preferential elution; Atm. Envir.; 20: 517-525.

TSIOURIS, S., C.E. VINCENT, T.D. DAVIES et P. BRIMBLECOMBE (1985); The elution of ions through field and laboratory snow-packs; Annals of Glaciology; 7: 196-201.

VIALA, G. (1966); L'astaxanthine chez le Chlamydomonas nivalis Wille; Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci; 263: 1383-1386.

VINCENT, W.F. (1988); Microbial ecosystems of Antarctica; Cambridge University Press.

VISSER, S.A. (1973); The microflora of a snow depository in the city of Quebec; Environ. Letters; 4: 267-272.

WETZEL, G.R. (1975); Limnology; Editions Saunders, Philadelphie; 743 pages.

## VII. ANNEXES

### ANNEXE 1: PREPARATION DU MILIEU DE CULTURE M-1 (Hoham et al. 1979)

Pour préparer 1 litre de milieu M-1, procéder de la façon suivante:

634 ml	H <sub>2</sub> O déminéralisée	
1 ml	CaCl <sub>2</sub>	(0.5 g/100 ml)
1 ml	NaNO <sub>3</sub>	(2.5 g/100 ml)
1 ml	NH <sub>4</sub> Cl	(0.5 g/100 ml)
1 ml	CaSO <sub>4</sub> • 2 H <sub>2</sub> O	(0.5 g/100 ml)
1 ml	MgSO <sub>4</sub> • 7 H <sub>2</sub> O	(0.5 g/100 ml)
1 ml	NaSiO <sub>3</sub> • 9 H <sub>2</sub> O	(0.2 g/100 ml)
250 ml	Fe (sous forme d'EDTA) <sup>a</sup>	
10 ml	Eléments traces <sup>b</sup>	
2 ml	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	(0.2 M; 3.48 g/100 ml)
<u>98 ml</u>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	(0.2 M; 2.72 g/100 ml)
1000 ml		

#### a) Fe sous forme d'EDTA

Dissoudre 660 mg de Na<sub>2</sub>EDTA dans 700 ml d'eau déminéralisée, le pH devant être situé entre 4.8 et 4.9. Ajuster le pH à 7.5 en utilisant du NaOH. Dissoudre 702 mg de Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> • 6 H<sub>2</sub>O dans 100 ml d'eau déminéralisée et ajouter cette solution à celle de Na<sub>2</sub>EDTA. Compléter le volume à 1000 ml. Le pH résultant devrait se situer entre 3.1 et 3.3.

#### b) Eléments traces

A 800 ml d'eau déminéralisée, ajouter:

0.1 g	CuSO <sub>4</sub> • 5 H <sub>2</sub> O
0.1 g	MnCl <sub>2</sub> • 4 H <sub>2</sub> O
0.01 g	TiO <sub>2</sub>
0.1 ml	Br <sub>2</sub> (solution 1 N)
0.1 g	ZnSO <sub>4</sub> • 7 H <sub>2</sub> O
0.05 g	CoCl <sub>2</sub> • 6 H <sub>2</sub> O

0.01 g     BaCl<sub>2</sub> • 2 H<sub>2</sub>O  
0.1 g       H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>  
0.1 g       FeCl<sub>3</sub> • 6 H<sub>2</sub>O  
0.05 g      Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> • 2 H<sub>2</sub>O

Compléter à 1000 ml avec de l'eau déminéralisée.

Pour les besoins en vitamines en biotine, vitamine B<sub>12</sub> et en thiamine, voir Hoham et al. (1979).

Pour faire des milieux solides, utiliser de l'agar purifié "Difco-Bacto" 1.6% (16 g d'agar/litre de milieu M-1). Pour des milieux liquides, utiliser de l'agar à 0.5 ou 1.0%.

Après l'autoclave, le pH final du milieu M-1 est approximativement de 5.0. Ce pH est similaire au pH de la neige lors de la croissance des algues nivales.

**ANNEXE 2: Caractéristiques physiques et micro-biologiques moyennes du couvert de neige au lac Laflamme où furent prélevés des échantillons de neiges contenant des algues nivales. La période de prélèvement s'échelonne du 07/05/89 au 20/05/89.**

SITE	DATE	HAUTEUR DU COUVERT (cm)	POSITION DES ALGUES DANS LE COUVERT (cm)	NOMBRE DE CELLULES PAR ml	VITESSE D'ÉCOULEMENT (cm/min)	TEMPERATURE DE L'AIR °C		PRECIPITATIONS (mm)	
						MAX.	MIN.	PLUIE	NEIGE
1	07/05	9	4-9	517500	-	13.0	2.0	7.4	0.0
2	07/05	29	19-29	75000	2.14				
3	07/05	21	13-21	50000	4.50				
4	08/05	28	20-28	30000	4.50	11.0	-0.5	12.9	0.0
5	08/05	30	19-30	42500	-				
6	08/05	20	11-20	132500	-				
7	08/05	24	15-24	40000	-				
8	08/05	11	4-11	120000	-				
9	08/05	36	27-36	107500	-				
10	10/05	25	17-25	35000	3.33	8.0	-3.0	0.0	0.0
11	10/05	44	32-44	125000	2.50				
12	10/05	18	11-17	215000	-				
13	10/05	30	25-30	35000	4.33				
14	10/05	30	24-30	97500	-				
15	10/05	33	22-33	110000	-				
16	12/05	15	5-15	85000	-	13.5	6.5	7.2	0.0
17	12/05	30	21-30	75000	4.67				
18	12/05	16	9-16	152500	3.33				
19	12/05	24	16-24	185000	-				
20	12/05	15	9-15	195000	-				

ANNEXE 2: Suite ...

SITE	DATE	HAUTEUR DU COUVERT (cm)	POSITION DES ALGUES DANS LE COUVERT (cm)	NOMBRE DE CELLULES PAR ml	VITESSE D'ÉCOULEMENT (cm/min)	TEMPERATURE DE L'AIR °C		PRECIPITATIONS (mm)	
						MAX.	MIN.	PLUIE	NEIGE
21	12/05	14	6-14	170000	-				
22	12/05	21	7-21	70000	-				
23	12/05	30	26-30	97500	6.00				
24	12/05	25	17-25	125000	-				
25	12/05	27	21-27	117500	-				
26	14/05	19	8-19	62500	-	15.5	5.5	0.5	0.0
27	14/05	11	5-11	200000	-				
28	14/05	26	18-26	67500	-				
29	14/05	21	15-21	130000	-				
30	14/05	24	19-24	225000	-				
31	14/05	31	26-31	72500	3.00				
32	14/05	30	26-30	427500	-				
33	14/05	41	34-41	57500	-				
34	14/05	28	18-28	95000	2.67				
35	14/05	38	23-38	32500	-				
36	16/05	26	21-26	145000	-	19.5	0.5	2.0	0.0
37	16/05	45	39-45	130000	3.33				
38	16/05	37	32-37	410000	-				
39	16/05	26	22-26	137500	-				
40	16/05	27	23-27	445000	-				

ANNEXE 2: Suite ...

SITE	DATE	HAUTEUR DU COUVERT (cm)	POSITION DES ALGUES DANS LE COUVERT (cm)	NOMBRE DE CELLULES PAR ml	VITESSE D'ECOLEMENT (cm/min)	TEMPERATURE DE L'AIR °C		PRECIPITATIONS (mm)	
						MAX.	MIN.	PLUIE	NEIGE
41	16/05	36	28-36	37500	-				
42	18/05	32	27-32	150000	-	26.0	1.0	0.0	0.0
43	18/05	25	20-25	150000	7.00				
44	18/05	9	1-9	640000	-				
45	18/05	15	7-15	95000	-				
46	18/05	32	27-32	92500	-				
47	18/05	50	30-50	180000	-				
48	18/05	17	10-17	420000	-				
49	20/05	37	30-37	147500	4.50	23.0	10.0	0.0	0.0
<b>MINIMUM:</b>		9	-	30000	2.14	8.0	-3.0	0.0	0.0
<b>MAXIMUM:</b>		50	-	640000	7.00	26.0	6.5	12.9	0.0

**ANNEXE 3: Analyses physico-chimiques et biologiques de l'eau de fonte des échantillons de neige avec et sans algues recueillis au lac Laflamme en mai 1989.**

No Ech.	Cell/ml	pH	Condu. urho/cm	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup> (uéq/l)	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Chl-a (ug/l)	ATP	DOC (mg/l)
1	517500	5.17	6.00	7.194	0.000	0.000	3.416	2.645	10.397	1.564	9.644	0.998	28.55	7.99	2.425
1A	15000	4.84	8.00	4.852	0.000	6.775	6.044	4.441	7.178	1.975	6.472	3.769			2.737
2	75000	4.59	16.50	7.476	0.000	0.000	4.181	3.144	7.656	1.728	9.465	4.213	14.04	2.17	2.062
2A	0	4.70	12.50	4.344	0.000	6.291	5.734	2.445	3.959	0.987	2.532	8.370			0.401
3	50000	4.80	10.00	6.263	0.000	6.807	15.856	7.735	5.829	4.444	10.232	8.315	18.56	2.78	3.515
3B	5000	4.90	10.00	8.209	0.000	7.549	13.931	7.735	5.481	5.513	16.422	12.804			5.695
4	30000	4.94	6.70	3.357	0.000	7.065	4.865	2.794	2.436	1.070	1.842	5.543	33.31	2.51	0.336
4A	1250	4.87	7.80	3.893	0.000	8.162	5.237	3.194	2.088	0.905	1.177	9.479			0.539
5	42500	5.22	5.50	3.893	0.000	0.000	2.670	2.645	3.480	0.905	2.967	6.430	19.86	2.09	0.539
5A	0	5.04	6.70	4.993	0.000	0.000	2.691	2.645	3.132	1.399	8.058	3.326			2.014
6	132500	5.11	4.70	3.639	0.000	0.000	0.000	1.846	4.742	1.152	2.609	0.388	25.80	3.88	0.692
6A	6250	4.92	8.30	4.824	0.000	13.517	9.419	6.038	3.698	2.222	1.867	9.201			0.488
7	40000	5.02	6.00	3.131	0.000	0.000	3.188	2.295	1.131	0.741	1.202	6.707	8.24	1.71	0.437
7B	0	5.10	6.90	5.896	0.000	10.226	7.141	4.042	5.655	1.646	2.456	15.299			0.794
8	120000	4.76	11.00	10.071	0.000	0.000	7.141	5.539	5.090	2.880	10.360	7.871	22.60	3.80	4.151
8A	3750	4.99	6.60	4.429	0.000	0.000	3.830	4.142	4.437	1.893	3.325	5.100			1.760
9	107500	5.02	4.70	5.388	0.000	0.000	1.635	3.044	4.524	0.905	3.018	7.538	17.84	2.78	2.116
9A	8750	4.91	8.30	7.024	0.000	7.000	8.363	6.587	4.916	1.893	2.865	9.756			1.913
10	35000	5.10	5.00	3.160	0.000	0.000	3.747	2.595	2.523	1.564	2.967	8.093	32.12	5.32	1.397
10A	2500	5.24	4.90	3.188	0.000	6.210	5.796	2.395	3.002	1.070	2.686	6.984			0.610

ANNEXE 3: Suite ...

No Ech.	Cell/ml	pH	Condu. umho/cm	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup> (ueq/l)	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Chl-a (ug/l)	ATP	DOC (mg/l)
11	125000	5.00	6.20	3.696	0.000	0.000	4.616	3.593	5.046	1.234	2.405	5.820	25.57	2.05	0.759
11B	5000	4.95	6.25	3.272	0.000	5.097	5.175	3.244	1.871	1.070	2.328	6.652			0.403
12	215000	4.95	5.90	3.413	0.000	0.000	5.879	4.242	5.438	1.481	4.553	2.716	31.84	4.87	1.649
12A	6250	4.76	11.00	5.162	0.000	7.307	5.610	3.743	2.175	1.481	3.198	15.576			1.159
13	35000	4.94	6.00	3.216	0.000	0.000	4.285	3.094	2.088	0.905	3.504	5.986	16.65	4.26	1.575
13B	6250	4.97	9.40	4.570	0.000	14.743	12.441	5.938	3.393	2.633	5.474	20.232			2.183
14	97500	5.04	4.75	1.467	0.000	0.000	0.000	2.146	1.392	0.741	2.507	0.887	29.59	4.33	1.174
14A	5000	5.05	6.10	3.865	0.000	8.823	6.686	2.395	1.392	1.152	2.686	10.476			0.922
15	110000	5.13	4.50	2.229	0.000	0.000	3.353	2.395	1.827	0.576	1.842	3.769	28.00	2.28	0.863
15A	1250	5.16	7.50	4.316	0.000	13.307	12.130	5.289	3.263	1.646	4.477	19.622			1.248
16	85000	4.86	8.30	5.134	0.000	0.000	4.078	4.142	1.958	1.399	4.604	5.100	23.70	5.29	2.434
16A	6250	4.92	9.80	5.106	0.000	8.742	6.251	4.691	5.003	1.893	9.465	10.920			2.463
17	75000	5.14	5.50	2.934	0.000	0.000	3.954	2.745	1.871	1.234	1.279	6.319	11.31	1.90	0.679
17A	2500	4.86	7.10	3.329	0.000	6.371	5.403	3.244	0.914	1.399	1.816	5.432			0.795
18	152500	5.09	5.00	2.511	0.000	0.000	2.091	2.595	22.316	1.070	2.405	0.388	24.71	2.89	1.346
18A	2500	5.07	7.00	4.373	0.000	8.178	6.893	3.194	5.003	2.140	3.095	12.250			1.636
19	185000	5.06	5.00	1.805	0.000	0.000	2.174	3.493	1.958	1.810	2.916	0.554	14.16	4.11	2.216
19A	2500	4.89	9.30	4.626	0.000	12.388	11.219	4.291	3.002	1.399	3.095	9.201			1.506
20	195000	4.92	7.40	5.050	0.000	0.000	3.022	4.641	2.262	3.292	5.883	0.222	21.96	5.93	4.478
21	170000	4.86	9.30	6.601	0.000	0.000	7.680	5.389	3.654	2.057	9.925	0.665	28.47	4.30	3.927
22	70000	5.19	4.15	2.990	0.000	0.000	2.049	2.295	2.567	1.070	3.095	1.219	26.92	4.03	1.027

ANNEXE 3: Suite ...

No Ech.	Cell/ml	pH	Condu. $\mu\text{mho/cm}$	$\text{Cl}^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{eq/L}$ )	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{NH}_4^+$	Chl-a ( $\mu\text{g/L}$ )	ATP	DOC ( $\text{mg/L}$ )
22A	6250	4.94	10.50	5.529	0.000	17.162	14.449	4.990	5.090	2.633	6.983	14.578			2.100
23	97500	5.02	5.80	3.639	0.000	0.000	2.111	3.293	1.175	1.810	2.942	0.499	18.79	4.07	2.477
23A	6250	4.77	9.50	2.567	0.000	13.565	8.094	4.192	2.828	1.893	1.560	4.490			0.810
24	125000	5.12	5.20	4.316	0.000	0.000	3.457	3.144	2.741	1.152	2.967	2.494	20.88	3.19	1.230
24A	7500	4.99	6.90	4.090	0.000	6.710	6.521	3.643	2.480	1.646	2.302	7.705			1.303
25	117500	5.19	5.00	3.470	0.000	0.000	2.277	3.792	1.479	1.234	2.481	5.210	14.49	2.97	1.259
25A	3750	5.09	7.20	5.586	0.000	0.000	7.079	4.890	3.393	2.633	5.090	6.208			2.274
26	62500	4.75	10.80	5.698	0.000	0.000	13.869	5.140	3.437	2.386	8.876	4.046	20.82	5.10	4.355
26A	6250	5.18	5.50	4.232	0.000	10.291	5.299	3.792	2.654	1.070	2.149	10.144			1.351
27	200000	4.82	9.00	6.940	0.000	0.000	15.215	3.743	6.438	1.728	6.548	4.490	20.82	4.75	1.854
28	67500	5.04	5.50	2.934	0.000	0.000	4.885	3.493	2.088	1.564	2.942	6.541	21.41	4.41	1.915
28A	5000	4.95	7.20	4.824	0.000	6.694	7.286	5.140	2.915	2.222	5.832	10.781			2.845
29	130000	4.90	7.60	3.780	0.000	5.807	4.554	3.643	1.349	1.234	2.353	9.312	18.44	3.12	1.137
29A	3750	5.11	6.40	4.119	0.000	8.742	6.748	3.343	2.088	1.317	2.814	10.809			1.290
30	225000	5.03	7.30	3.752	0.000	7.275	6.914	4.042	3.654	1.810	3.070	8.869	25.62	2.74	1.153
30A	3750	4.79	11.60	6.178	0.000	17.840	16.374	5.040	3.393	4.691	8.365	14.412			3.013
31	72500	5.04	6.30	2.652	0.000	0.000	7.369	4.641	1.305	1.646	2.021	4.878	21.14	3.50	1.214
32	427500	5.07	5.60	1.693	0.000	0.000	0.000	2.545	2.915	0.823	1.279	4.878	13.44	3.54	0.482
31A	6250	5.26	4.40	2.426	0.000	0.000	4.761	3.044	1.914	1.152	3.428	6.264			1.381

ANNEXE 3: Suite ...

No Ech.	Cell/ml	pH	Condu. umho/cm	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup> (ug/l)	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Chl-a (ug/l)	ATP	DOC (mg/l)
33	57500	5.08	4.80	1.608	0.000	0.000	4.906	2.196	1.914	0.658	1.049	7.261	24.98	2.66	0.207
33A	6250	5.09	5.60	2.511	0.000	7.404	4.968	3.693	1.479	1.728	0.946	4.656			1.222
34	95000	4.96	5.70	3.047	0.000	0.000	6.231	2.595	1.305	0.823	1.432	5.100	22.51	2.89	0.832
34A	6250	5.05	5.80	3.018	0.000	9.033	5.630	2.445	2.871	0.823	0.588	5.709			0.146
35	32500	5.11	4.50	1.946	0.000	8.130	4.968	3.593	0.783	1.399	0.946	4.656	12.13	2.51	1.092
35A	1250	4.98	6.00	2.081	0.000	7.275	16.539	2.495	1.044	1.152	1.023	2.882			0.756
36	145000	5.27	4.30	2.539	0.000	7.275	3.374	2.545	3.393	1.564	1.432	5.210	22.84	3.27	0.472
36A	3750	5.33	4.10	2.539	0.000	13.259	4.658	1.497	0.827	0.658	2.046	6.873			0.472
37	130000	5.08	5.50	4.993	0.000	7.694	4.740	7.385	1.392	7.571	1.688	1.995	11.54	3.12	1.744
37A	1250	5.13	5.40	2.934	0.000	9.679	13.194	2.745	1.958	1.975	2.405	5.100			0.931
38	410000	5.02	5.90	3.188	0.000	7.242	4.492	2.595	1.958	1.317	1.407	5.210	25.91	3.73	0.681
38A	8750	5.02	7.30	3.554	0.000	16.920	8.218	2.545	2.045	0.658	4.042	7.594			0.644
39	137500	5.13	4.70	2.990	0.000	6.952	3.043	2.445	1.566	0.494	1.688	1.940	25.22	4.18	0.681
39A	10000	5.18	4.50	2.426	0.000	11.339	5.775	1.996	1.610	0.905	1.944	5.709			0.944
40	445000	5.18	5.80	4.147	0.000	6.646	4.637	3.194	7.743	2.716	12.841	2.383	20.01	2.93	6.209
40A	1250	5.25	5.40	3.667	0.000	12.114	12.891	3.343	2.045	1.481	2.021	8.536			0.818
41	37500	4.96	7.40	2.652	0.000	7.339	6.935	3.942	0.435	0.987	1.049	5.488	22.40	2.89	0.363
41A	5000	4.81	9.80	3.188	0.000	19.453	10.598	2.844	1.175	1.152	1.253	7.760			0.302
43	150000	4.90	7.50	3.357	0.000	4.065	2.588	3.293	0.566	0.494	1.509	4.490	26.17	2.32	0.501
43B	2500	5.13	5.00	2.482	0.000	8.984	4.575	2.246	2.132	0.658	1.893	6.485			0.770

ANNEXE 3: Suite ...

No Ech.	Cell/ml	pH	Condu. umho/cm	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup> (uégq/l)	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Chl-a (ug/l)	ATP	DOC (mg/l)
44	640000	5.11	5.00	3.442	0.000	4.839	2.960	3.593	2.088	1.646	4.579	8.481	29.06	6.46	1.831
44A	6250	4.99	6.30	1.975	0.000	8.130	5.672	3.443	2.132	1.481	3.990	11.973			1.376
45	95000	5.02	4.00	1.890	0.000	1.500	2.298	3.244	0.783	0.823	1.995	0.388	30.93	3.04	1.831
45A	1250	5.02	6.80	3.216	0.000	11.694	6.955	1.796	2.741	0.658	1.535	10.199	0.18		0.183
46	97500	4.97	5.60	3.216	0.000	7.420	4.099	3.693	1.523	1.070	1.458	8.703	20.42	2.28	1.320
42	92500	5.20	5.10	3.498	0.000	6.968	3.581	5.838	2.219	1.564	1.791	10.753	23.79	2.97	2.034
46A	3750	5.08	5.90	3.188	0.000	9.759	5.299	2.196	3.480	0.576	1.202	9.257			0.209
47	180000	5.11	4.10	2.059	0.000	4.420	1.201	1.347	1.001	0.411	1.919	1.109	26.90	4.14	0.368
47A	0	4.71	11.00	3.018	0.000	17.259	11.385	2.794	1.001	0.823	1.791	9.922			0.196
48	420000	5.07	4.60	1.439	0.000	0.419	4.865	3.194	0.783	1.152	2.891	15.299	44.41	3.57	2.269
48A	0	5.14	5.30	3.188	0.000	5.339	3.933	1.697	1.566	0.494	3.914	5.986			0.434
49	147500	5.11	4.90	2.990	0.000	4.355	2.339	2.994	3.045	1.317	3.581	0.554	40.44	2.97	1.348
49A	0	5.05	5.50	2.877	0.000	7.952	6.645	2.395	3.089	0.741	3.377	17.017			1.348

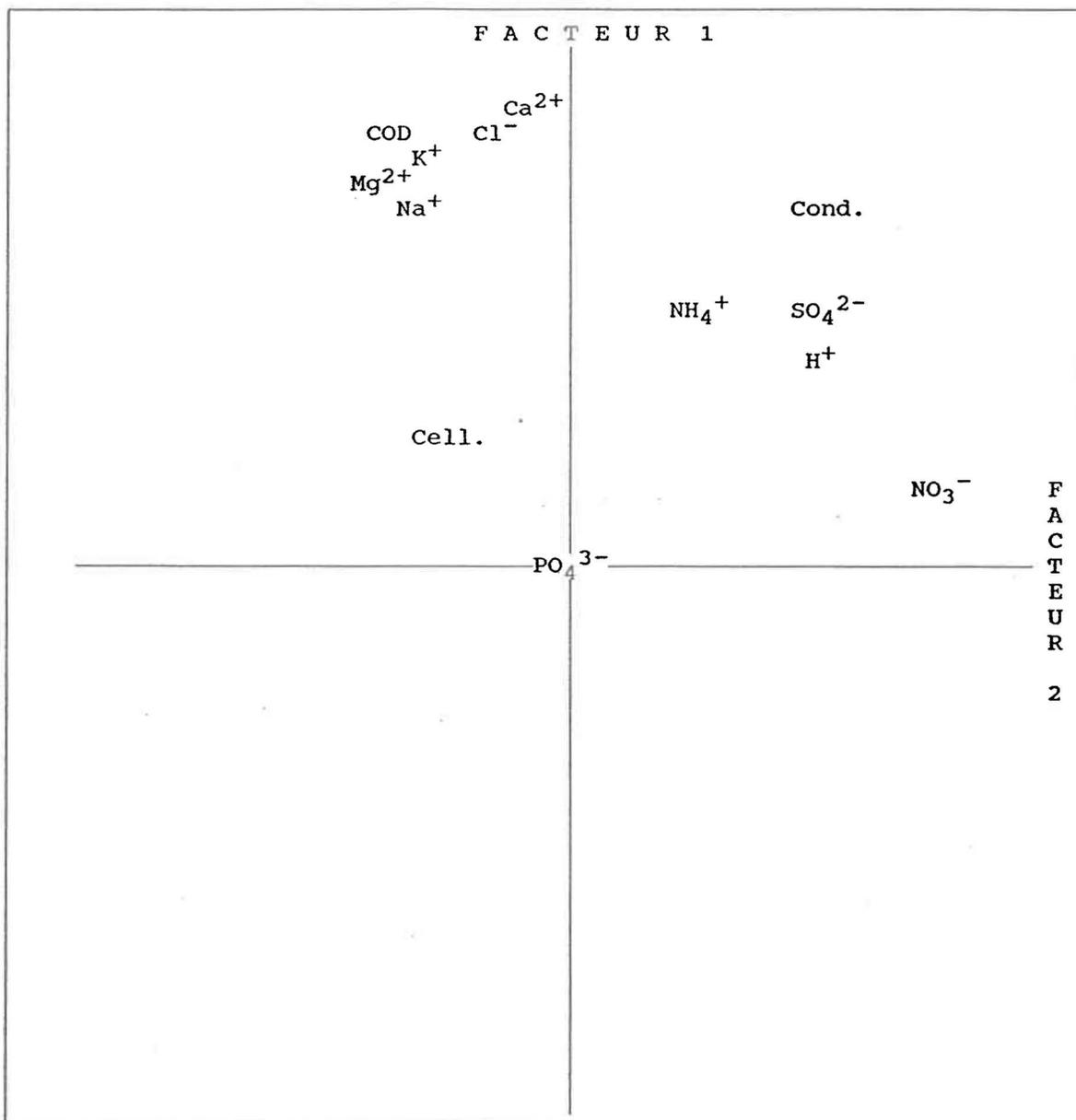
**ANNEXE 4: Moyennes des différents paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés à chaque jour d'échantillonnage au lac Laflamme en mai 1989 pour les échantillons avec algues.**

PARAMETRES	DATE							
	07/05	08/05	10/05	12/05	14/05	16/05	18/05	20/05
Nbre d'échant.	3	6	6	8	8	5	7	1
Cellules/ml	214167	78750	102917	113438	137188	253500	230714	147500
Ecart-type	214732	42050	61040	37457	123272	142580	202585	-
pH	4.85	5.01	5.03	5.08	4.99	5.14	5.05	5.11
Ecart-type	0.24	0.14	0.07	0.10	0.11	0.09	0.09	-
Cond. ( $\mu\text{mho/cm}$ )	10.83	6.43	5.39	5.49	6.48	5.24	5.39	4.96
Ecart-type	4.33	2.16	0.66	1.15	1.93	0.63	1.36	-
H <sup>+</sup> ( $\mu\text{éq/l}$ )	16.105	10.292	9.530	8.492	10.548	7.452	9.064	7.762
Ecart-type	7.736	3.590	1.530	2.241	3.104	1.428	1.984	-
Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{éq/l}$ )	6.977	4.913	2.863	3.350	3.057	3.571	2.620	2.990
Ecart-type	0.518	2.418	0.770	0.975	1.284	0.884	0.778	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu\text{éq/l}$ )	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ecart-type	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{éq/l}$ )	2.269	1.777	0.000	0.000	2.651	7.162	4.221	4.335
Ecart-type	3.209	2.633	0.000	0.000	3.473	0.350	2.378	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu\text{éq/l}$ )	7.818	3.250	3.647	2.774	5.791	4.057	3.489	2.339
Ecart-type	5.693	2.283	1.813	0.836	3.607	0.705	1.753	-

ANNEXE 4: suite ...

PARAMETRES	DATE							
	07/05	08/05	10/05	12/05	14/05	16/05	18/05	20/05
Ca <sup>2+</sup> (μéq/l)	4.508	3.027	3.011	3.187	3.406	3.633	3.493	2.994
Ecart-type	2.291	1.186	0.726	0.584	0.893	1.894	1.225	-
Na <sup>+</sup> (μéq/l)	7.961	3.567	3.052	4.508	2.180	3.210	1.125	3.045
Ecart-type	1.877	1.404	1.588	6.748	0.986	2.373	0.672	-
Mg <sup>2+</sup> (μéq/l)	2.578	1.275	1.083	1.347	1.337	2.732	1.011	1.317
Ecart-type	1.321	0.729	0.369	0.285	0.545	2.522	0.446	-
K <sup>+</sup> (μéq/l)	9.780	3.666	2.963	2.836	2.743	3.811	2.247	3.581
Ecart-type	0.328	3.061	0.876	0.864	2.446	4.516	1.083	-
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μéq/l)	4.508	5.746	4.545	2.723	6.333	3.348	6.572	0.554
Ecart-type	2.994	2.512	2.367	2.296	1.867	1.528	4.941	-
Chl-a (μg/l)	20.383	21.275	27.295	19.370	19.919	21.104	29.094	40.440
Ecart-type	6.062	7.646	5.260	5.277	4.646	5.210	6.806	-
ATP (μg/l)	4.310	2.795	3.853	3.555	3.370	3.445	3.629	2.966
Ecart-type	2.611	0.810	1.245	0.965	0.868	0.454	1.274	-
D.O.C. (mg/l)	2.667	1.379	1.236	1.584	1.397	1.957	1.314	1.348
Ecart-type	0.617	1.377	0.337	0.646	1.215	2.172	0.795	-

**ANNEXE 5: Analyse en composantes principales (facteur 1 versus facteur 2) des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans la neige contenant des algues nivales au lac Laflamme (mai 1989).**



**ANNEXE 6:** Analyse en composantes principales (facteur 1 versus facteur 2) des différents paramètres biologiques et physico-chimiques mesurés dans la neige sans algue au lac Laflamme (mai 1989).

