

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mémoire présenté à

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

comme exigence partielle à l'obtention

de la Maîtrise ès Sciences (Eau)

par

GINETTE DEVARENNES

EFFET DE LA NEIGE ARTIFICIELLE SUR DES ÉCOSYSTEMES

MONTAGNEUX

AVRIL 1994

REMERCIEMENTS

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

Je tiens également à remercier le Ministère des forêts pour son support et son aide technique spécialement monsieur Stéfán Mercier pour son aide avec les tests de germination en laboratoire et sur le terrain et monsieur Gilles Gagnon pour son aide pour effectuer les transects sur le terrain.

J'aimerais aussi remercier toute l'équipe de fabrication de neige artificielle au Mont-Sainte-Anne dirigée par monsieur André Lamontagne pour leur aide pendant la collecte de neige artificielle ainsi que monsieur Jean Bouchard pour son aide technique.

Finalement, j'aimerais remercier tout le personnel de laboratoire de l'INRS-eau pour son support technique et ses encouragements.

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour but de voir l'effet de la neige artificielle sur des écosystèmes montagneux. Pour faire ceci nous avons caractérisé la physico-chimie de la neige artificielle et de ses eaux de fonte par rapport à la neige naturelle en utilisant un modèle auparavant seulement utilisé pour la neige naturelle. Nous avons également évalué l'impact des eaux de fonte sur la chimie des eaux de l'horizon supérieur du sol. De plus, nous avons déterminé l'impact des eaux de fonte de la neige artificielle sur la germination de certaines espèces d'arbres du Québec soit le bouleau jaune (*Betula lutea*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*) dans le laboratoire et sur le terrain. Finalement nous avons effectué un relevé floristique sur deux sites ayant de l'enneigement différent pour voir si la végétation était différente.

En somme, les résultats des études sur la fonte des neiges en laboratoire ont démontré qu'en dépit de leurs origines différentes et des grands écarts entre leurs compositions chimiques relatives, la distribution des ions majeurs dans les gouttelettes congelées fabriquées par des canons à neige est semblable à celle de la neige naturelle au sol. Les coefficients de lessivage (fractionation) dans les eaux de fonte ne sont pas statistiquement différents entre les neiges artificielles et les neiges naturelles et on observe le même patron d'éluion préférentielle des espèces Na^+ , Cl^- , NO_3^- , et SO_4^{2-} . Elles se comportent donc de la même manière malgré les concentrations initiales différentes. On peut ainsi simuler la composition de la fonte de neige à l'aide des modèles déjà utilisés pour la neige naturelle.

Ces travaux ont également montrés que le sol semble avoir un effet tampon sur les eaux de fonte. Le sol contrôlerait la quantité d'ions disponibles en solution par des processus d'absorption, de désorption et par l'activité microbologique du sol.

Cette étude a aussi démontré que même si les chimies des eaux de fonte provenant de la neige artificielle et de la neige naturelle sont très différentes, il ne semble pas y avoir d'effet sur la germination des deux espèces végétales étudiées, le bouleau jaune (*Betula lutea*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*). Les résultats des études sur la germination du bouleau jaune et de l'épinette blanche ont permis de conclure que même si les concentrations des espèces chimiques dans les eaux de fonte de neige artificielle étaient de 2 à 40 fois supérieures à celles dans la neige naturelle il ne semble pas y avoir d'effet sur le taux de germination de ces deux espèces. À court terme, les eaux de fonte plus concentrées de la neige artificielle n'auraient aucun effet sur les deux espèces végétales étudiées par rapport à la neige naturelle.

Pour les transects traversant une piste de ski où il y a seulement de la neige naturelle et une piste de ski où il y a un mélange de neige naturelle et de neige artificielle, nous avons trouvé que trois espèces de plantes semblaient préférer le côté où il y avait seulement de la neige naturelle. Ces plantes étaient: *Clintonia borealis*, *Dryopteris phegopteris* et *Oxalis montana*. Seulement une espèce se trouvait surtout du côté de la

piste où il y avait de la neige artificielle soit *Trillium erectum*. Toutefois on ne peut pas dire que ces tendances sont exclusivement dûes au type de neige. D'autres paramètres pourraient influencer les tendances observées.

L'effet de la neige artificielle sur des espèces végétales n'est pas encore très bien connu. À première vue, il ne semble pas y avoir d'effet sur la germination des espèces types. Toutefois les périodes de croissance annuelle subséquentes aux fontes de neige peuvent être déterminantes dans la réussite des espèces à maintenir leurs présences dans le milieu.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
1. INTRODUCTION	1
1.1 Historique de fabrication de la neige artificielle	1
1.2 Technologie de fabrication de la neige artificielle.....	2
1.3 Système d'enneigement artificiel au Mont-Sainte-Anne.....	5
1.4 Problématique d'utilisation de la neige artificielle, la germination des plantes et le caractéristiques du sol	6
1.5 Caractéristiques physico-chimiques des neiges naturelles et artificielles	7
1.6 Composition chimique de la neige naturelle.....	7
1.7 Composition chimique de la neige artificielle.....	8
1.8 Processus chimiques et physiques dans le couvert de neige naturelle et artificielle (<0°C).....	8
1.9 Processus chimiques et physiques lors de la fonte.....	9
2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	13
3. MÉTHODOLOGIE	15
3.1 ÉCHANTILLONNAGE DE LA NEIGE NATURELLE.....	15
3.2 ÉCHANTILLONNAGE DE LA NEIGE ARTIFICIELLE.....	15
3.2.1 Lieu d'échantillonnage.....	15
3.2.2 Les types de canon à neige	15
3.2.3 Méthodologie d'échantillonnage	16
3.3 ÉCHANTILLONNAGE DU SOL	16
3.4 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS DE TERRAIN POUR LES ANALYSES.....	17
3.4.1 Lavage des récipients et du matériel	17
3.4.2 Fonte en laboratoire	17
3.4.3 Filtration	19
3.4.4 Conservation des échantillons.....	19

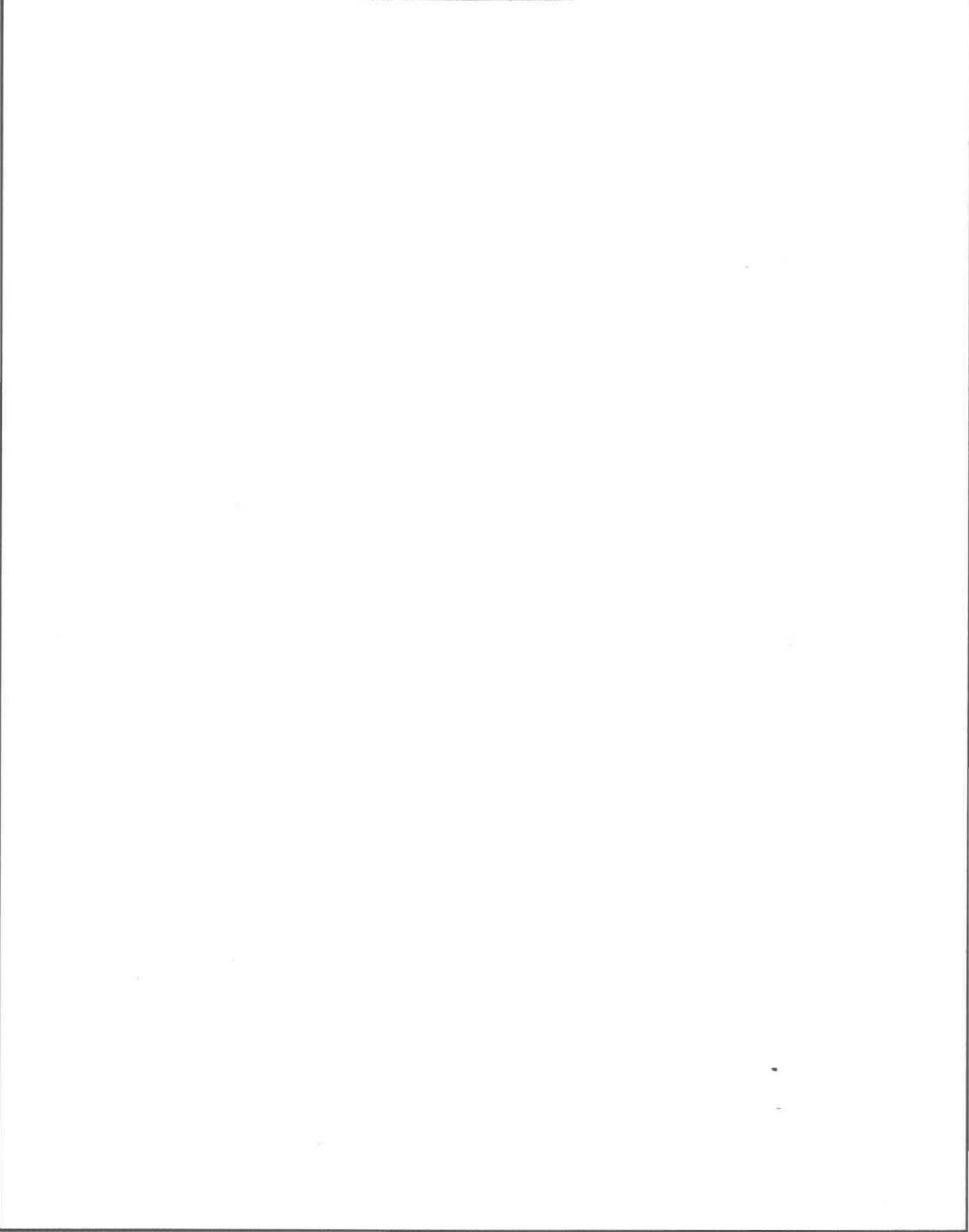
3.5 ANALYSES	20
3.5.1 Mesure de conductivité.....	20
3.5.2 Mesure de pH.....	20
3.5.3 Dosage des anions (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-})	20
3.5.4 Dosage de cations majeurs (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+).....	21
3.5.5 Dosage de l'azote ammoniacal (N-NH_4^+).....	21
3.5.6 Dosage du carbone inorganique dissous (CID) et du carbone organique dissous (COD).....	21
3.6 TESTS DE GERMINATION	23
3.6.1 Préparation des plats de germination.....	23
3.6.2 Procédure suivie pour les tests de germination	24
3.7 TEST DE GERMINATION SUR LE TERRAIN.....	25
3.8 RELEVÉ FLORISTIQUE.....	26
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	29
4.1 RÉSULTATS DES FONTES DE NEIGE EN LABORATOIRE.....	29
4.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des neiges avant la fonte.....	29
4.1.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fonte	32
4.1.3 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fonte en contact avec le sol.....	34
4.2 RÉSULTATS DES TESTS DE GERMINATION	38
4.3 RÉSULTATS DE L'ENSEMENCEMENT SUR LE TERRAIN	39
4.4 RÉSULTATS DU RELEVÉ FLORISTIQUE SUR LE TERRAIN.....	40
5. CONCLUSION.....	43
6. BIBLIOGRAPHIE	45
7. ANNEXES	
ANNEXE 1: Profils du pH, de la conductivité (cond.) et des ions dans les eaux de fonte de la neige naturelle (NN) et de la neige artificielle (NA) .	
ANNEXE 2: Profils du pH, de la conductivité (cond.) et des ions dans les eaux de fonte de la neige naturelle (NN) et de la neige artificielle (NA) avec un bouchon de sol.	
ANNEXE 3: Résultats statistiques des taux de germination pour les deux espèces étudiées.	
ANNEXE 4: Relevés floristiques des transects effectués entre des pistes de ski de neige naturelle et de neige artificielle.	

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: Résumé des méthodes d'analyses physico-chimiques des échantillons d'eau de fonte	23
TABLEAU 2: Concentrations moyennes ($\mu\text{eq/L}$) et coefficients de variations des ions majeurs dans les neiges et l'eau de fabrication	30
TABLEAU 3: Balance ionique avec les concentrations moyennes des ions majeurs.....	31
TABLEAU 4: Coefficients de lessivage des fontes de neige	34
TABLEAU 5: Charges cumulatives de certains ions dans les deux types de neige avant et après avoir traversé un bouchon de sol	35
TABLEAU 6: Moyennes des taux de germination.....	38
TABLEAU 7 :Résultats des tests de germination sur le terrain.....	40

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: Montage expérimental utilisé lors de la simulation de fonte de neige.....	18
FIGURE 2: Schéma du dispositif effectué sur la piste de ski de neige naturelle.....	26
FIGURE 3: Schéma du dispositif effectué sur la piste de ski de neige naturelle et artificielle.....	26
FIGURE 4: Schéma des transects effectués sur le terrain entre deux pistes de ski.....	27
FIGURE 5: Concentration du calcium en fonction de la fraction du volume de fonte pour la neige artificielle et la neige naturelle.....	32
FIGURE 6: Concentration du calcium en fonction de la fraction du volume de fonte pour la neige naturelle mais avec une échelle plus petite que la figure 5.....	33
FIGURE 7: Concentration du calcium en fonction du volume de fonte pour la neige artificielle avant (au dessus) et après (au dessous) le passage à travers le bouchon de sol.....	37



1. INTRODUCTION

1.1 Historique de fabrication de la neige artificielle

La prospérité d'une station de ski au point de vue physique dépend essentiellement de l'abondance du couvert de neige de ses pistes. Pour rentabiliser ses installations, une station de ski ne peut se permettre de rester fermée. Il en est de même pour l'industrie touristique régionale. En effet, des recherches ont démontré que pour chaque dollar qu'un skieur visiteur dépense en remontées mécaniques, il en dépense au moins 7\$ dans l'industrie connexe (Bouchard, 1989). Donc, pour s'assurer une neige de qualité pendant toute la saison, une station de ski doit faire appel à la fabrication de neige artificielle. Quoique la fabrication de la neige artificielle pour fin d'études scientifique date des années quarante, la fabrication de la neige artificielle pour le ski remonte à l'hiver de 1948-1949 (Erickson, 1980). Après une saison exceptionnelle de 120 cm de neige pendant l'hiver 1947-48, Walter Schoenknecht, propriétaire et gérant d'un nouveau centre de ski à Mohawk Mountain (Connecticut, É.-U.) se trouvait face à un hiver avec très peu de neige. À Noël, Walter Schoenknecht décida de faire venir 500 tonnes de blocs de glace à 11 miles de Mohawk Mountain. Il a pu fabriquer une neige artificielle en broyant toute la glace qui lui avait été donnée. Même si la neige de Walter Schoenknecht n'a duré que deux semaines, elle a été un très grand succès. Plus de 1800 billets ont été vendus dans une seule fin de semaine. Il fallait maintenant trouver une manière plus facile et plus économiquement viable pour fabriquer la neige artificielle.

Trois amis de Walter Schoenknecht, Art Hunt, Wayne Pierce et Dave Ritchie, appartenaient une manufacture de skis en aluminium, le Tey Manufacturing Corp. Ils envisageaient donc le même problème que Walter Schoenknecht, celui d'assurer une

abondance de neige sur les pistes de ski. Ils ont donc proposé de fabriquer un appareil qui produirait de la neige artificielle. C'est au mois de décembre en 1949 qu'un des prototypes originaux d'un appareil qui fabriquait de la neige artificielle a été amené à Mohawk Mountain. C'est le premier cas documenté de fabrication de neige artificielle pour le ski, produite par une machine. Divers ajutages d'arrosage ont été développés cette saison-là. Rendu au 14 mars, 1950, Tey pouvait produire 18 pouces de neige chaque soir (Erickson 1980).

Aujourd'hui partout dans le monde il y a des systèmes d'enneigement artificiel. Les systèmes sont beaucoup plus performants et efficaces que ces premiers appareils. Ces appareils sont beaucoup utilisés dans le nord-est des Etats-Unis et l'est du Canada. Les centres de ski de l'est du Québec ont fait appel de plus en plus à l'enneigement artificiel. Sur douze centres de ski, huit sont dotés d'appareils qui permettent la fabrication de la neige artificielle.

1.2 Technologie de fabrication de la neige artificielle

Depuis le premier essai de Walter Schoenknecht en écrasant des blocs de glace (Erickson 1980), la fabrication de la neige artificielle a beaucoup évolué. Aujourd'hui cette neige est produite en envoyant des gouttelettes d'eau dans l'air pour qu'elles puissent geler avant d'arriver au sol. Il faut donc que la température de l'air soit inférieure à 0°C. Pour que la fabrication de la neige soit efficace, il faut impérativement que trois conditions soient réunies:

1. Le bilan thermique doit être équilibré, c'est-à-dire il faut qu'il y ait assez de froid pour congeler toute l'eau pulvérisée;

2. Il faut qu'il y ait nucléation pour que les gouttelettes ne demeurent pas en surfusion, pour initialiser la transformation de la phase solide vers la phase liquide;
3. Il faut que la congélation soit assez rapide pour être pratiquement achevée avant que les gouttes ne retombent au sol.

Si ces conditions ne sont pas réunies, on obtient de l'eau qui regèle éventuellement au sol sous forme de glace. Cela veut donc dire qu'il y a certaines contraintes à respecter lors de la fabrication de la neige artificielle. Il faut garder en considération la température de l'air ambiant, le degré hygrométrique de l'air et la taille de gouttelettes.

Ceci implique quatre processus physiques:

1. l'air ambiant absorbe de la chaleur sensible;
2. l'eau libère de la chaleur sensible pour atteindre 0°C;
3. l'eau absorbe de la chaleur latente pour s'évaporer partiellement jusqu'à ce que l'air ambiant soit saturé;
4. l'eau non-évaporée libère de la chaleur latente en se congelant.

Tant que l'air est suffisamment froid, toute l'eau non évaporée est congelée ce qui résulte dans une neige sèche. Donc, plus l'air est sec, plus une grande quantité d'eau pourra être évaporée et refroidissant d'autant l'air ambiant. Des agents de nucléation sont aussi nécessaires. L'eau totalement dépourvue de noyaux glaciogènes ne congèlent spontanément que vers -36°C. Ce phénomène s'appelle la nucléation homogène. Les eaux naturelles généralement utilisées pour l'enneigement artificiel contiennent des impuretés particulières. La nucléation hétérogène par ceux-ci permet la congélation de s'amorcer à des températures variant entre -10 et -15°C. Il est possible d'augmenter la quantité de noyaux glaciogènes en ajoutant des cristaux d'iodure d'argent ou même des bactéries, ce qui diminuerait encore une fois la température de nucléation. Mais, on ne peut quand même pas espérer des congélations au-dessus de -4°C. Un autre facteur qui influence la qualité de la neige produite est la grosseur des gouttelettes. La durée de

parcours dans l'air est de l'ordre de quelques secondes. Il faut donc que la goutte d'eau soit d'une grosseur qui permet la congélation dans ce faible laps de temps. Des observations effectuées sur des neiges fabriquées par divers types de canons et dans diverses conditions de température ont chaque fois révélé une grande régularité dans la forme sphérique des granules, dont le diamètre était pratiquement compris entre 0.2 et 0.4 mm. Il faut aussi que la température initiale de l'eau soit très près de 0°C pour qu'il y ait un rendement optimal. Si toutes les conditions sont respectées, le résultat de ces échanges thermiques est un mélange de particules de glace et d'air saturé en vapeur d'eau.

La neige artificielle ne provient pas de vapeur d'eau comme la neige naturelle. Elle provient plutôt d'eau sous la forme liquide, c'est pour cette raison que les formes dendritiques, anguleuses et striées ne sont pas trouvées chez la neige artificielle. Elle se trouve surtout dans la forme de granules sphériques tout à fait comparable, par leur forme, aux grains de neige naturelle ayant subi une métamorphose avancée en présence d'eau liquide. La masse volumique de la neige artificielle varie entre 360 kg/m³ et 450 kg/m³ dans 80% des cas. Cela correspond à une densité de la neige naturelle damée ou métamorphosée. Ayant dès sa fabrication une forme thermodynamiquement et mécaniquement stable, la neige artificielle est un matériau qui se tasse peu et évolue peu, si ce n'est que par les liaisons entre grains dues au regel de l'eau interstitielle. (Lafeuille 1988)

Il est aussi connu que les plus grandes gouttelettes donnent une neige plus poreuse. Ceci permet de garder la surface moins glacée et moins assujettie au développement de sillons sur les pistes.

1.3 Système d'enneigement artificiel au Mont-Sainte-Anne

Dans le cas du Mont-Sainte-Anne, Québec, on a décidé d'installer un système d'enneigement artificiel en 1983. La fréquentation annuelle de la station dépasse présentement (1992) les 670 000 jours-skieurs, alors qu'avant la mise en marche du système d'enneigement, elle s'élevait en moyenne à 250 000 jours-skieurs. La saison de ski s'étend maintenant sur une période stable de 164 jours (5 1/2 mois) alors qu'avant la saison variait de 109 à 167 jours (Bouchard, 1989).

Le parc du Mont-Sainte-Anne utilise un système haute pression (air-eau) pour la fabrication de la neige artificielle. Il existe 591 bornes manuelles et 18 bornes automatiques le long des pistes de neige artificielle. Il y a 50 pistes de ski dont 85% de la surface skiable est couverte de neige artificielle. Il y a deux types de canons manuels: le "Leitner à 12 buses"(42) et le "Ratnik Snowgiant II+II"(6). Il y a aussi 18 "York 40" contrôlés automatiquement. La superficie couverte de neige artificielle est de 114 ha. Le réseau de distribution s'étend sur 45 km, comprenant 85 km de tuyaux. Les tuyaux ont de 100 à 350 mm de diamètre nominal. Il y a deux stations de pompage, une à la base de la montagne (24 m) et une à mi-montagne (460 m). La station de pompage primaire s'alimente dans la rivière Sainte-Anne du Nord. Elle a une puissance de 1 960 kW. Il y a six pompes Ingersoll Rand verticales de 300 kW et une pompe Ingersoll Rand verticale de 150 kW. Le débit maximum fourni par les pompes est de 13 000 L/min. La pression d'opération est de 5 à 6 000 kPa. La station de surpression (à mi-montagne) a une puissance de 1 435 kW. Là il y a 4 pompes Ingersoll Rand de 300 kW et 1 pompe Ingersoll Rand de 150 kW. Cette station fournit un débit maximum de 13 000 L/min et a une pression d'opération de 4 à 5 000 kPa. On y trouve aussi une tour de refroidissement d'eau ayant une puissance de 85 kW. Le système pour l'air comprimé est dans la station de contrôle au sommet de la montagne (800 m). Elle a

une puissance de 3 780 kW. Il y a 12 compresseurs Ingersoll Rand SSR 2 000 de 315 kW et un débit de 45 m³/min à 800 kPa. Il y a quatre modes de contrôle possible:

1. Automatique central: Un ordinateur York (Hewlett Packard), au bâtiment de contrôle dirige les automates situés dans chacune des salles de machine (3x), gère les canons automatiques et enregistre les données;
2. Automatique local: Un automate programmable (Siemens) dans chacune des salles de machine (3x) gère les machines;
3. Semi-automatique local: Des contrôles électro-pneumatiques régularisent les pressions dans les stations de pompage et les autres machines doivent être actionnés manuellement sur place;
4. Manuel local: Les pressions dans les stations de pompage doivent être régularisées manuellement et les autres machines doivent être actionnées manuellement sur place.

1.4 Problématique d'utilisation de la neige artificielle, la germination des plantes et le caractéristiques du sol

D'après des études qui ont été faites, les plantes peuvent commencer la germination lorsqu'elles sont encore dessous le couvert de neige dès les premières fontes (Richardson et Salisbury 1977). Il est aussi connu qu'habituellement de meilleurs taux de germination de graines sont obtenus lorsque la salinité est faible (Weir et al. 1982). La neige artificielle étant beaucoup plus chargée en sels pourrait donc avoir un effet sur la germination et la croissance des espèces végétales qui se trouvent sur le bord des pistes de ski où il y a fabrication de neige artificielle.

Il se peut aussi que les eaux de fonte de la neige artificielle modifient les caractéristiques du sol. À court terme il n'y aura probablement pas d'effets. Mais comme pour les pluies acides, plusieurs décennies de neige artificielle pourraient avoir un effet.

1.5 Caractéristiques physico-chimiques des neiges naturelles et artificielles

Afin d'évaluer les impacts de la neige artificielle sur la chimie des eaux du sol et la germination des graines, il faudrait voir dans quelle mesure la neige artificielle ressemble à la neige naturelle. Il faudrait de plus déterminer si les modèles de simulation physico-chimiques du couvert et de fonte de neiges naturelles s'appliquent à la modélisation de l'évolution physico-chimique des neiges artificielles.

1.6 Composition chimique de la neige naturelle

Une couche de neige recouvre le sol pour une période significative sur une grande partie du globe terrestre. La chimie de ce couvert de neige reflète le niveau de dépôts atmosphériques dans une région pendant l'hiver. La chimie du couvert de neige est influencée par la composition chimique des tempêtes de neige ainsi que les dépôts secs provenant de sources naturelles ou anthropogéniques (Cadle 1991), des débris végétaux, de la redistribution par le vent et les eaux de fonte ou de la pluie qui traversent le couvert de neige (De Walle 1987).

Les cations majeurs dissous dans les eaux de fonte dans l'est de l'Amérique du Nord sont généralement en ordre décroissant: H^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} et K^+ . Les anions majeurs sont principalement: NO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- . Ces espèces chimiques

s'ajoutent au flocon de neige dès le processus de nucléation. Dans l'atmosphère, des gouttelettes d'eau en état de surfusion viennent en contact avec des agents de nucléation pour former des cristaux de glace. Les gouttelettes d'eau en état de surfusion peuvent contenir des gaz dissous, des composés oxydés et des aérosols. Les agents de nucléation aussi appelés nucléi, peuvent être de fines particules d'argile, des sels de mer sous forme d'aérosol ou de la matière organique particulaire. Par la suite, chaque cristal croît par échange de vapeur d'eau et de gaz dissous tout autour de lui jusqu'à ce qu'il atteigne 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).

1.7 Composition chimique de la neige artificielle

Il est connu que la neige artificielle est plus concentrée dans certains ions majeurs (Cl^- , Br^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) que la neige naturelle. La neige artificielle provient habituellement d'eau de rivière qui est en contact direct avec des minéraux et de la matière organique. La neige artificielle devrait donc avoir une plus haute conductivité et une plus haute charge en éléments majeurs que la neige naturelle.

1.8 Processus chimiques et physiques dans le couvert de neige naturelle et artificielle (<0°C)

La neige naturelle est un matériel hautement variable en tombant et aussi après avoir formé un couvert de neige au sol. La variation de la composition chimique de la neige au sol est principalement due aux changements de diverses conditions et que la neige est un agrégat de glace et de vapeur d'eau, et d'eau près de sa température de congélation. Même en périodes froides, la neige est toujours en train de se transformer

par deux processus de métamorphisme. On appelle ces processus le métamorphisme destructif et le métamorphisme constructif. Le métamorphisme destructif représente la transformation de cristaux de neige dendritique en grains de neige. Le métamorphisme constructif représente la croissance des cristaux de glace à partir du transfert de vapeur d'eau des grains de neige sous l'influence de gradients de température. Ceci se traduit par la réduction du nombre de grains par l'élimination des plus petits grains et la recristallisation constante (Colbeck 1987). De plus cette métamorphose constante pousse les impuretés vers la surface des grains et dans les canaux interstitiels des grains où elles peuvent être facilement enlevées lorsque la fonte commence. Dans le cas de la neige artificielle, seulement le métamorphisme constructif sera en évidence, la fabrication initial de neige produisant des gouttelettes de glace très similaire aux grains de neige naturelle. On attend donc que les ions se trouvent dispersés comme ceux dans la neige naturelle. Il est probable que le concept d'exclusion des ions vers l'extérieur de gouttelettes s'applique aussi à la matière organique qui se trouverait dans les espaces interstitielles entre les cristaux de glace.

1.9 Processus chimiques et physiques lors de la fonte

La fonte du couvert de neige peut causer des changements dans la chimie des ruisseaux et du sol. La composition des ions solubles des eaux de fonte dépend de la distribution des ions à l'intérieur du couvert de neige, de la structure physique du couvert de neige et du mode de fonte. Les métamorphoses observées dans le couvert de neige font que les impuretés se retrouvent surtout à la surface des cristaux. Ceci mène à une diminution du point de congélation à la surface des cristaux, ce qui fabrique un genre de réseau où les impuretés solubles peuvent s'échapper facilement (Seip 1980). Il n'est donc pas surprenant de voir que les premières fractions des eaux de fonte contiennent des plus hautes concentrations d'ions que dans le gros du couvert de neige. Des

expériences en laboratoire et sur le terrain démontrent que 50 à 80% des polluants retrouvés dans la neige sont relâchés dans le premier 30% des eaux de fonte (Johannessen et Henriksen 1978). Les premières eaux de fonte peuvent avoir des concentrations cinq fois plus élevées que celle du gros du couvert de neige. Dans des cas extrêmes, des facteurs de dix ont même été atteints (Seip 1980). Ce phénomène très bien connu s'appelle le processus de fractionnement.

L'observation que certains ions sont enlevés à des taux plus rapides que d'autres est un phénomène un peu moins bien connu. Souvent, la séquence de tous les ions connus ne peut être observée sur le terrain; toutefois, l'élution plus lente du Na^+ et du Cl^- par rapport aux Mg^{+2} , NO_3^- et SO_4^{2-} semble assez générale (Tranter et al 1987, Davies et al, 1987). En laboratoire, les variations des conditions expérimentales pourraient changer l'ordre d'élution des ions. La structure, l'âge et l'homogénéité du couvert de neige seraient plus important que la concentration de l'ion lorsqu'on considère l'effet de fractionnement et d'élution préférentielle de certains ions. Les tendances générales sont que les ions Mg^{+2} , NO_3^- et SO_4^{2-} seraient élués plus rapidement que les ions Na^+ et Cl^- (Davies et al 1987).

Le taux d'élution d'un ion dans les eaux de fonte peut être quantifié par un coefficient de lessivage, k_s , un paramètre dans des modèles de fonte (Jones et Sochanska, 1990). Dans les conditions de fonte contrôlée en laboratoire, ces valeurs de k sont plus reproductibles que les expériences sur le terrain et peuvent représenter en quelque sorte un indice de la distribution ionique dans les grains de neige. La nature physico-chimique et microbiologique complexe du couvert de neige et les interactions neige-atmosphère font que la séquence des ions majeurs n'est pas toujours la même et la portée des modèles devient plus limitée. Un des modèles utilisé pour simuler les fontes de neige s'appelle SNOQUALD (Jones et Sochanski, 1990). SNOQUALD établit le rapport

entre la quantité et la composition chimique des eaux déchargées de la colonne de neige pendant la fonte afin de calculer des coefficients de lessivage (k_s) dont les valeurs peuvent être différentes selon les espèces ioniques lessivées. SNOQUALD est la version d'un modèle itératif qui tient compte de deux taux de lessivage dans des bancs de neige: c'est-à-dire, un taux de lessivage rapide (grains de neige) et un taux de lessivage lent (débris organiques et particuliers).

La concentration ionique dans les eaux de fonte en provenance des colonnes de neige et la dissolution de la matière organique sont représentées par la formule suivante.

$$C_i = C_o(1 - R) \cdot e^{-k_s(H_o - H_i)} \cdot (1 + k_s H_i) + C_{org} \cdot e^{-k_o(H_o - H_i)} \cdot (1 + k_o H_i) + RC_o$$

où

C_i = concentration moyenne ($\mu\text{eq/L}$) des polluants atmosphériques de la lame d'eau de fonte issue du stock de neige.

C_o = concentration initiale ($\mu\text{eq/L}$) des polluants atmosphériques dans la neige avant le commencement de la fonte.

C_{org} = quantité de matière organique qui contribue à des espèces solubles dans les eaux de fonte.

H_o = hauteur de la lame équivalente en eau (mm) de la neige avant le commencement de la fonte.

H_i = hauteur de la lame équivalente en eau (mm) de la neige au début de la production de la lame d'eau de fonte

R = coefficient de fractionnement

k_s = coefficient de lessivage des cristaux de neige, mm^{-1}

k_o = coefficient de lessivage de la matière organique, mm^{-1}

Les méthodes de moindre carré ont été utilisées pour faire l'ajustement avec l'aide du programme ZXMIN contenu dans le progiciel IMSL. La détermination du meilleur ajustement est estimée par la somme des différences au carré des concentrations calculées et mesurées.

$$RSS = \Sigma(C_i - C_m)^2$$

Le test de erreur standard de l'estimé a été calculé pour tous les ajustements.

$$SEE = \sqrt{(RSS/(N-2))}$$

où

N = nombre d'échantillons

(Jones et Sochanski, 1990)

Si le coefficient de lessivage, k_s , peut être considéré comme un indice de la distribution d'un ion dans un grain de neige naturelle, une valeur similaire pour l'élution du même ion dans la neige artificielle peut être interprétée comme signe de même profil de distribution relative à la concentration de l'ion dans le grain de neige artificielle; ceci en dépit des grandes différences en concentration de l'ion dans les deux neiges. L'applicabilité du modèle de fonte de neige naturelle SNOQUALD à la neige artificielle nous permettra donc de simuler la quantité et la qualité des eaux de fonte sur la superficie des pistes de ski.

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Nous nous sommes proposés dans cette recherche d'étudier les interactions existantes entre la chimie de la neige artificielle et de ses eaux de fonte, et la germination de certaines espèces végétales trouvées en montagne. Pour ce faire nous avons posé l'hypothèse que les eaux de fonte peuvent influencer la germination de certaines espèces végétales sensibles aux variations de la salinité de l'eau pendant leur germination. Le projet vise donc les objectifs suivants:

- 1) caractériser la physico-chimie de la neige artificielle et de ses eaux de fonte par rapport à la neige naturelle;
- 2) évaluer l'impact des eaux de fonte sur la chimie de l'horizon de supérieur du sol sur le lieu de germination et sur la croissance des jeunes plantes;
- 3) évaluer l'impact des eaux de fonte de la neige artificielle sur la germination de certaines espèces d'arbre du Québec soit, le bouleau jaune (*Betula lutea*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*) et ce dans le laboratoire et sur le terrain et
- 4) trouver les différences en végétation entre un site où il y a seulement de l'enneigement naturel et un site où il y a de l'enneigement naturel et artificiel.

L'originalité de cette étude réside dans les interactions existant entre la germination d'espèces végétales et les eaux de fonte provenant de la neige artificielle qui n'ont jamais été investiguées auparavant.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 ÉCHANTILLONNAGE DE LA NEIGE NATURELLE

La neige naturelle a été ramassée à la station de pompage au pied du Mont-Sainte-Anne à Beaupré en février, 1992. La neige fraîchement tombée a été recueillie par des spatules en plastique stérilisées puis mises dans des sacs en plastique et fermée hermétiquement. Par après, cette neige a été transportée dans une chambre froide et conservée à -10°C jusqu'à son utilisation.

3.2 ÉCHANTILLONNAGE DE LA NEIGE ARTIFICIELLE

3.2.1 Lieu d'échantillonnage

Le Mont-Sainte-Anne a une élévation de 800 m avec une dénivellation de 625 m. La saison de ski dure de la mi-novembre jusqu'au début mai avec un domaine skiable de 400 acres. On peut y trouver 50 pistes couvrant 60 km et réparties sur trois versants. La plus longue piste mesure 4.8 km. Le système d'enneigement couvre 85% des surfaces skiabiles. La moyenne annuelle d'enneigement naturel est de 375 cm. Le Parc du Mont-Sainte-Anne a une capacité horaire de remontées de 17 761 skieurs.

3.2.2 Les types de canon à neige

La neige artificielle a été ramassée à deux différents types de canons: le Leitner à 12 buses et le Ratnik Snowgiant II + II. Ce sont tous les deux des canons contrôlés manuellement. Le Leitner possède un baril et le Ratnik en possède deux.

3.2.3 Méthodologie d'échantillonnage

L'échantillonnage s'est fait durant l'hiver 1992 aux deux types de canons à neige manuels, à diverses températures de l'air et à des distances différentes du canon. À chaque canon, quatre bacs de plastique étaient déposés dessous le jet de neige à des distances différentes du canon à neige. Il fallait environ une demie-heure pour remplir les bacs de neige. On prenait chaque bac de neige et on transférait environ deux litres de neige dans un sac en plastique avec l'aide d'une pelle en plastique. Ensuite, on vidait environ 100 mL dans trois petits sacs en plastique Whirlpack. Les sacs étaient par la suite scellés, étiquetés puis transférés dans une chambre froide à -10°C où ils étaient conservés jusqu'à leur utilisation.

3.3 ÉCHANTILLONNAGE DU SOL

Des échantillons de sol ont été prélevés au Mont-Sainte-Anne pendant l'automne 1992. Un bloc de sol de 25 x 45 cm avec une profondeur de 8 cm a été coupé avec l'aide d'une pelle et d'une hache, puis mis dans un sac en plastique, scellé et gardé dans une chambre froide à -10°C jusqu'à son utilisation. Les horizons L, F, H et A et B₁ étaient visibles dans l'échantillon de sol.

3.4 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS DE TERRAIN POUR LES ANALYSES

3.4.1 Lavage des récipients et du matériel

Pour éviter tout risque de contamination, les récipients Dilu-vial, et le matériel du simulateur de fonte de neige étaient lavés avec une solution savonneuse, rincés plusieurs fois à l'eau déminéralisée et puis trempés 24 h dans de l'eau déminéralisée. Suite à ce trempage, le matériel fut rincé plusieurs fois à l'eau ultra pure et rempli de cette eau jusqu'à leur utilisation. Des tests d'adsorption et de désorption ont été fait en utilisant des solutions ioniques de concentrations connues pour voir si les lavages étaient efficaces.

3.4.2 Fonte en laboratoire

Le simulateur de fonte de neige (figure 1) est un appareil composé d'un compartiment de réfrigération de Plexiglas où peuvent être insérées quatre colonnes de Plexiglas avec lysimètre, un bain cryothermostaté de marque Haake (modèle C/F3) et une solution eau-antigel (5:1) comme réfrigérant.

Avant l'introduction de la neige ameublie et homogénéisée dans les colonnes du simulateur de fonte de neige, le matériel tel que les colonnes et les pelles en plastique, était placé à -10°C pendant 24 h.

Une fois remplie de neige, chaque colonne était introduite dans le simulateur et la température du réfrigérant était maintenue à 0.1°C . Les colonnes étaient rattachées à de

l'air comprimé afin d'éviter toute contamination des neiges par l'adsorption de gaz provenant de l'air ambiant du laboratoire. Cela maintenait aussi une pression positive. Cet air passait par des trappes d'eau ultrapure, de Na_2CO_3 (2N) et de H_2SO_4 (2N) pour retenir HNO_3 , HCl et NH_3 . La fonte complète d'une colonne de neige prenait de dix à douze jours. Pour simuler le mieux possible les conditions naturelles lors de la fonte printanière, les colonnes ont été hissées de leur compartiment respectif à chaque jour pour que la surface de la neige soit toujours située dans le haut du compartiment de réfrigération. L'eau de fonte accumulée dans le lysimètre de chaque colonne était prélevée à chaque 24 h pour fin d'analyses physico-chimiques, jusqu'à la disparition complète de la neige.

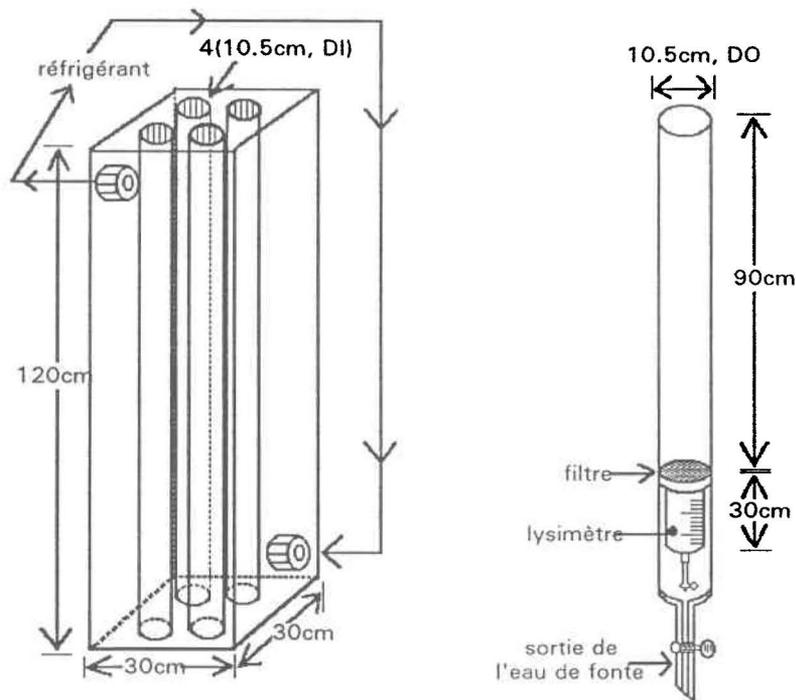


FIGURE 1: Montage expérimental utilisé lors de la simulation de fonte de neige.

En tout, douze colonnes de neige artificielle et deux colonnes de neige naturelle ont été fondues. Une expérience supplémentaire a aussi été faite en utilisant un échantillon de

sol du Mont-Sainte-Anne au fond de deux colonnes. Le niveau supérieur du sol est le lieu de la germination et de la croissance initiale des jeunes plantes. Afin de caractériser ce foyer de croissance, les changements dans la chimie générale et nutritive des eaux de fonte dans la matrice sol-eau, nous avons procédé à des fontes dans des colonnes de neige situées au-dessus des bouchons de sol dans le simulateur. L'expérience a été faite en mettant 6 cm d'un échantillon de sol du Mont-Sainte-Anne au fond de deux colonnes. Ensuite, une colonne a été remplie de neige artificielle et l'autre a été remplie de neige naturelle.

3.4.3 Filtration

L'eau de fonte destinée aux différentes analyses a été filtrée sur des filtres de fluorure de polyvinylidène Millipore (diamètre: 47 mm, porosité: 0.22 μm) sous vide. Les filtres étaient posés à l'aide de pinces de plastique et rincés avec environ 50 mL d'eau ultra pure. Après chaque filtration, le système était rincé quelques fois à l'eau ultra pure.

3.4.4 Conservation des échantillons

Une fois les eaux filtrées, elles étaient transférées dans des contenants en plastique Dilu-vial. Les échantillons pour les analyses des cations étaient acidifiés avec de l'acide nitrique. Ces échantillons contenaient une concentration finale d'acide nitrique de 0.5% c'est-à-dire que 100 μL d'acide nitrique concentré étaient ajouté à un échantillon de 20 mL. Les échantillons pour les analyses de NH_4^+ étaient acidifiés avec de l'acide sulfurique. Ces échantillons avaient une concentration finale de 0.2% en acide sulfurique, 40 μL d'acide sulfurique concentré était ajouté à un échantillon de 20 mL. Les échantillons pour les analyses de cations, d'anions et d'ammoniac étaient gardés dans une chambre froide à 4°C jusqu'à leur analyse. Les échantillons pour les analyses

de carbone organique dissous et de carbone inorganique dissous étaient gardés dans une chambre froide à -10°C jusqu'à leur analyse.

3.5 ANALYSES

3.5.1 Mesure de conductivité

Les mesures de conductivité ont été prises immédiatement après la fonte des échantillons à l'aide d'un appareil Fisher Scientific acumet pH meter 50. Cet appareil donne la conductivité à 25°C ayant une sonde de température qui corrige la valeur de conductivité pour la température.

3.5.2 Mesure de pH

Le pH a été mesuré par un appareil Fisher Scientific acumet pH meter 50 immédiatement après avoir pris les mesures de conductivité. Cet appareil donne la valeur de pH à 25°C grâce à la sonde de température qui corrige la valeur de pH pour la température. L'appareil a été calibré quotidiennement avec l'aide de trois solutions tampons certifiées (Fisher Scientific) ayant respectivement un pH de 10.00 ± 0.01 , 7.00 ± 0.01 , et 4.00 ± 0.01 .

3.5.3 Dosage des anions (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-})

Le dosage des anions inorganiques Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} et SO_4^{2-} a été effectué par chromatographie ionique. L'appareil utilisé était un chromatographe ionique DX-300

Dionex pourvu d'une colonne anionique Dionex ionpac AS4A et d'une pré-colonne anionique Dionex ionpac AG4A.

3.5.4 Dosage de cations majeurs (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+)

Les cations majeurs Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , et Na^+ ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique à la flamme avec un appareil Varian AA-20. Les limites de détection étaient de 0.005, 0.004, 0.001 et de 0.001mg/L respectivement.

3.5.5 Dosage de l'azote ammoniacal (N-NH_4^+)

Le dosage du N-NH_4^+ s'est fait en mesurant la concentration du NH_4^+ avec 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 le N-NH_4^+ pour former de l'indophénol, un composé bleuté, dont la concentration est proportionnelle à celle du NH_4^+ . La coloration est amplifiée par l'ajout de nitroprussiate de sodium. Par la suite un agent complexant, l'éthylènediamine tétra acétate de sodium (EDTA), a été ajouté afin de prévenir la précipitation des hydroxydes de métaux lourds tels que le Ca^{2+} et le Mg^{2+} . Le seuil de détection pour le N-NH_4^+ était de 0.1 mg N/L.

3.5.6 Dosage du carbone inorganique dissous (CID) et du carbone organique dissous (COD)

Le dosage du COD et du CID (CO_3^{2-} , HCO_3^- et H_2CO_3) a été effectué avec un auto-analyseur Technicon IV couplé à un conductivimètre Radiometer, modèle CDM 3 et à un enregistreur Radiometer REC 80 Servograph. Les concentrations de CO_3^{2-} , HCO_3^- et H_2CO_3 ont été calculées par les formules suivantes:

Sachant que

$$CID = [H_2CO_3^*] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$$

où

$$[H_2CO_3^*] = [CO_2 \cdot aq] + [H_2CO_3]$$

et connaissant les constantes d'acidité pour un système de carbonate dans une solution aqueuse en équilibre:

$$K_1 = 5 \times 10^{-7}$$

$$K_2 = 5 \times 10^{-11}$$

Il est possible de calculer:

$$\alpha_0 = \left(1 + \frac{K_1}{[H^+]} + \frac{K_1 K_2}{[H^+]^2} \right)^{-1}$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{[H^+]}{K_1} + 1 + \frac{K_2}{[H^+]} \right)^{-1}$$

$$\text{et } \alpha_2 = \left(\frac{[H^+]^2}{K_1 K_2} + \frac{[H^+]}{K_2} + 1 \right)^{-1}$$

En utilisant les fractions d'ionization nous pouvons calculer les concentrations de chaque forme de carbone inorganique de cette façon:

$$[H_2CO_3^*] = CID \alpha_0$$

$$[HCO_3^-] = CID \alpha_1$$

$$[CO_3^{2-}] = CID \alpha_2 \quad (\text{Stumm et Morgan, 1981})$$

TABLEAU 1: Résumé des méthodes d'analyses physico-chimiques des échantillons d'eau de fonte

PARAMETRES	MÉTHODOLOGIE	TYPE D'APPAREIL
Conductivité	Électrométrique	Conductivimètre Fisher Scientific acumet pH meter 50
pH	Électrométrique	pH-mètre Fisher Scientific acumet pH meter 50
Anions (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , et SO ₄ ²⁻)	Chromatographique	Chromatographe ionique DX-300 Dionex
Cations majeurs (Ca ⁺² , K ⁺ , Mg ⁺² , et Na ⁺)	Spectrophotométrique	Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme Varian(AA-20)
NH ₄ ⁺	Colorimétrique	Auto-analyseur Technicon II
C.I.D. et C.O.D.	Électrométrique	Auto-analyseur Technicon IV

Les concentrations des ions majeurs sont exprimés en µeq/L. Le calcul des charges ioniques libérés du couvert de neige ou de l'horizon du sol sont exprimés en µeq.

3.6 TESTS DE GERMINATION

3.6.1 Préparation des plats de germination

Les plats de germination ainsi que le support étaient premièrement lavés à l'eau avec un savon doux. Ils étaient ensuite rincés à l'eau chaude et ils séchaient dans une étuve pour environ une heure. Par la suite, les plats de germination et les supports étaient rincés à l'éthanol 80%, laissés séchés à l'air puis rangés dans une chambre UV jusqu'à leur utilisation. Les couches ainsi que les instruments étaient autoclavés pendant 15 min. à

une température de 270°C puis rangés dans la chambre UV. Toutes les précautions étaient prises pour que tous les instruments soient le plus stérile possible.

3.6.2 Procédure suivie pour les tests de germination

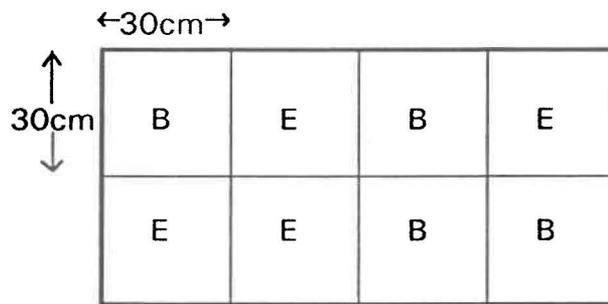
Il était très important de travailler dans un milieu le plus stérile possible lorsque les semences étaient placées dans les plats de germination. Tout le travail était donc effectué dans une hotte à flux laminaire. Un brûleur Bunsen était allumé dans la hotte pendant que les opérations. En tout, six types d'eau ont été utilisés pour faire les tests de germination: la neige naturelle fondue, la neige naturelle fondue et filtrée, la neige artificielle fondue, la neige artificielle fondue et filtrée, de l'eau autoclavée et de l'eau autoclavée et filtrée. La neige était portée au laboratoire la veille pour qu'elle puisse fondre à la température de la pièce.

Un plat de germination contenait 200 graines. Avant de mettre les graines dans les plats de germination un substrat humide (Kimpak: feuille de cellulose crêpée) humecté avec 120 mL d'eau y était posée. Une seringue de 60 mL était utilisée pour déposer l'eau. Lorsque l'eau utilisée devait être filtrée, des filtres Nalgene de 0.2 μm étaient attachés au bout de la seringue. Un autre 120 mL d'eau était mis dans le fond du plat de germination. Les semences étaient ensuite déposées sur les couches en faisant attention qu'elles ne se touchent pas les une aux autres. Tout ce travail était exécuté à côté d'un brûleur Bunsen pour minimiser les diverses sources de contamination. Ensuite, le plat de germination était fermé puis déposé aléatoirement dans le germoir (Conviro G-30). Les plats de germination étaient exposés à 8 h de lumière à 30°C et 16 h d'obscurité à 20°C. L'humidité était de 100%. Les semences de bouleau jaune passait 21 jours dans le germoir puis le décompte de graines germés était fait. Les semences étaient considérées comme germées lorsque les cotylédons devenaient visibles. Les tests pour

l'épinette blanche étaient faits deux fois: une fois en passant 21 jours dans le germoir, comme le bouleau jaune et l'autre fois avec une stratification en passant 21 jours à 4°C pour ensuite être transféré dans le germoir puis y passer 21 jours avec les mêmes conditions que le bouleau jaune. Cette étape supplémentaire est nécessaire pour casser la dormance des graines d'épinette blanche (International Seed Testing Association 1985).

3.7 TEST DE GERMINATION SUR LE TERRAIN

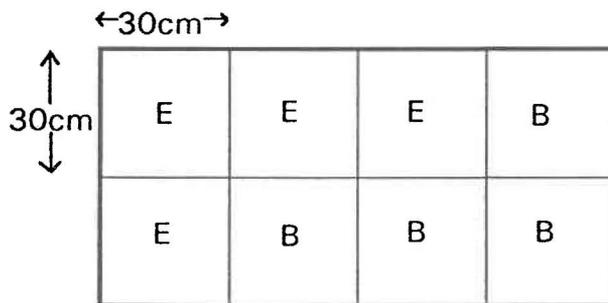
Des tests de germination ont été faits sur le terrain, c'est-à-dire sur des pistes de ski au Mont-Sainte-Anne. Nous avons choisi deux pistes qui avaient des pentes semblables, une ayant de la neige artificielle et de la neige naturelle et l'autre ayant seulement de la neige naturelle. Une ensemencement a été faite sur chaque piste de ski. Chaque plantation avait huit carrés de 30 x 30 cm. Chaque carré contenait 100 graines de bouleau jaune ou 100 graines d'épinette blanche. Dans la piste où il y avait seulement de la neige naturelle, les carrés étaient disposés tel indiqué à la figure 2. La figure 3 nous démontre dispositif utilisé la piste de ski où il y avait eu de la neige naturelle et artificielle. Les positions des espèces différentes de graines ont été choisies de façon aléatoire. Les graines ont été placées à la fin du printemps. La couche d'herbe qu'il y avait au-dessus a été enlevée puis les graines ont été déposées dans leur carré respectif puis arrosées. Une mince couche de sable a été déposée par-dessus les graines pour empêcher que le vent emporte les graines. Chaque plantation a été entourée de moustiquaire pour que les petits animaux ne puissent entrer et les détruire. Les mauvaises herbes étaient enlevées aux quatre semaines pour que les deux espèces étudiées ne soient pas étouffées par la flore naturelle de la piste de ski. Le décompte final a été fait à la fin de l'été.



B=bouleau jaune

E=épinette blanche

FIGURE 2: Schéma du dispositif effectué sur la piste de ski de neige naturelle.



B=bouleau jaune

E=épinette blanche

FIGURE 3: Schéma du dispositif effectué sur la piste de ski de neige naturelle et artificielle.

3.8 RELEVÉ FLORISTIQUE

Deux transects ont été effectués au Mont-Sainte-Anne entre les pistes "la première neige" où il y avait seulement de la neige naturelle, et "la Quanic" où il y avait un mélange de neige naturelle et de neige artificielle. Les transects étaient chacun d'une longueur de 60 m. Le deuxième transect était situé 30 m au-dessus de la première (figure 4). Chaque transect a été divisé en deux pour faire le relevé floristique. Le premier et la quatrième demi-transect commençaient du côté de la piste de neige

naturelle. Le deuxième et la troisième commençait du côté de la piste de neige artificielle. Le galon à mesurer de 30 m était allongé jusqu'au milieu de la piste. À chaque deux mètres un carré de 1 x 1 m était mesuré. Le premier carré se trouvait entre 1 m et 2 m. Le deuxième carré se trouvait entre 3 m et 4 m et ainsi de suite. Il y avait donc 15 carrés par demi-transect. Dans chaque carré on notait la présence de toutes les espèces de plantes herbacées, arbustives et arborescentes. On comptait aussi le nombre de plantes arborescentes et arbustives dont la hauteur était inférieure à 30 cm et aussi ceux dont la hauteur était supérieure à 30 cm mais que le dhp était inférieur à 1 cm. (dhp = diamètre à la hauteur de la poitrine).

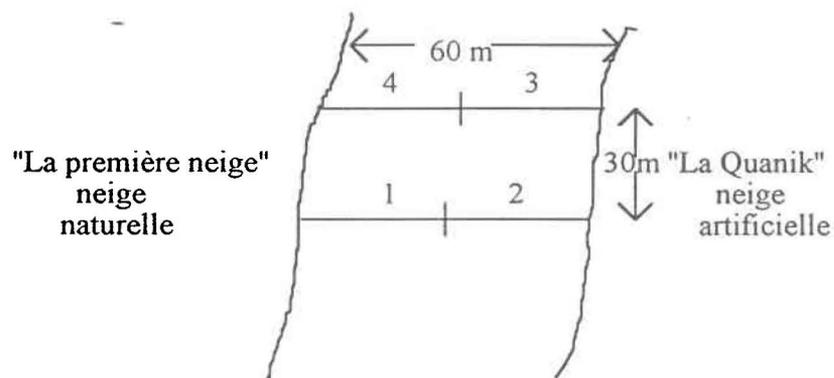
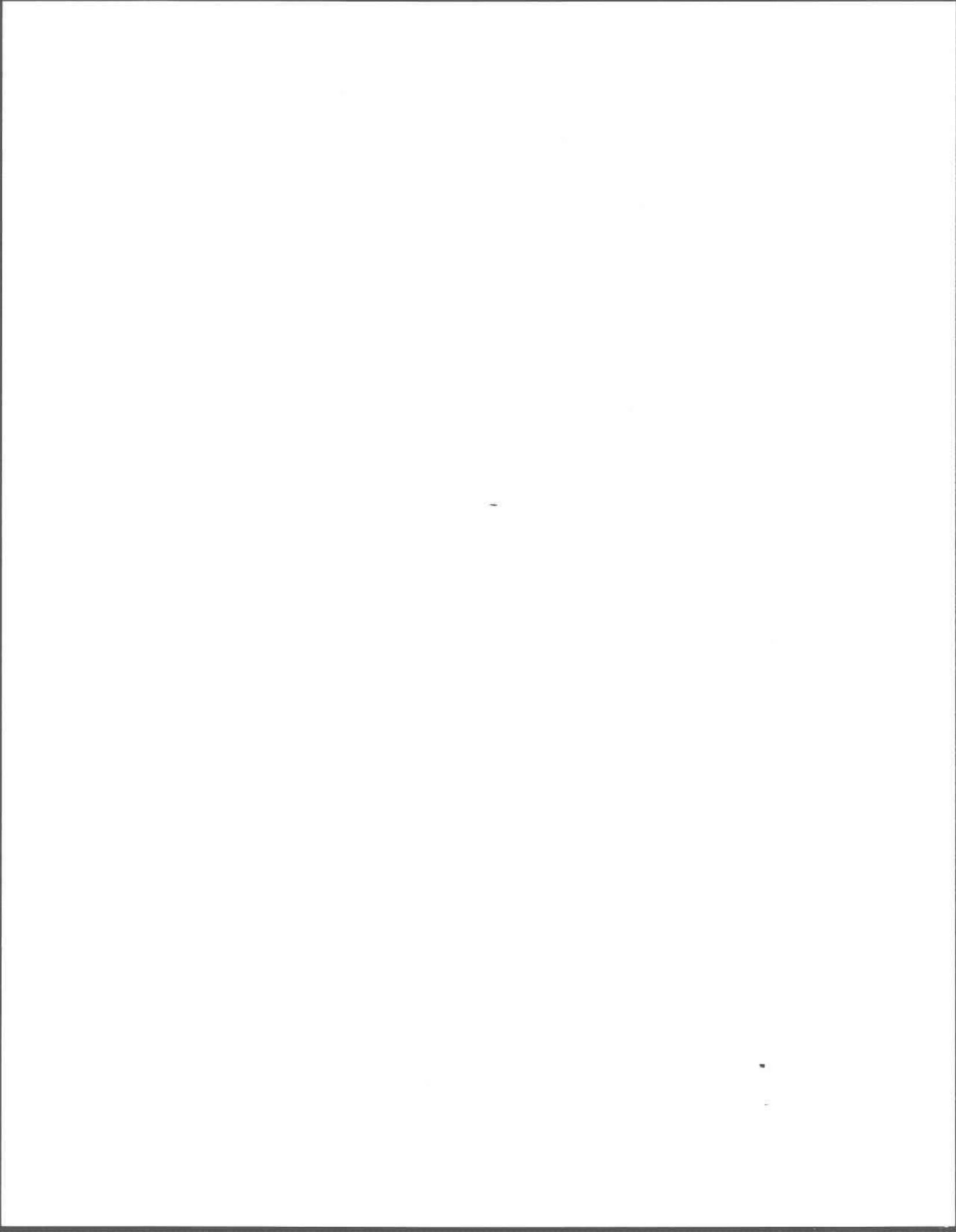


FIGURE 4: Schéma des transects effectués sur le terrain entre deux pistes de ski



4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS DES FONTES DE NEIGE EN LABORATOIRE

4.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des neiges avant la fonte

Nous avons trouvé que la neige artificielle fraîche avait une densité d'environ 0.45 tandis que la neige naturellement fraîchement tombée avait une densité d'environ 0.10. Dans le couvert de neige, la densité de la neige naturelle est habituellement entre 0.2 et 0.25 pendant l'hiver. Les grains de neige artificielle se trouvent surtout sous la forme de granules sphériques tout à fait comparable par leur forme, aux grains de neige naturelle ayant subi une métamorphose avancée en présence d'eau liquide. Le diamètre des grains de neige artificielle variait entre 0.2 et 0.4 mm. La neige naturelle utilisée dans les expériences de fonte étaient une neige qui avait subi un métamorphisme surtout isothermique, ayant au moment de l'étude une forme sphérique.

Les chimies de la neige naturelle et de la neige artificielle sont très différentes. Il n'y a que peu d'ions dans la neige naturelle par rapport à la neige artificielle. La composition chimique de la neige naturelle reflète le lessivage de l'atmosphère tandis que celle de la neige artificielle reflète plutôt les eaux souterraines, la fabrication de la neige artificielle étant faite pendant l'étiage d'hiver. On peut voir au tableau 2 les concentrations de divers ions trouvés dans la neige naturelle, la neige artificielle et l'eau de fabrication. On voit que la neige naturelle est moins concentrée en SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} que la neige artificielle pour un intervalle de confiance de 95%. Ceci n'est pas surprenant car l'eau de fabrication de la neige artificielle provient de la rivière Sainte-Anne du Nord; celle-ci comprend des eaux ayant un contact direct avec les sols et les assises

géologiques ce qui explique la présence de plus hautes concentrations de ces ions majeurs. Le lessivage des assises géologiques diminue l'acidité. Donc, par rapport à la neige naturelle, la neige artificielle, contient moins de protons et plus de cations, et le bicarbonate remplace le sulfate comme anion dominant. Par contre, l'augmentation de l'ion chlorure dans la neige artificielle, un ion conservateur, est très faible. Il y a aussi un faible changement dans la concentration de l'ion nitrate probablement le résultat de la minéralisation de la matière organique morte à la fin de l'été et de l'automne.

Dans l'eau de fabrication, les concentrations des ions Ca^{2+} et Na^+ sont statistiquement différentes, pour un intervalle de confiance à 95%, de celles de la neige artificielle. Ceci pourrait être dû au phénomène d'évaporation pendant le refroidissement de l'eau lors de la fabrication de la neige artificielle ou même du rejet préférentielle de certains ions lors de la formation des cristaux de neige artificielle. Il s'agit en toute probabilité d'une perte de masse d'eau pendant la fabrication de neige car dans tous les cas il y a une augmentation des concentrations des ions dans la neige par rapport aux eaux de fabrication. Ceci est aussi reflété par les bilans ioniques de la neige artificielle et des eaux de fabrication (tableau 3).

TABLEAU 2: Concentrations moyennes ($\mu\text{eq/L}$) et coefficients de variations des ions majeurs dans les neiges et l'eau de fabrication

	H^+	Ca^{+2}	Na^+	K^+	Mg^{+2}	NH_3^+	NO_3^-	SO_4^{-2}	H_2CO_3	HCO_3^-	CO_3^{-2}	Cl^-
NN	20.3	24.6	52.2	6.0	3.9	9.4	23.1	13.2	nd	nd	nd	47.1
n=3	± 7.0	± 9.0	± 13.0	± 5.3	± 1.1	± 2.0	± 2.0	± 1.1				± 7.1
NA	0.004	354.6	97.0	7.8	158.0	6.0	19.3	88.1	4.6	439.8	21.7	55.9
n=23	± 0.005	± 42.9	± 13.0	± 1.2	± 45.2	± 4.6	± 3.0	± 10.7	± 1.5	± 89.7	± 15.2	± 9.7
eau	0.003	273.8	73.9	6.4	152.1	4.9	14.8	79.1	3.3	381.9	14.2	53.3
n=2	± 0.0001	± 33.6	± 18.4	± 1.8	± 87.2	± 0.2	± 5.3	± 13.7	± 0.3	± 23.2	± 0.2	± 10.4

NN=neige naturelle

NA=neige artificielle

eau=eau de fabrication

nd=non détecté

Si nous regardons la balance ionique pour les différents types de neige et pour l'eau de fabrication dans le tableau 3, nous pouvons voir qu'il y a un déficit anionique pour la neige naturelle. Ceci pourrait être expliqué par la présence de matière organique qui peut agir comme un anion. Le COD dans la neige naturelle comprend les acides carboxyliques dont les espèces majeurs sont les ions acétate et formate; la concentration de ces ions se trouve entre 2 et 50 $\mu\text{eq/L}$ (Tanner et al, 1984, et Guiang et al, 1984). Cette grande variation est due à la distribution des divers espèces organiques (polaire et non-polaire) qui est très variable. La neige artificielle contenait approximativement 40 $\mu\text{eq/L}$ de COD provenant probablement d'acide humique et fluviatique trouvés dans le sol (Oliver et al, 1983). Les concentrations anioniques et cationiques de la neige artificielle et de l'eau de fabrication sont presque équivalentes respectivement.

TABLEAU 3: Balance ionique avec les concentrations moyennes des ions majeurs

	Σ des cations ($\mu\text{eq/L}$)	Σ des anions ($\mu\text{eq/L}$)
Neige naturelle	116.4	83.4
Neige artificielle	623.4	624.8
Eau de fabrication	511.1	546.6

Si on regarde les concentrations relatives de chaque type de neige on peut voir très clairement que la neige artificielle est beaucoup plus chargée que la neige naturelle. Ceci affecterait légèrement le point de congélation lors de la fabrication de la neige artificielle. Avec ces concentrations d'ions, le point de congélation diminuerait d'environ 1°C (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1988).

4.1.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fonte

On peut aussi voir les différences de concentration entre la neige naturelle et la neige artificielle en regardant les profils de fonte des différentes espèces chimiques. En examinant la figure 5, on voit que la neige artificielle est beaucoup plus concentrée en calcium par exemple que la neige naturelle. Lorsque l'échelle de concentration est diminuée (figure 6) on voit que le profil de fonte de la neige naturelle ressemble beaucoup à celui de la neige artificielle. On retrouve les profils de fonte de toutes les fontes en laboratoire pour tous les ions analysés dans l'annexe 1.

[Ca⁺²] en fonction du volume de fonte

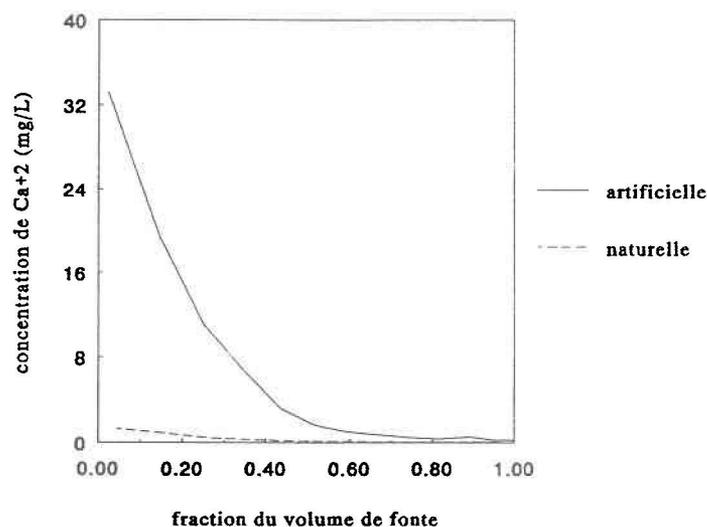


FIGURE 5: Concentration du calcium en fonction de la fraction du volume de fonte pour la neige artificielle et la neige naturelle

Lorsque les coefficients de lessivage, k_s , sont calculés par SNOQUALD, on ne trouve aucune différence significative pour un intervalle de confiance de 95% entre la neige naturelle et la neige artificielle (tableau 4). Nous considérons donc que la distribution

des ions dans la neige artificielle ou leur aptitude à être lessivée est tout à fait semblable à celle de la neige naturelle ayant des cristaux de forme arrondie, en normalisant toutefois pour des concentrations différentes. L'éluion plus lente des ions Na^+ et Cl^- par rapport aux ions Mg^{2+} , NO_3^- et SO_4^{2-} dans les eaux de fonte a été rapportée par Tranter et al (1987) et Davies et al (1987).

[Ca+2] en fonction du volume de fonte

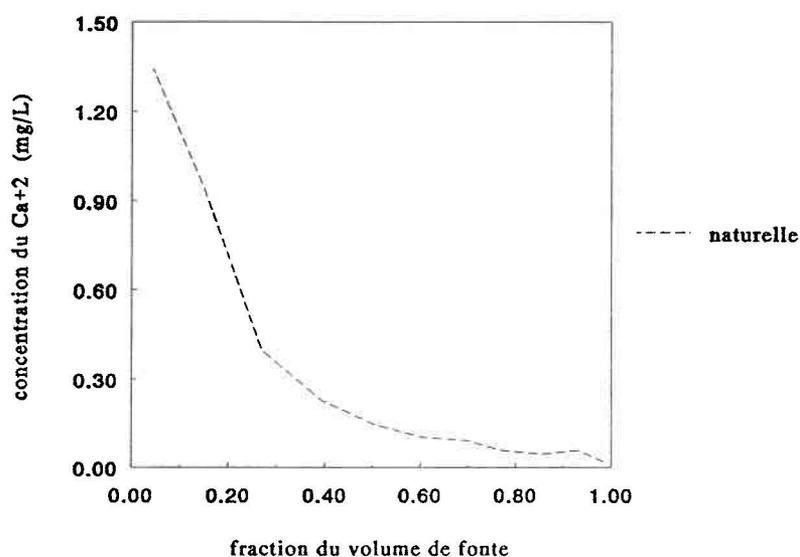


FIGURE 6: Concentration du calcium en fonction de la fraction du volume de fonte pour la neige naturelle mais avec une échelle plus petite que la figure 5.

Les valeurs des coefficients de lessivage (tableau 4), démontrent une éluion préférentielle de certains ions. Les ions Na^+ ($k=0.014\text{mm}^{-1}$) et Cl^- ($k=0.025\text{mm}^{-1}$) élueront plus lentement que les ions NO_3^- ($k=0.037\text{mm}^{-1}$) et SO_4^{2-} ($k=0.041\text{mm}^{-1}$) pour les eaux de fonte des deux neiges. Le Mg^{2+} ($k=0.027\text{mm}^{-1}$) semble toutefois être en désaccord avec les résultats obtenus ces auteurs dans le cas de la neige artificielle. La raison n'est pas connue.

La neige naturelle quoiqu'elle a été échantillonnée dans un état frais dont les cristaux étaient de forme dendritique a subi un métamorphisme isothermique pendant l'entreposage. Elle a pris des formes de grains arrondis et irréguliers (Colbeck, 1987) au moment de la fonte en laboratoire.

TABLEAU 4: Coefficients de lessivage des fontes de neige

Ions	Coefficients de lessivage pour les fontes de neige (mm^{-1})							
	Ca^{2+}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	NH_3^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
Neige artificielle n=8	0.016 ± 0.004	0.029 ± 0.010	0.083 ± 0.087	0.027 ± 0.011	0.002 ± 0.001	0.025 ± 0.020	0.041 ± 0.015	0.037 ± 0.018
Neige naturelle n=2	0.018 ± 0.005	0.014 ± 0.003	0.001 ± 0.001	0.017 ± 0.006	0.002 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.018 ± 0.003	0.053 ± 0.052

Il paraît ainsi que la distribution des ions dans les gouttelettes d'eau congelée rapidement pendant la fabrication de la neige artificielle est semblable à celle de grains de neige métamorphisés. Puisque la neige naturelle sur les pentes de ski a principalement cette forme à la fin de l'hiver, avant la fonte du printemps, c'est cette forme qui nous intéresse le plus. En effet, les coefficients de lessivage pour la neige artificielle et la neige naturelle ne sont pas statistiquement différents pour un intervalle de confiance de 95%. En connaissant la distribution relative des couverts formés de la neige naturelle, il sera donc possible de simuler les eaux de fonte sur une grande surface de pistes de ski comprenant des couvertures végétale différentes.

4.1.3 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de fonte en contact avec le sol

Si on regarde les profils pour les fontes avec un bouchon de sol dans le fond de la colonne (annexe 2), on voit notamment que pour le profil de pH, les courbes de neige

naturelle et de neige artificielle ne sont pas très différentes. Les eaux de fonte de la neige artificielle avaient toutefois encore une plus haute conductivité comme les fontes sans sol mais avec une différence moins marquée. Les profils de fonte des ions étudiés avec le bouchon de sol sont en général très semblable. La seule différence semble être des concentrations plus élevées au début des fontes pour la neige artificielle. Seulement l'ion HCO_3^- donne un profil plutôt irrégulier pour la fonte de la neige artificielle pour des raisons que l'on ignore. En ce qui concerne les quantités totales (charge chimique) des ions libérés par les eaux de fonte avant et après avoir passée à travers les bouchons de sol (tableau 5), on voit que la quantité de NH_4^+ était beaucoup plus élevée dans les eaux de fonte des colonnes ayant un bouchon de sol que celles qui n'en avaient pas pour les deux types de neige. Ceci veut dire qu'il aurait pu y avoir libération de cette forme d'azote à la fonte des neiges, c'est-à-dire au printemps. Toutefois, il ne semble pas y avoir de différences entre la neige naturelle et la neige artificielle.

TABLEAU 5: Charges cumulatives de certains ions dans les deux types de neige avant et après avoir traversé un bouchon de sol

	H^+ (μeq)	Ca^{+2} (μeq)	Na^+ (μeq)	K^+ (μeq)	Mg^{+2} (μeq)	NH_4^+ (μeq)	NO_3^- (μeq)	SO_4^{-2} (μeq)	HCO_3^- (μeq)	CO_3^{-2} (μeq)	Cl^- (μeq)
NN	60.4	36.1	80.6	10.7	6.15	3.84	42.8	28.6	nd	nd	101.2
n=2	± 5.7	± 11.4	± 12.1	± 5.8	± 1.7	± 1.2	± 1.5	± 4.2			± 74.0
NA	1.34	857.0	256.3	35.4	274.4	3.46	44.4	214.1	822.2	18.1	149.3
n=11	± 0.78	± 103.7	± 21.4	± 9.5	± 70.9	± 2.7	± 10.4	± 39.8	± 240.7	± 13.2	± 30.3
NN	27.3	113.1	148.2	104.5	86.8	24.8	48.9	133.3	nd	nd	227.7
sol											
NA	17.7	164.7	242.8	134.3	138.8	20.9	44.9	330.2	3.2	nd	277.5
sol											

NN=neige naturelle
 NA=neige artificielle
 nd=non-déecté

Pour des eaux ayant des chimies différentes, on voit que le sol réagit différemment selon l'espèce ionique. Le sol est un système d'échange ionique. Pour la neige naturelle on voit que le sol a libéré Ca^{+2} et Mg^{+2} tandis qu'il en a gardé pour la neige artificielle.

Pour Na^+ , le sol aurait gardé un peu de cet ion pour la neige artificielle. Le sol semble agir comme un tampon et il contrôle la quantité d'ion qui passe. Pour K^+ toutefois, on voit que le sol a libéré cet ion dans le cas de la neige naturelle et de la neige artificielle. Pour NH_4^+ , SO_4^{2-} et Cl^- , le tableau 5 démontre que le sol en a libéré aussi pour les deux types de neige. La concentration de NO_3^- est demeuré constante pour les deux types de neige. HCO_3^- et le CO_3^{2-} sont beaucoup plus élevés avant le passage dans le bouchon de sol. Hern et al, 1985 ont trouvé que lorsqu'un podzol est exposé à des solutions acides de pH de 5.7, 3.5 et 2.0, le pH des eaux intersticielles à une profondeur de 15 cm demeure assez constant.

Leurs colonnes en laboratoire démontraient les mêmes tendances. Le lessivage de NO_3^- dans le conditions acides était nul mais il y avait suppression de la dénitrification. Le SO_4^{2-} était retenu par le sol pour les traitement aux pH de 2.0 et 5.7, mais il était relâché à un pH de 3.5 (Hern et al 1985).

Pour des pH plus alcalins comme dans le cas des eaux de fonte provenant de la neige artificielle, nous avons trouvé que les charges totales de Na^+ , et de NO_3^- demeurent assez constantes après le passage dans le sol (tableau 5); les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et CO_3^{2-} auraient diminué et les ions K^+ , NH_3^+ , SO_4^{2-} et Cl^- auraient augmenté.

La figure 7 donne un aperçu de la dynamique qui se passe lors de la fonte des neiges avant et après le passage dans le sol; dans le cas du Ca^{2+} , il y a une forte absorption de cet ion par le sol au début de la fonte. Il a donc été trouvé que la neige artificielle avait en général des concentrations plus élevées dans les ions majeurs que celles de la neige naturelle. Il y a une similarité dans le comportement des ions majeurs de la neige artificielle et la neige naturelle lors de la fonte, normalisés toutefois pour les concentrations élevées; les résultats trouvés sont conformes avec ceux observés par

d'autres auteurs. Ceci a été quantifié en appliquant le modèle SNOQUALD à la neige artificielle et à la neige naturelle. Il est donc possible d'appliquer des modèles de fonte de la neige naturelle à la neige artificielle.

[Ca²⁺] en fonction du volume de fonte

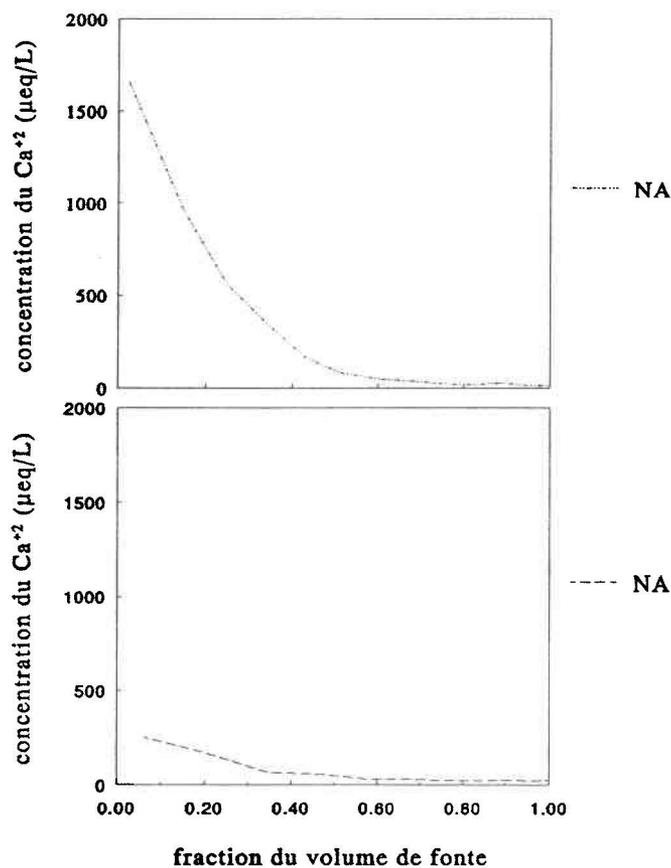


FIGURE 7: Concentration du calcium en fonction du volume de fonte pour la neige artificielle avant (au dessus) et après (au dessous) le passage à travers le bouchon de sol.

Nos expériences ont aussi démontrés que le sol agit comme un genre de tampon, ou plutôt comme un régulateur qui contrôle le passage des ions par adsorption et désorption pour ensuite les rendre disponible à la flore et la faune. Tous ces résultats

nous permettent de simuler le milieu de germination des graines pendant et immédiatement après la fonte des neiges.

4.2 RÉSULTATS DES TESTS DE GERMINATION

Une fois les tests de germination terminés et le décompte complété (voir Annexe 3), une analyse de variance a été faite par SAS pour voir si les résultats de germination obtenus étaient statistiquement différents. Cette méthode (ANOVA) est couramment utilisée par le Ministère des forêts pour l'analyse statistique des données sur la germination de différentes espèces. Aucune différence statistique n'a été trouvée entre les six différentes sortes d'eau, c'est-à-dire l'eau de fonte provenant de la neige artificielle qui a été filtrée et non-filtrée, l'eau de fonte provenant de la neige artificielle qui a été filtrée et non-filtrée et l'eau témoin qui a été filtrée et non-filtrée. On peut voir dans le tableau 6 que même en regardant simplement la moyenne aucune différence n'apparaît

TABLEAU 6: Moyennes des taux de germination

Espèces	n	Taux de germination (%)					
		NN(f)	NN	NA(f)	NA	T(f)	T
Bouleau jaune	8	48.0	50.9	49.0	47.4	49.5	50.1
Épinette blanche (stratifiée)	8	83.4	83.4	82.3	82.8	81.8	81.1
Épinette blanche (non-stratifiée)	8	77.3	78.6	79.4	78.0	77.4	77.1

T=eau témoin
(f)=filtrée

Cela veut donc dire que la neige artificielle n'aurait aucun effet sur la germination des espèces d'arbres étudiées soit le bouleau jaune et l'épinette blanche. Pourtant, il est connu que les graines germent moins bien dans une eau ayant une haute salinité (Weir et al, 1982). Il se peut donc que l'eau provenant de la neige artificielle ne soit pas assez chargée pour avoir un effet sur la germination des espèces étudiées. Toutefois, étant donné que la composition chimique de la neige artificielle est différente pour toutes les stations de ski puisque l'eau de fabrication n'est jamais la même, il est possible qu'il y est un effet à un autre centre de ski. Il est aussi possible que d'autres espèces seraient moins tolérantes envers une eau ayant une salinité plus élevée. Pour évaluer l'impact de la neige artificielle sur la végétation, il serait aussi approprié de faire des tests de croissance et de vérifier si l'eau de fonte provenant de la neige artificielle a un effet à plus long terme. Contrairement à la germination ou tout le matériel nécessaire pour se développer est dans la graine, la croissance dépend surtout du milieu sol-eau dont nos résultats ont démontré le pouvoir tampon du sol envers les eaux de fonte de neige naturelle et artificielle. La durée de ces travaux n'a pas permis l'étude de la croissance mais seulement les premiers aspects de la problématique c'est-à-dire le milieu sol-eau.

4.3 RÉSULTATS DE L'ENSEMENCEMENT SUR LE TERRAIN

La plantation sur le terrain n'a pas donné des résultats concluants. On retrouve dans le tableau 7 les pourcentages de germination du bouleau jaune et de l'épinette blanche. Quoique les pentes des deux pistes étaient semblables, les ensemencements n'avaient pas la même exposition au soleil, les deux pistes de ski n'ayant pas la même largeur. Les deux ensemencements n'avaient également pas le même type de sol, l'un étant plus rocailloux que l'autre. Même avec toutes ces différences, les ensemencements sur les

deux pistes n'ont pas donné des différences significatives pour un intervalle de confiance de 95%.

TABLEAU 7 :Résultats des tests de germination sur le terrain

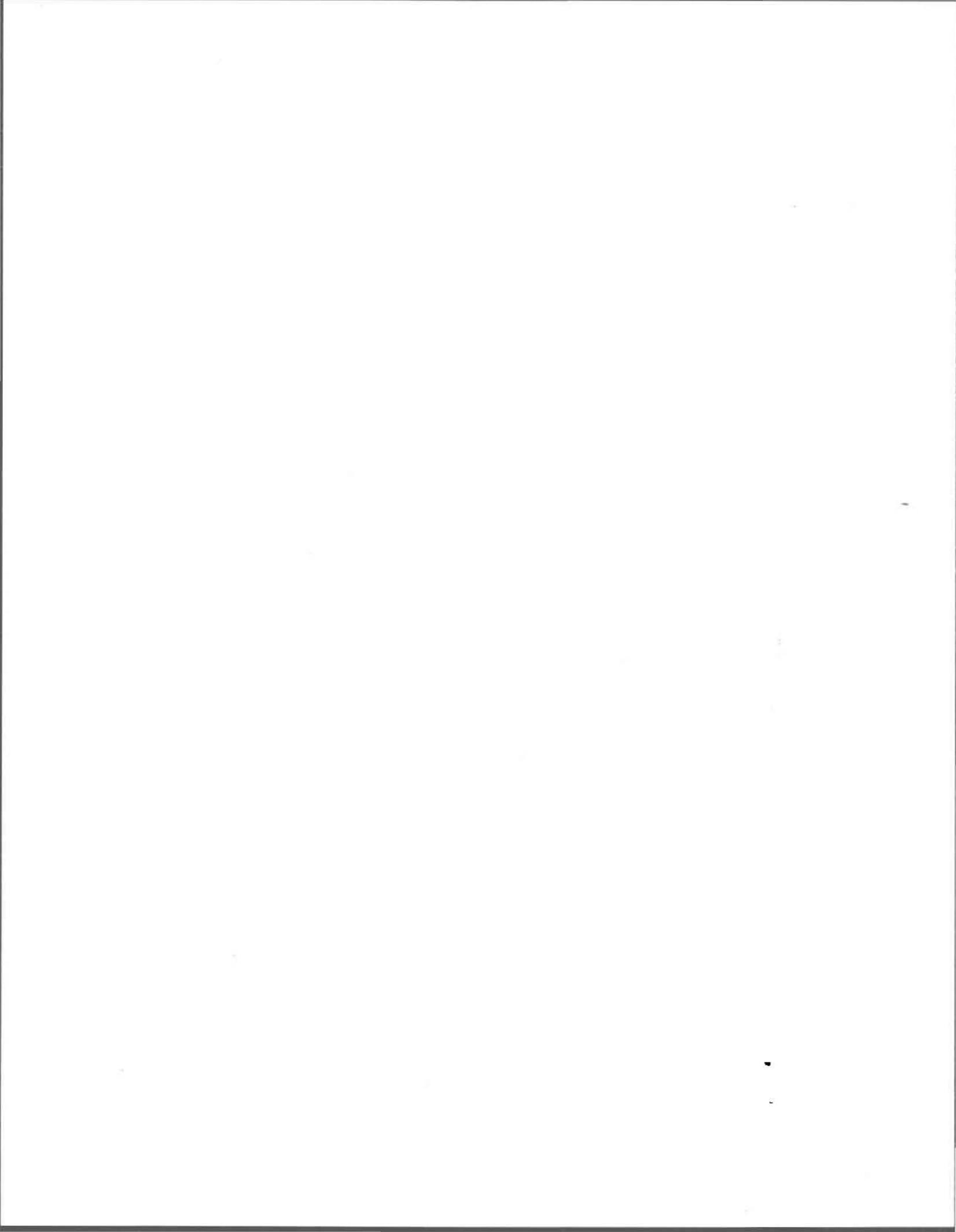
Type de neige sur la piste de ski	Nombre de bouleaux jaunes qui ont germés	Nombre d'épinettes blanches qui ont germés	% de germination des bouleaux jaunes	% de germination des épinettes blanches
Neige naturelle seulement	2	36	1 ± 1	9 ± 4
Neige artificielle et neige naturelle	10	63	3 ± 2	16 ± 9

4.4 RÉSULTATS DU RELEVÉ FLORISTIQUE SUR LE TERRAIN

En faisant le relevé floristique, 26 différentes espèces de plantes herbacées ont été trouvées ainsi que 10 espèces de plantes arborescentes et arbustives (voir Annexe 4). En faisant le relevé floristique, certaines tendances ont été observées chez quelques plantes herbacées. Même si seulement deux transects ont été faits, il semblait évident que quatre espèces préféraient être sur un côté des transects. *Clintonia borealis*, *Dryopteris phegopteris* et *Oxalis montana* étaient trouvés presque exclusivement sur le côté de la piste de neige naturelle. *Trillium erectum* se trouvait surtout du côté de la piste de neige artificielle. D'après ces transects il semble que *Clintonia borealis* préfère les conditions offertes par la piste de neige naturelle. Ces mêmes tendances ont été observées chez *Dryopteris phegopteris* et *Oxalis montana*. L'effet contraire a aussi été observé pour *Trillium erectum*. D'après ces observations préliminaires cette espèce,

préférait longer une piste de neige artificielle. Toutes les autres espèces ne semblaient pas démontrer de tendance. Chez les jeunes plantes arborescentes et arbustives aucune tendance n'a été observée.

Seulement les sept premiers carrés de chaque demi-transect étaient comparés car plus on se rapproche vers le milieu moins les effets de chaque type de neige deviennent évidents. Ces données ne sont pas statistiquement valables car seulement deux transects ont été effectués et l'effet pourrait être dû à un autre facteur. Il aurait fallu faire plus de transects afin de pouvoir affirmer sans doute qu'il y a un effet. Il serait aussi préférable de faire des transects qui ont la même orientation au soleil. Ceci aurait pour effet d'éliminer une autre variable, soit le soleil. Il serait donc intéressant de refaire cette expérience mais en faisant plusieurs transects et des deux côtés des pistes de ski pour que les résultats soient statistiquement valables dans le cas de toutes les espèces.



5. CONCLUSION

Les résultats des études sur la fonte des neiges en laboratoire ont démontré qu'en dépit de leurs origines différentes et des grands écarts entre leurs compositions chimiques relatives, la distribution des ions majeurs dans les gouttelettes congelés fabriquées par des canons à neige est semblable à celle de la neige naturelle au sol. Les coefficients de lessivage (fractionnement) dans les eaux de fonte ne sont pas statistiquement différents et ils ont le même patron d'élution préférentielle des espèces Na^+ , Cl^- , NO_3^- , et SO_4^{2-} . Elles se comportent donc de la même manière malgré les concentrations initiales différentes. On peut ainsi simuler la composition de la fonte de neige par des modèles déjà utilisés pour la neige naturelle.

Les études menées avec le sol ont montré que celui-ci semble avoir un effet tampon sur les eaux de fonte. Le sol contrôlerait la quantité d'ions disponibles en solution dans le lieu de germination et de croissance des jeunes plantes par des processus d'adsorption, de désorption et par l'activité microbologique.

Cette étude a aussi démontré que même si les chimies des eaux de fonte provenant de la neige artificielle et de la neige naturelle sont très différentes, il ne semble pas y avoir d'effet sur la germination des deux espèces végétales étudiées, le bouleau jaune et l'épinette blanche. Les résultats des études sur la germination du bouleau jaune et de l'épinette blanche ont permis de conclure que même si les concentrations des espèces chimiques dans les eaux de fonte de neige artificielle étaient de 2 à 40 fois supérieures à celles dans la neige naturelle il ne semble pas y avoir d'effet sur la germination de ces deux espèces. À court terme, les eaux de fonte plus concentrées de la neige artificielle

n'auraient aucun effet sur les deux espèces végétales étudiées par rapport à la neige naturelle.

Pour les transects entre une piste de ski où il y a seulement de la neige naturelle et une piste de ski où il y a un mélange de neige naturelle et de neige artificielle, nous avons trouvé que trois espèces de plantes semblaient préférer le côté où il y avait seulement de la neige naturelle. Ces plantes étaient: *Clintonia borealis*, *Dryopteris phegopteris* et *Oxalis montana*. Seulement une espèce se trouvait surtout du côté de la piste où il y avait de la neige artificielle soit *Trillium erectum*. Toutefois on ne peut pas dire que ces tendances sont exclusivement dûes au type de neige. D'autres paramètres pourraient influencer les tendances observées.

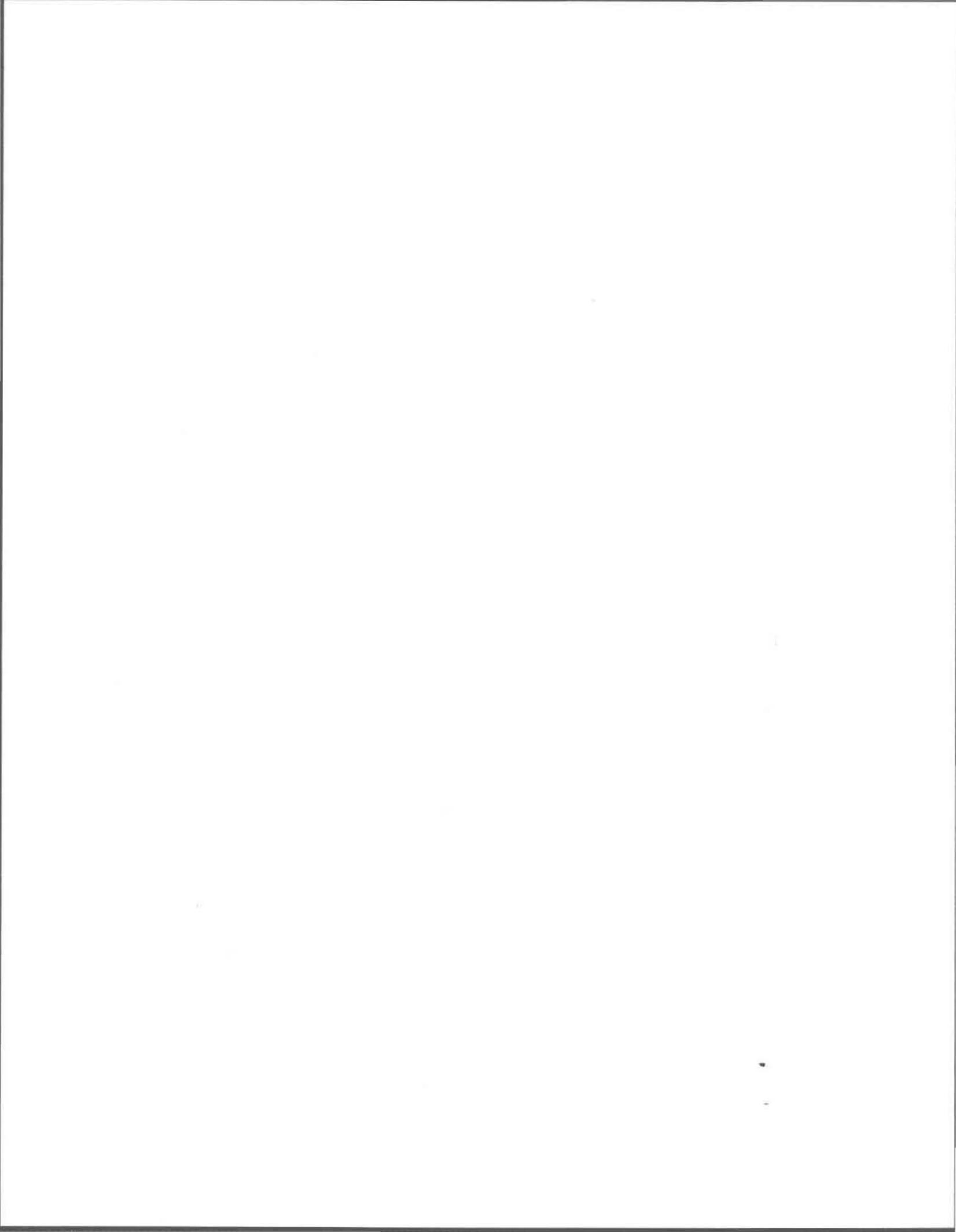
L'effet de la neige artificielle sur des espèces végétales n'est pas encore très bien connu. À première vue, il ne semble pas y avoir de d'effet sur la germination des espèces types. Toutefois les périodes de croissance annuelles subséquentes aux fontes de neige peuvent être déterminantes dans la réussite des espèces à maintenir leurs présences dans le milieu.

6. BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHARD, J. (1989) ; Bilan technique du système d'enneigement artificiel du Mont-Sainte-Anne; Rapport interne ; 1-5
- CADLE, S.H. (1991) ; Dry Deposition to Snowpack ; Seasonal Snowpacks ; 21-66 ; Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- COLBECK, S.C. (1987) ; Snow Metamorphism and Classification; Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology ; 1-35 ; D. Reidel Publishing Company
- CRC Handbook of Chemistry and Physics, (1987-88) ; 68^{ième} édition; editeur-Robert C. Weast, CRC Press, Inc.; Boca Raton Florida
- DAVIES, T.D., P. BRIMBLECOMBE, M. TRANTER, S. TSILOUIS, C.E. VINCENT, P. ABRAHAMS et L.L. BLACKWOOD (1987); The Removal of Soluble Ions from Melting Snowpacks; Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology ; 337-392 ; D. Reidel Publishing Company
- DEWALLE, D.R. (1987); Review of Snowpack Chemistry Studies; Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology ; 255-268 ; D. Reidel Publishing Company
- ERICKSON, N. (1980) ; A Short History of Snowmaking ; Ski Area Management ; 19(2): 31-32
- GUIANG, S.F., S.V. KRUPA, et G.C. PRATT (1984); Measurements of S(IV) and Organic Anions in Minnesota Rain; Atmospheric Environment ; 18(8): 1677-1682
- HERN, J.A., G.K. RUTHERFORD, et G.W. VANLOON (1985) ; Chemical and Pedogenetic Effects of Simulated Acid Precipitation on Two Eastern Canadian Forest Soils. I. Nonmetals; Canadian Journal of Forest Research. ; 15: 839-847
- INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (1985) ; Règles internationales pour les essais de semences ; Seed Sci. and Tech. ; 13: 440-451
- JOHANNESSEN, J., et A. HENRIKSEN (1978) ; Chemistry of Snow Meltwater: Changes in Concentration During Melting ; Water Resour. Res. ; 14(4):615-619

- JONES, H.G. et J. ROBERGE (1991) ; Nitrogen Dynamics and Sub-Ice Meltwater Patterns in a Small Boreal Lake During Snowmelt; Eastern Snow Conference- Proceedings of the 1992 Annual Meeting ; 169-180.
- JONES, H.G. et W. SOCHANSKA (1990) ; Analyse de sensibilité du modèle qualitatif de la qualité des eaux de fonte (SNOQUAL): la version du modèle appropriée et paramètres de choix; Portrait régional de la qualité des eaux de fonte- Rapport de recherche pour Environnement Canada ; chapitre IV.
- JONES, H.G. et W. SOCHANSKA (1987) ; résultats non-publiés.
- JONES, H.G. et J. STEIN (1990) ; Hydrogeochemistry of snow and snowmelt in catchment hydrology ; Process studies in hillslope hydrology (édité par M.G. Anderson et T.P. Burt), pages 531-574.
- LAFEUILLE, J. (1988) ; La fabrication de la neige ; Société Hydrotechnique de France Section de glaciologie ; 1-10
- OLIVER, B.G.; E.M. THURMAN et R.L. MALCOLM (1983) ; The Contribution of Humic Substances to the Acidity of Colored Natural Waters ; Geochimica et Cosmochimica Acta ; 47: 2031-2035
- RICHARDSON, G.R. et F.B. SALISBURY (1977) ; Plant Response to Light Penetrating Snow ; Ecology ; 58: 1152-1158
- SEIP, H.M. (1980) ; Acid Snow-Snowpack Chemistry and Snowmelt ; Effects of Acid Precipitation on Ecosystems ; 77-94 ; Plenum Press ; New York
- STUMM, W., et J.J. MORGAN (1981) ; Aquatic Chemistry, 2^{ème} édition ; John Wiley & Sons ; New York.
- TANNER, L., J.S. GAFFENEY, Y.-N. LEE et T.J. KELLY (1984) ; Organics as Oxidants, Reductants and Inhibitors in Clouds and Precipitation ; 77th Annual Meeting Air Pollution Control Association ; 8 pages.
- 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 ; Atmospheric Environment ; 20: 517-525.
- 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.

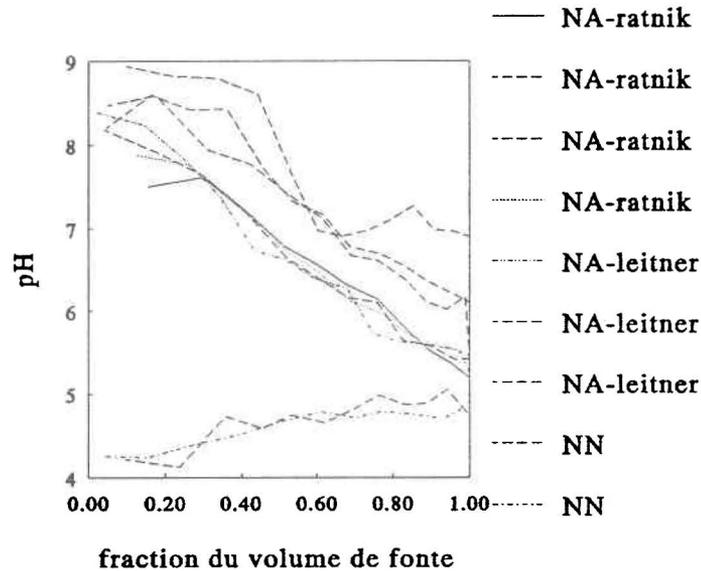
WEIR, T.E., C.R. STOCKING, M.G. BARBOUR et T.L. ROST (1982) ; Botany, an Introduction to Plant Biology, 6^{ème} édition ; John Wiley & Sons ; New York.



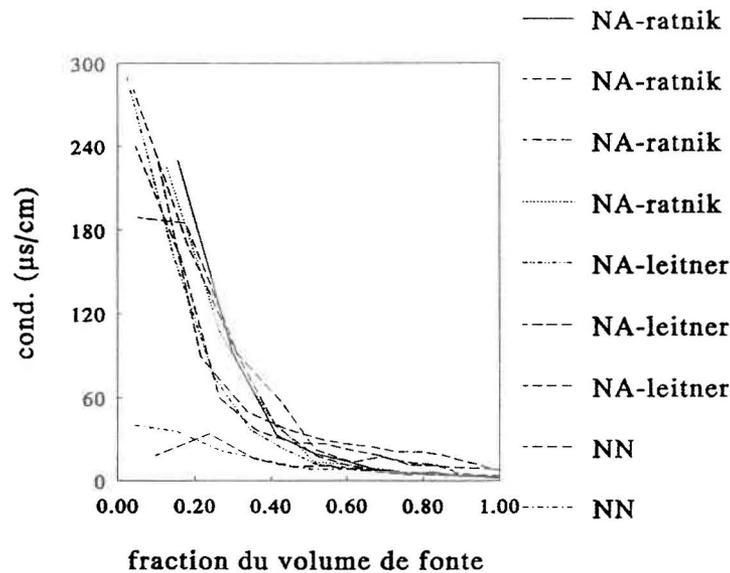
7. ANNEXES

ANNEXE 1: Profils du pH, de la conductivité, (cond.) et des ions dans les eaux de fonte de la neige naturelle (NN) et de la neige artificielle (NA).

pH en fonction du volume de fonte

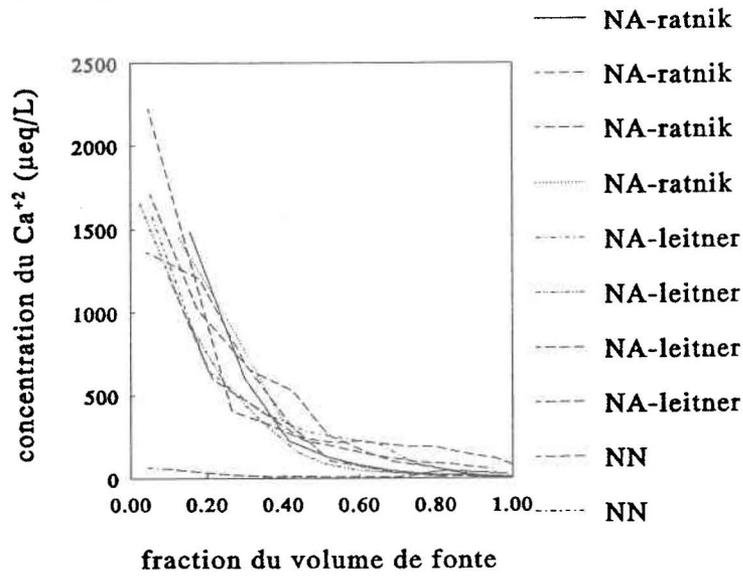


cond. en fonction du volume de fonte

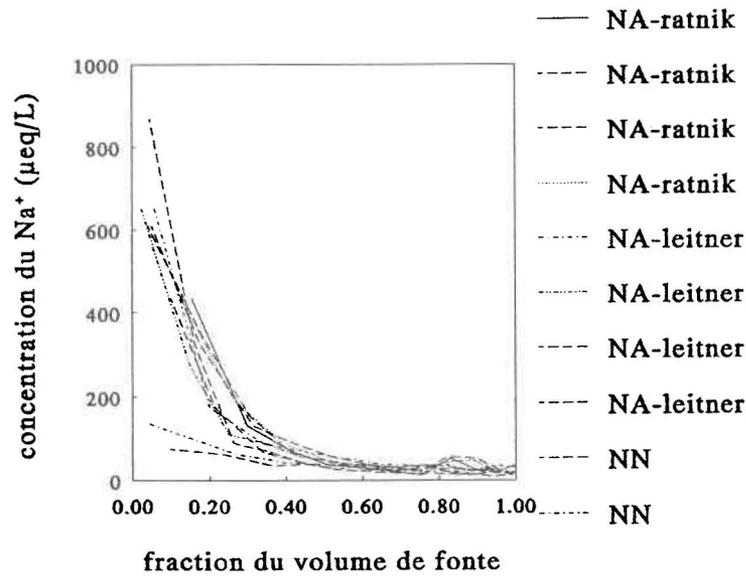


NA-ratnik = neige artificielle fabriquée avec un canon ratnik
NA-leitner = neige artificielle fabriquée avec un canon leitner
NN = neige naturelle avec des cristaux de forme arrondie

[Ca²⁺] en fonction du volume de fonte

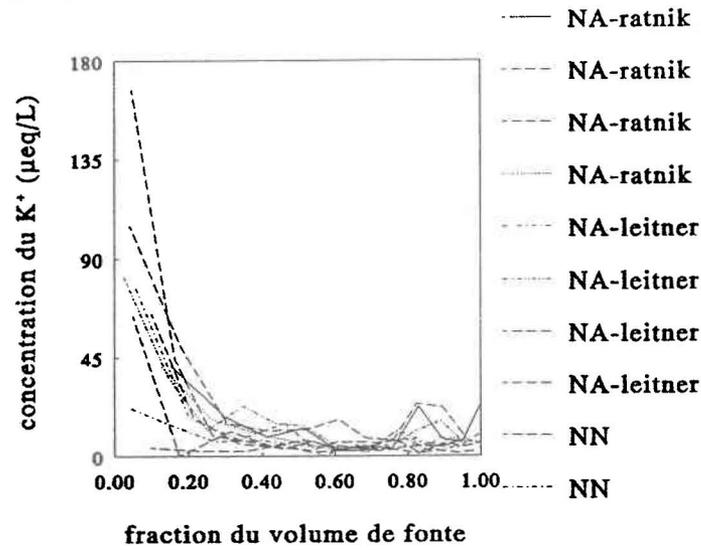


[Na⁺] en fonction du volume de fonte

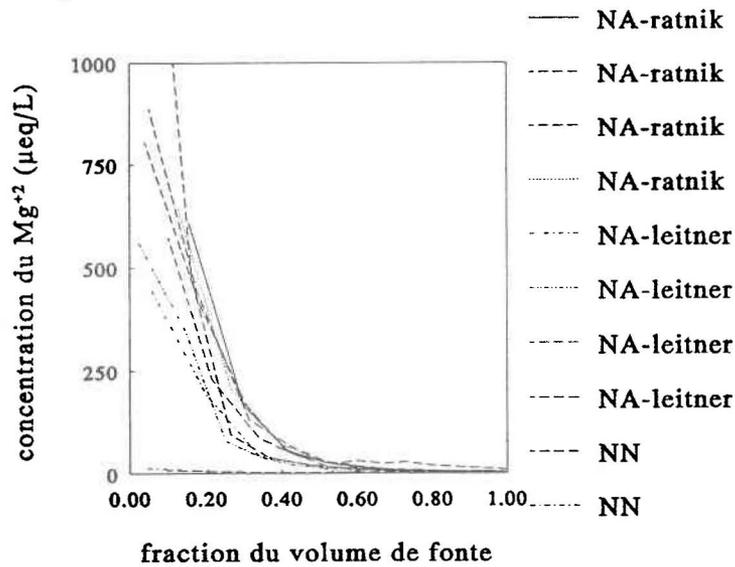


- NA-ratnik = neige artificielle fabriquée avec un canon ratnik
- NA-leitner = neige artificielle fabriquée avec un canon leitner
- NN = neige naturelle avec des cristaux de forme arrondie

[K⁺] en fonction du volume de fonte

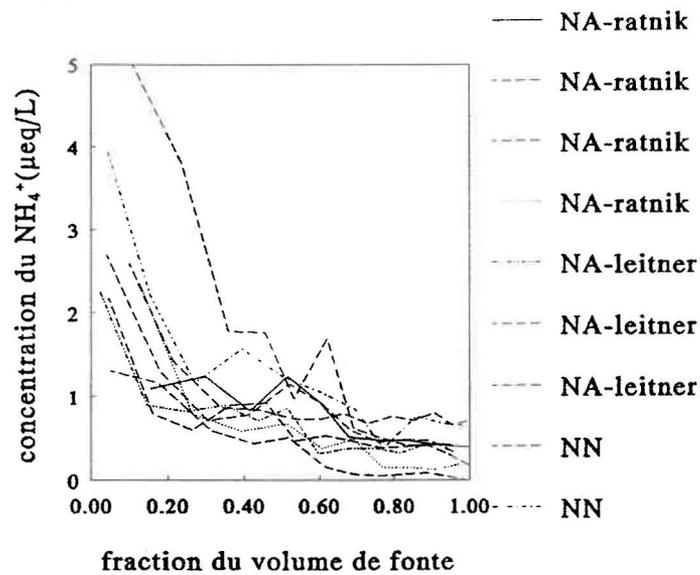


[Mg²⁺] en fonction du volume de fonte

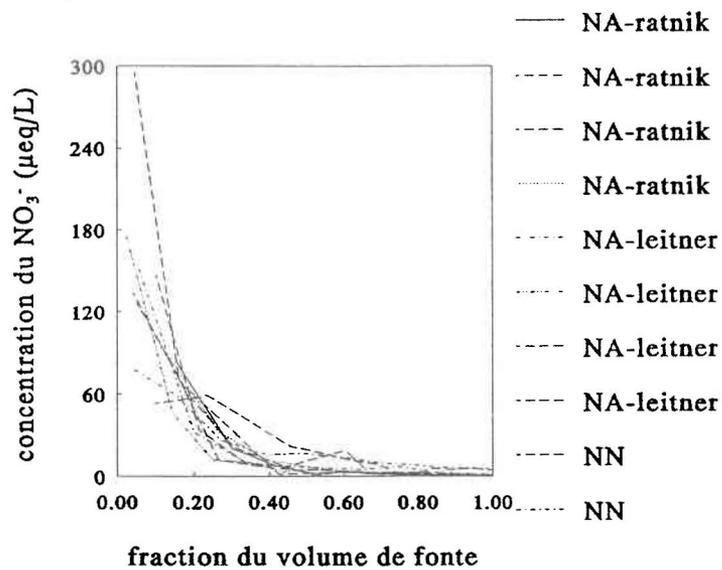


NA-ratnik = neige artificielle fabriquée avec un canon ratnik
 NA-leitner = neige artificielle fabriquée avec un canon leitner
 NN = neige naturelle avec des cristaux de forme arrondie

[NH₄⁺] en fonction du volume de fonte

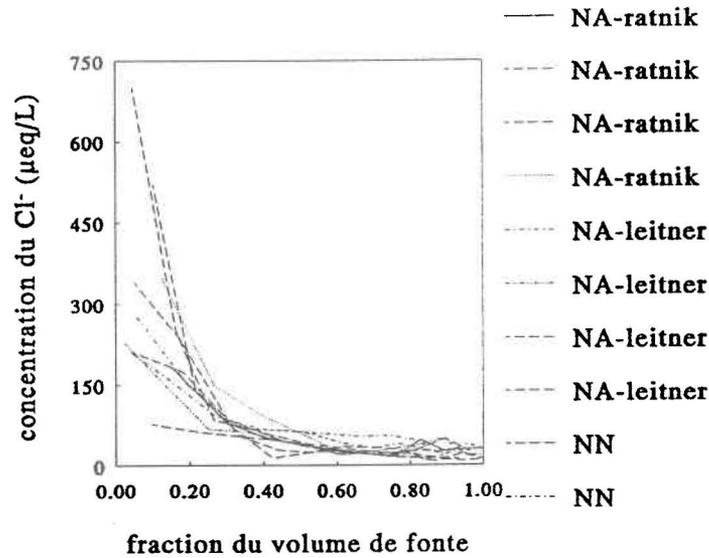


[NO₃⁻] en fonction du volume de fonte

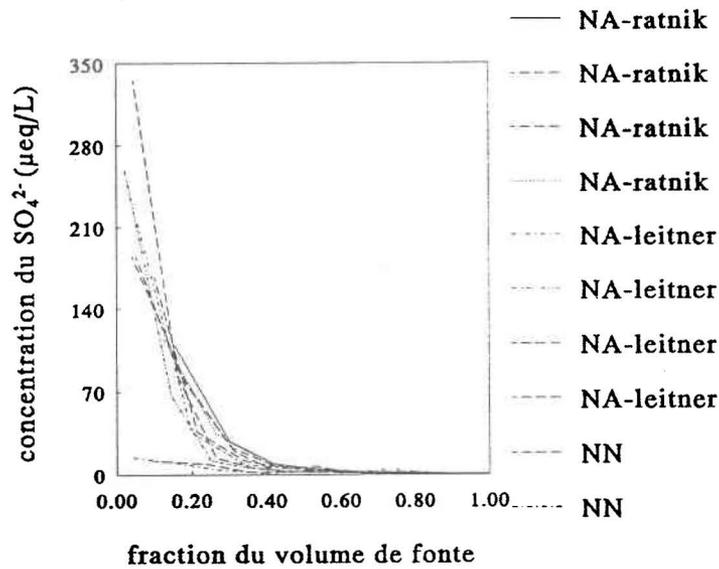


- NA-ratnik = neige artificielle fabriquée avec un canon ratnik
 NA-leitner = neige artificielle fabriquée avec un canon leitner
 NN = neige naturelle avec des cristaux de forme arrondie

[Cl⁻] en fonction du volume de fonte



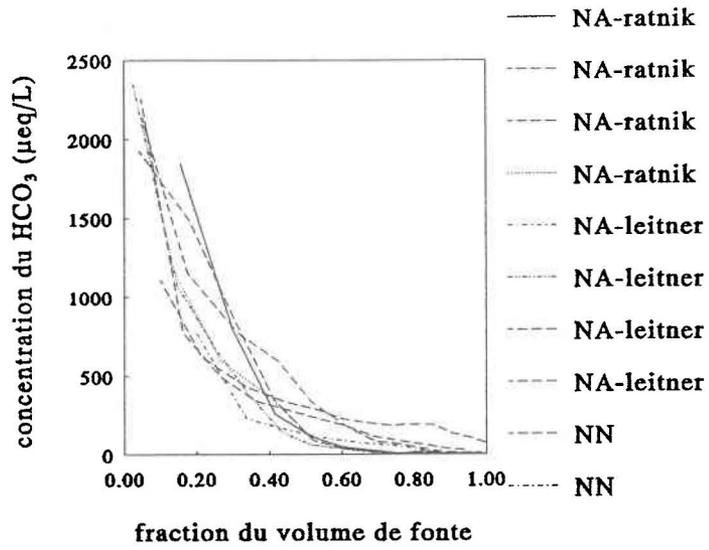
[SO₄+2-] vs. le volume de fonte



NA-ratnik
 NA-leitner
 NN

= neige artificielle fabriquée avec un canon ratnik
 = neige artificielle fabriquée avec un canon leitner
 = neige naturelle avec des cristaux de forme arrondie

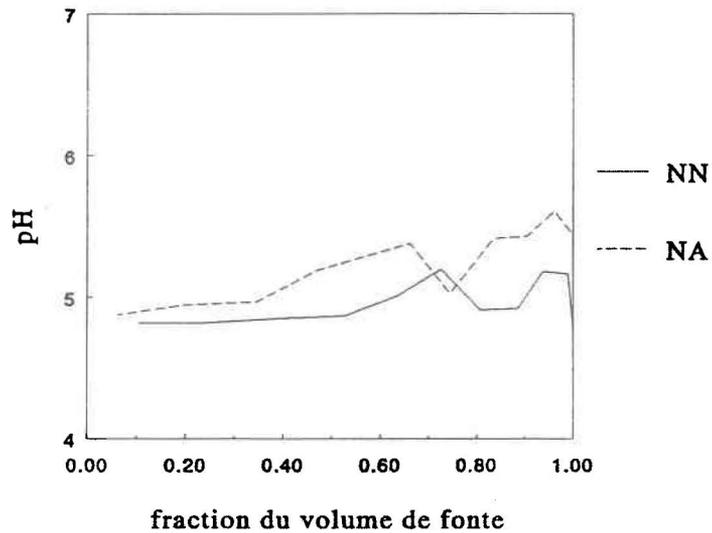
[HCO₃] en fonction du volume de fonte



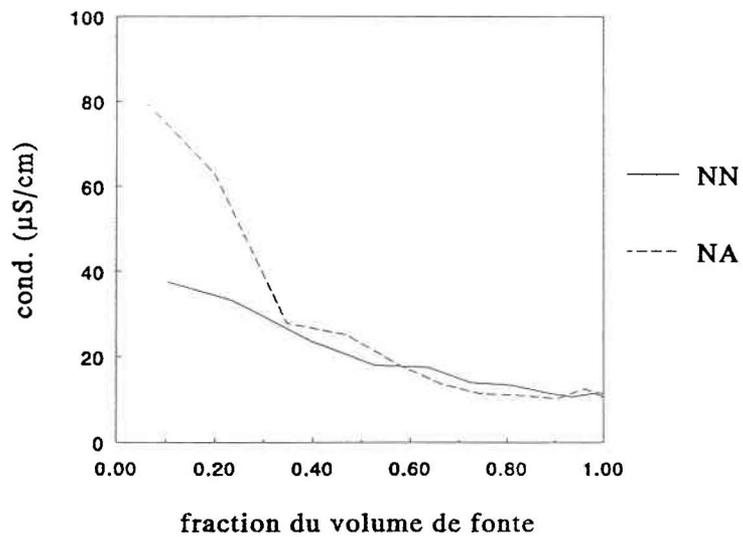
- NA-ratnik = neige artificielle fabriquée avec un canon ratnik
- NA-leitner = neige artificielle fabriquée avec un canon leitner
- NN = neige naturelle avec des cristaux de forme arrondie

ANNEXE 2: Profils du pH, de la conductivité (cond.) et des ions dans les eaux de fonte de la neige naturelle (NN) et la neige artificielle (NA) avec un bouchon de sol.

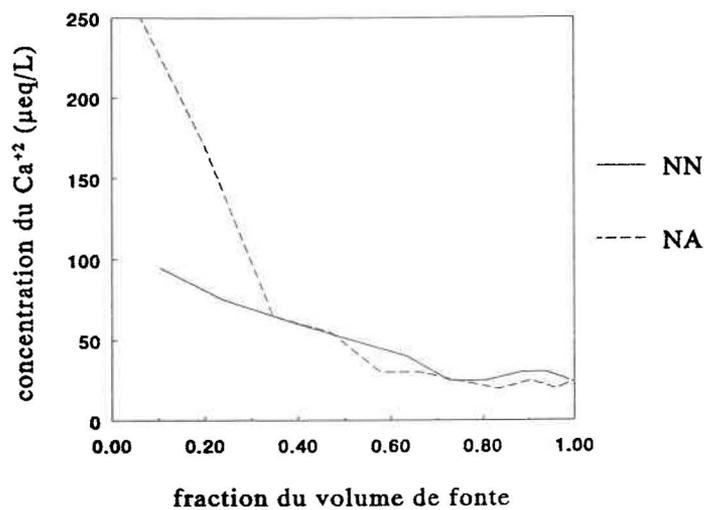
pH en fonction du volume de fonte



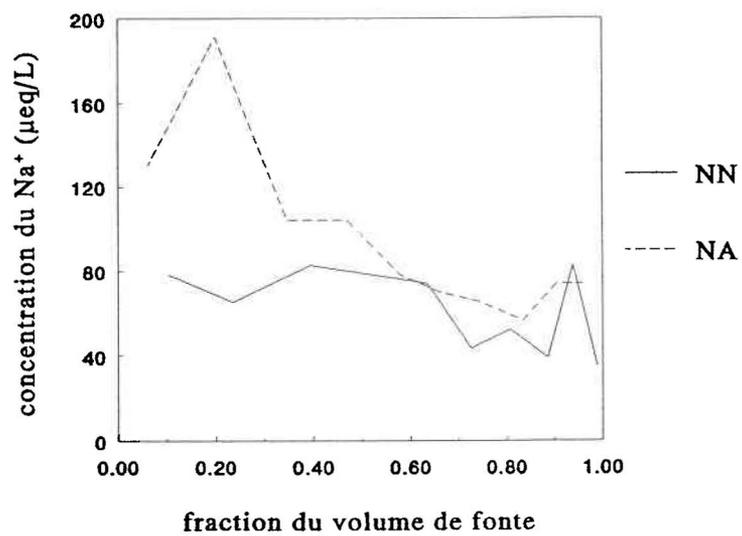
cond. en fonction de la fraction



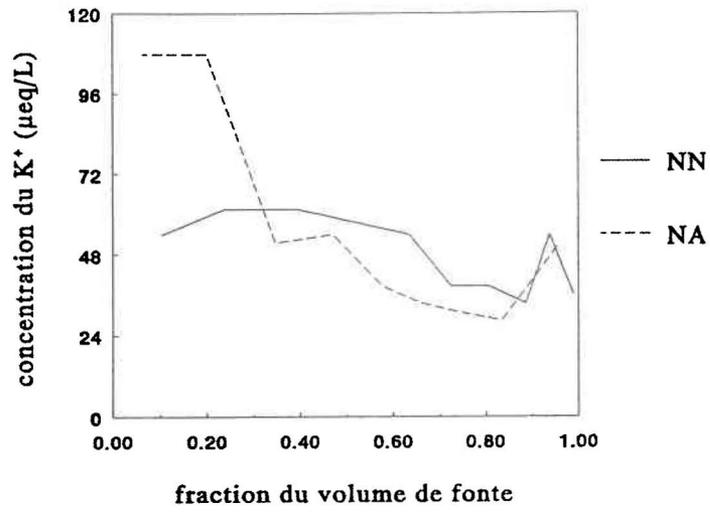
[Ca²⁺] en fonction du volume de fonte



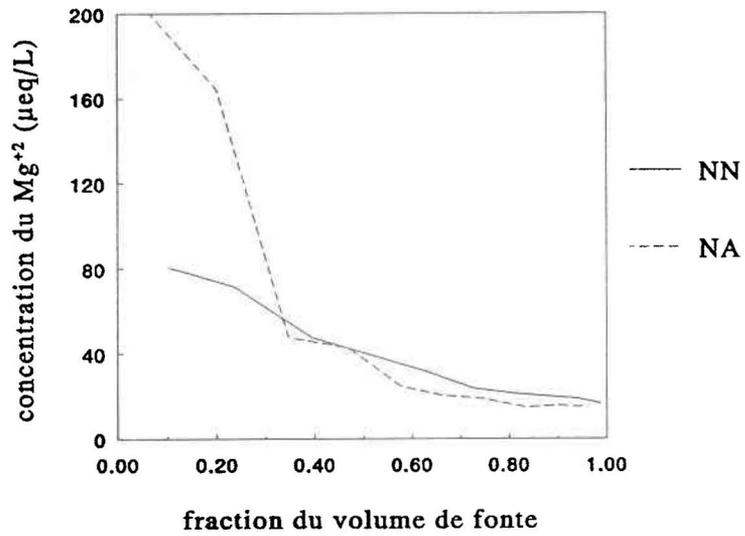
[Na⁺] en fonction du volume de fonte



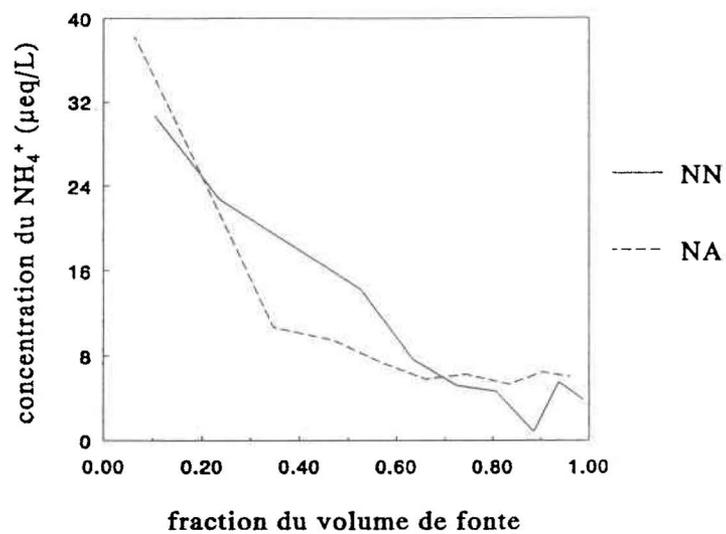
[K⁺] en fonction du volume de fonte



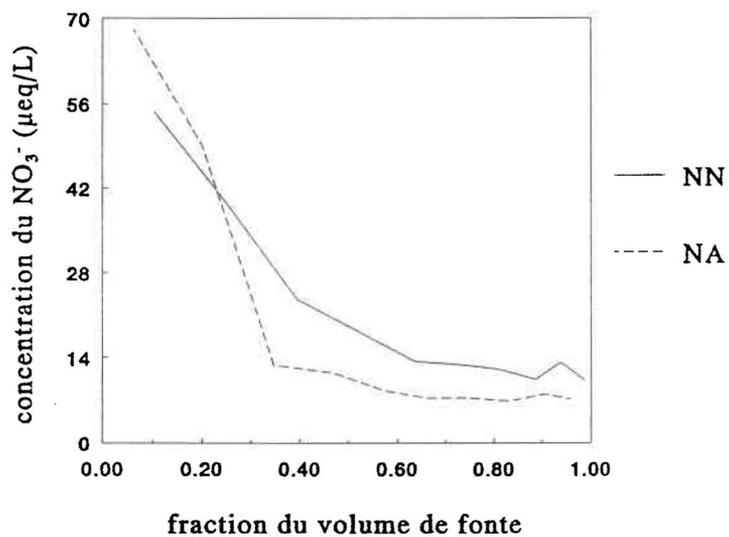
[Mg⁺²] en fonction du volume de fonte



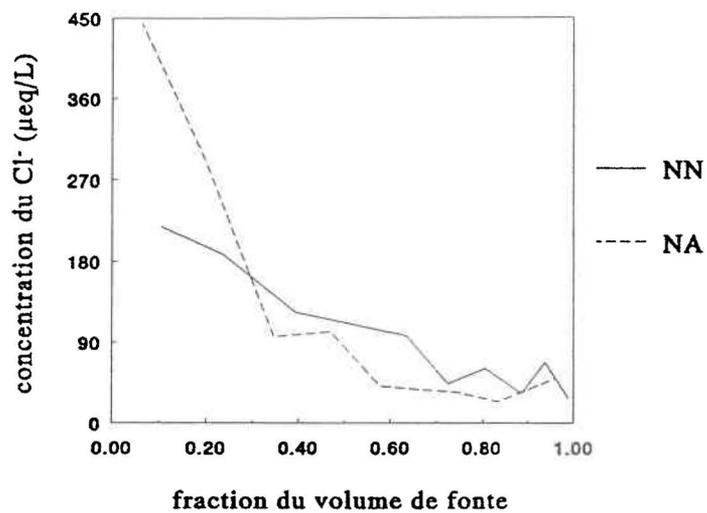
[NH₄⁺] en fonction du volume de fonte



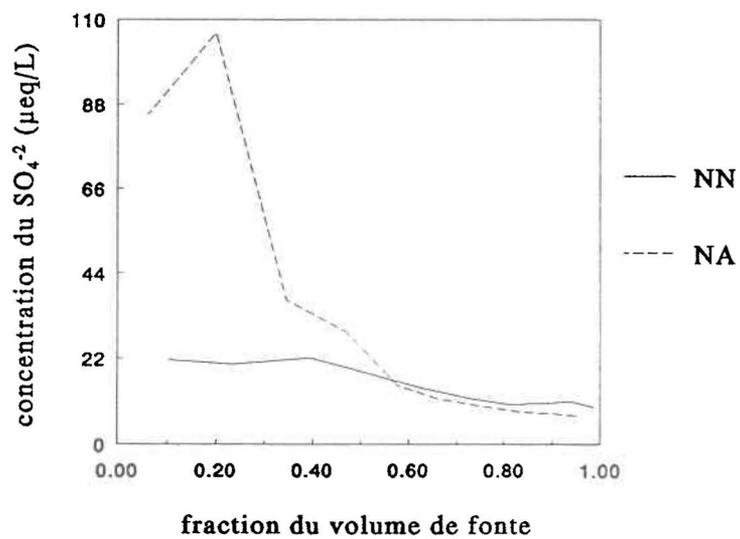
[NO₃⁻] en fonction du volume de fonte



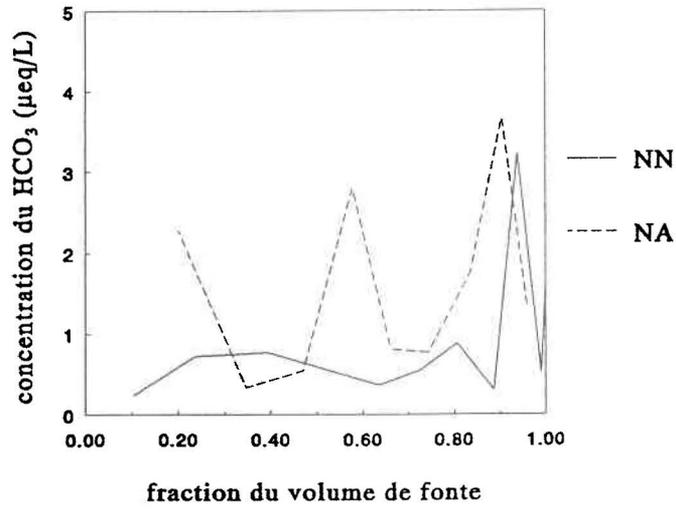
[Cl⁻] en fonction du volume de fonte



[SO₄⁻²] vs. le volume de fonte



[HCO₃] en fonction du volume de fonte



NN=neige naturelle
NA=neige artificielle

ANNEXE 3: Résultats statistiques des taux de germination pour les deux espèces étudiées.

Comparaison des taux de germination du bouleau jaune avec les différentes eaux de fonte et l'eau témoin

Source	DF	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Pr.>F
Model	5	68.354	13.671	0.44	0.8167
Erreur	42	1299.625	30.943		
Total corrigé	47	1367.979			

variable dépendante: Taux de germination

r^2 : 0.049967

c.v.: 11.31873

racine mse: 5.562684

moyenne du taux de germination: 49.1

Comparaison des taux de germination de l'épinette blanche non-stratifiée avec les différentes eaux de fonte et l'eau témoin

Source	DF	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Pr.>F
Model	5	31.917	6.383	0.40	0.8459
Erreur	42	670.000	15.952		
Total corrigé	47	701.917			

variable dépendante: Taux de germination

r^2 : 0.045471

c.v.: 5.123305

racine mse: 3.994043

moyenne du taux de germination: 79.0

Comparaison des taux de germination de l'épinette blanche stratifiée avec les
différentes eaux de fonte et l'eau témoin

Source	DF	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Pr.>F
Model	5	32.688	6.538	0.36	0.8736
Erreur	42	765.125	18.217		
Total corrigé	47	797.813			

variable dépendante: Taux de germination

r^2 : 0.040971

c.v.: 5.177460

racine mse: 4.268168

moyenne du taux de germination: 82.4

ANNEXE 4: Relevés floristiques des transects effectués entre des pistes de ski de neige naturelle et de neige artificielle

Plantes herbacées-transect #1: neige naturelle vers neige artificielle

Liste des espèces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Aralia nudicaulis</i>															
<i>Aster acuminatus</i>															
<i>Athyrium filix-femina</i>															
<i>Botrychium sp.</i>															
<i>Carex sp-1</i>															
<i>Carex sp-2</i>															
<i>Clintonia borealis</i>															
<i>Dryopteris disjuncta</i>															
<i>Dryopteris phegopteris</i>															
<i>Dryopteris spinulosa</i>															
<i>Graminees sp.</i>															
<i>Lactuca canadensis</i>															
<i>Lycopodium lucidulum</i>															
<i>Monotropa uniflora</i>															
<i>Oxalis montana</i>															
<i>Prenanthes sp.</i>															
<i>Pyrola elleptica</i>															
<i>Ribes glandulosum</i>															
<i>Ribes lacustre</i>															
<i>Rubus idaeus</i>															
<i>Rubus pubescens</i>															
<i>Smilacina racemosa</i>															
<i>Solidago macrophylla</i>															
<i>Streptopus roseus</i>															
<i>Trillium erectum</i>															
<i>Viola incognita</i>															

Plantes arbustives et arborescentes

<i>Abies balsamea</i>															
<i>Acer saccharum</i>															
<i>Acer spicatum</i>															
<i>Betula lutea</i>															
<i>Cornus alternifolia</i>															
<i>Corylus cornuta</i>															
<i>Lonicera canadensis</i>															
<i>Prunus pennsylvanica</i>															
<i>Sambucus pubens</i>															
<i>Viburnum alternifolium</i>															

 = présence de l'espèce

Plantes herbacées-transect #2: neige artificielle vers neige naturelle

Liste des espèces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Aralia nudicaulis</i>															
<i>Aster acuminatus</i>		■	■	■	■	■	■	■	■	■					
<i>Athyrium filix-femina</i>						■	■								■
<i>Botrychium sp.</i>															
<i>Carex sp-1</i>			■							■					
<i>Carex sp-2</i>								■							
<i>Clintonia borealis</i>				■			■	■	■	■		■	■	■	■
<i>Dryopteris disjuncta</i>															
<i>Dryopteris phegopteris</i>										■	■		■	■	
<i>Dryopteris spinulosa</i>	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>Graminees sp.</i>					■										
<i>Lactuca canadensis</i>															
<i>Lycopodium lucidulum</i>															
<i>Monotropa uniflora</i>		-													
<i>Oxalis montana</i>		■					■		■	■		■	■		
<i>Prenanthes sp.</i>		■		■	■		■					■			■
<i>Pyrola elleptica</i>															
<i>Ribes glandulosum</i>	■	■													
<i>Ribes lacustre</i>															
<i>Rubus idaeus</i>		■													
<i>Rubus pubescens</i>	■	■		■	■	■	■	■	■	■		■	■		■
<i>Smilacina racemosa</i>															
<i>Solidago macrophylla</i>					■										
<i>Streptopus roseus</i>				■					■						
<i>Trillium erectum</i>				■	■	■						■			
<i>Viola incognita</i>					■	■	■	■	■						

Plantes arbustives et arborescentes

<i>Abies balsamea</i>									■			■		■	
<i>Acer saccharum</i>	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■
<i>Acer spicatum</i>	■	■		■			■	■		■	■	■		■	
<i>Betula lutea</i>															
<i>Cornus alternifolia</i>															
<i>Corylus cornuta</i>				■											
<i>Lonicera canadensis</i>															
<i>Prunus pennsylvanica</i>	■														
<i>Sambucus pubens</i>															
<i>Viburnum alternifolium</i>							■	■	■	■					

■ = présence de l'espèce

Plantes herbacées-transect #3: neige artificielle vers neige naturelle

Liste des espèces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Aralia nudicaulis</i>															
<i>Aster acuminatus</i>															
<i>Athyrium filix-femina</i>															
<i>Botrychium sp.</i>															
<i>Carex sp-1</i>															
<i>Carex sp-2</i>															
<i>Clintonia borealis</i>															
<i>Dryopteris disjuncta</i>															
<i>Dryopteris phegopteris</i>															
<i>Dryopteris spinulosa</i>															
<i>Graminees sp.</i>															
<i>Lactuca canadensis</i>															
<i>Lycopodium lucidulum</i>															
<i>Monotropa uniflora</i>															
<i>Oxalis montana</i>															
<i>Prenanthes sp.</i>															
<i>Pyrola elleptica</i>															
<i>Ribes glandulosum</i>															
<i>Ribes lacustre</i>															
<i>Rubus idaeus</i>															
<i>Rubus pubescens</i>															
<i>Smilacina racemosa</i>															
<i>Solidago macrophylla</i>															
<i>Streptopus roseus</i>															
<i>Trillium erectum</i>															
<i>Viola incognita</i>															

Plantes arbustives et arborescentes

<i>Abies balsamea</i>															
<i>Acer saccharum</i>															
<i>Acer spicatum</i>															
<i>Betula lutea</i>															
<i>Cornus alternifolia</i>															
<i>Corylus cornuta</i>															
<i>Lonicera canadensis</i>															
<i>Prunus pennsylvanica</i>															
<i>Sambucus pubens</i>															
<i>Viburnum alternifolium</i>															

 = présence de l'espèce

Plantes herbacées-transect #4: neige naturelle vers neige artificielle

Liste des espèces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Aralia nudicaulis</i>															
<i>Aster acuminatus</i>															
<i>Athyrium filix-femina</i>															
<i>Botrychium sp.</i>															
<i>Carex sp-1</i>															
<i>Carex sp-2</i>															
<i>Clintonia borealis</i>															
<i>Dryopteris disjuncta</i>															
<i>Dryopteris phegopteris</i>															
<i>Dryopteris spinulosa</i>															
<i>Graminees sp.</i>															
<i>Lactuca canadensis</i>															
<i>Lycopodium lucidulum</i>															
<i>Monotropa uniflora</i>															
<i>Oxalis montana</i>															
<i>Prenanthes sp.</i>															
<i>Pyrola elleptica</i>															
<i>Ribes glandulosum</i>															
<i>Ribes lacustre</i>															
<i>Rubus idaeus</i>															
<i>Rubus pubescens</i>															
<i>Smilacina racemosa</i>															
<i>Solidago macrophylla</i>															
<i>Streptopus roseus</i>															
<i>Trillium erectum</i>															
<i>Viola incognita</i>															

Plantes arbustives et arborescentes

<i>Abies balsamea</i>															
<i>Acer saccharum</i>															
<i>Acer spicatum</i>															
<i>Betula lutea</i>															
<i>Cornus alternifolia</i>															
<i>Corylus cornuta</i>															
<i>Lonicera canadensis</i>															
<i>Prunus pennsylvanica</i>															
<i>Sambucus pubens</i>															
<i>Viburnum alternifolium</i>															

 = présence de l'espèce