

Composition physico-chimique de la neige artificielle et les impacts des eaux de fonte sur deux espèces végétales des écosystèmes montagneux au Québec

G. DEVARENNES
INRS-Eau, Université du Québec
2700 Einstein
Ste-Foy, Québec G1V 4C7 Canada

RÉSUMÉ

L'utilisation de plus en plus de neige artificielle sur des pentes de ski pour allonger la saison de ski pourrait avoir un effet sur l'hydrogéochimie des eaux de ruissellements, la composition physico-chimique du sol ainsi que la régénération de certains types de végétation. Afin d'évaluer les répercussions de l'épandage de la neige artificielle sur des écosystèmes montagneux, nous avons caractérisé la composition chimique de la neige artificielle d'après l'eau utilisée pour sa fabrication au Mont-Sainte-Anne, Québec, Canada. Nous avons de plus comparé la composition chimique des eaux de fonte provenant de la neige naturelle et de la neige artificielle ainsi que de leur impact sur les taux de germination de deux espèces montagneuses: le bouleau jaune (*Betula lutea*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*). 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 ayant des cristaux de formes arrondie. On peut ainsi simuler la composition de la fonte de neige par des modèles déjà utilisés par la neige naturelle. 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.

INTRODUCTION

L'utilisation de la neige artificielle sur des pentes de ski pour allonger la saison de ski devient de plus en plus répandue dans les régions montagneuses de l'Amérique du Nord et de l'Europe. Cette utilisation pourrait avoir un effet sur l'hydrologie (Eisel et al 1990) et l'hydrogéochimie des eaux de ruissellements, la composition physico-chimique du sol ainsi que sur la régénération de certains types de végétations. Toutefois, à part de l'étude hydrologique de Eisel et al, il n'existe aucune étude sur l'impact environnemental de la neige artificielle. Cette neige est fabriquée à partir d'eau de rivière ou d'eaux souterraines en contact direct avec des minéraux et de la matière organique. Elle est plus concentrée en des ions majeurs tels que Cl^- , Br^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , et Ca^{2+} que la neige naturelle tandis que d'autres espèces telles que NH_4^+ et NO_3^- peuvent se trouver dans des concentrations plus élevées dans la neige naturelle. Il est ainsi que les eaux de fonte de neige artificielle ayant des compositions en solutés minéralogiques et éléments nutritifs différents des eaux de fonte de neige naturelle pourraient influencer la physico-chimie du sol ainsi que la germination et la croissance de certaines espèces de plantes végétales.

Pendant la fonte de neige naturelle un processus physico-chimique conduit à la fractionnement de certains ions (Johannessen et Henriksen, 1978). La fractionnement donne lieu à des concentrations élevées des ions solubles dans les premières fractions des eaux de fonte. De plus la fractionnement des ions est accompagnée du processus d'éluion préférentielle où certains ions sont enlevés à des taux plus rapides que d'autres. En général, il y a une éluion assez lente des ions Na^+ et Cl^- par rapport aux autres ions (Davies et al, 1987). La composition des ions solubles dans les eaux de fonte de la neige naturelle dépend de la distribution des ions dans les grains et cristaux de neige, dans le couvert de neige, de la structure physique du couvert de neige, et du type de fonte (Davies et al, 1987). Les taux d'éluion des ions dans les eaux de fonte peuvent être quantifiés par un coefficient de lessivage, k , un paramètre dans un modèle de fonte (Jones et Sochanska, 1990). Dans les conditions de fonte contrôlée en laboratoire, ces valeurs de k sont reproductibles 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. Si le coefficient de lessivage, k , peut être considéré comme un indice de la distribution d'un ion dans un grain de neige naturelle, une valeur similaire pour l'éluion du même ion dans la neige artificielle peut être interprétée comme signe de même profile 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 d'un modèle de fonte de neige naturelle 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. Ces données seront à la base d'une étude d'impact de la neige artificielle sur l'écosystème montagneux.

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 des meilleurs taux de germination de graines sont obtenus lorsque la salinité de l'eau est faible. (Weir et al, 1982) La

neige artificielle, beaucoup plus chargée que la neige naturelle, pourrait donc avoir un effet sur la germination et la croissance des espèces végétales qui se trouvent sur les bords de pistes de ski où il y a fabrication de la neige artificielle.

OBJECTIFS

Le premier objectif de cette recherche est de caractériser la composition physico-chimique des eaux de fonte de neige artificielle en fonction de la composition des eaux de fabrication et de les comparer aux fontes naturelles. Le deuxième objectif est d'évaluer l'impact des eaux de fonte de la neige artificielle sur la germination de certaines espèces végétales par rapport aux eaux de fonte naturelles. Afin de mieux contrôler les conditions expérimentales, les fontes ont été faites dans un simulateur de fonte en laboratoire (voir figure 1) tandis que les tests de germination ont été faites dans un germeoir.

MÉTHODOLOGIE

Site d'échantillonnage

Tous les travaux de terrains ont été effectués au Mont-Sainte-Anne, un centre de ski à Beaupré au Québec. L'échantillonnage de la neige naturelle et de la neige artificielle s'est faite pendant l'hiver 1991-1992. La neige naturelle a été ramassée à la station de pompage aux pieds du Mont-Sainte-Anne. La neige fraîchement tombée a été mise dans des sacs en plastique et fermée hermétiquement. Cette neige a été par la suite transportée dans une chambre froide où elle a été conservée à -10°C jusqu'à son utilisation.

La neige artificielle a été ramassée au Mont-Sainte-Anne sur diverses pistes à deux différents types de canons à neige. Puisque la source d'eau (rivière Sainte-Anne du Nord) est la même partout sur la montagne, nous avons conclu que les seules choses qui pourraient faire varier la chimie de la neige artificielle seraient: le type de canons à neige, la température de fabrication de la neige artificielle et la grosseur des grains. Les deux types de canons desquels la neige artificielle a été ramassée sont le Leitner à 12 buses et le Ratnik Snowgiant II + II. À chaque canon à neige, 4 bacs de plastique étaient déposés dessous le jet de neige à des

distances différentes du canon à neige. Approximativement deux litres de neige étaient transférés des bacs à des sacs en plastique. Ensuite environ 100 mL de neige était transférée dans trois sacs de plastique Whirlpack. Les sacs étaient par la suite scellés, étiquetés puis transférés dans une chambre froide où ils étaient conservés à -10°C jusqu'à leur utilisation.

L'eau utilisée pour faire de la neige artificielle a été échantillonnée à la station de pompage qui se trouve à mi-montagne au Mont-Sainte-Anne.

Fonte en laboratoire

Toutes les fontes en laboratoire se faisaient en utilisant un simulateur de fonte de neige. (voir figure 1) Cet appareil de Plexiglas est composé d'un compartiment de réfrigération où peuvent être insérées quatre colonnes de Plexiglas avec lysimètre, un bain cryothermostaté de marque Haake (modèle C/F3) et une solution antigel: eau (5:1) comme réfrigérant. Une fois remplie de neige chaque colonne était introduite dans le simulateur et la température était maintenue à 0.1°C . Les colonnes étaient connectées à de l'air comprimé pour maintenir 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 le HNO_3 , le HCl et le NH_3 afin d'éviter toute

contamination de la neige par l'adsorption de gaz provenant de l'air ambiant du laboratoire.

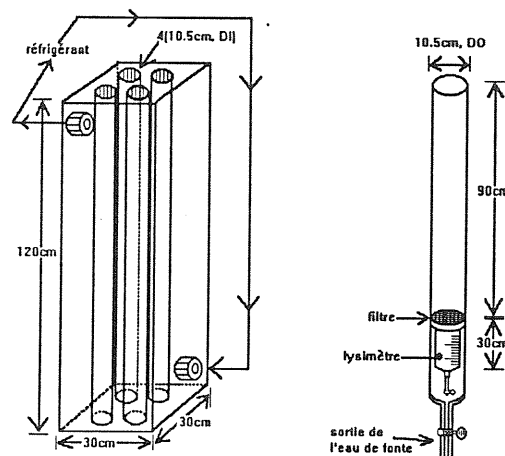


Figure 1. Simulateur de fonte de neige

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. Ceci permet une fonte plus semblable à celle de la nature.

TABLEAU 1. Méthodes d'analyses physico-chimiques des échantillons d'eau de fonte.

	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-} , SO_4^{2-})	Chromatographique	Chromatographe ionique DX-300 Dionex
Cations majeurs (Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} , Na^+)	Spectrophotométrique	Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme Varian (AA-20)
NH_4^+	Colorimétrique	Auto-analyseur Technicon II
C.O.D.	Électrométrique	Auto-analyseur Technicon IV
C.I.D.	Électrométrique	Auto-analyseur Technicon IV

L'eau de fonte accumulée dans le lysimètre dans chaque colonne était prélevée à chaque vingt-quatre heures jusqu'à la disparition complète de la neige pour fin d'analyses physico-chimiques. Les fontes de neige récoltée dans les sacs Whirlpack contenant environ 100mL de neige se faisaient à la température de la pièce.

Les eaux de fonte destinées aux différentes analyses ont été filtrées sur des filtres de fluorure de polyvinylidène Millipore (diamètre: 47mm, porosité: 0.22µm) sous vide. On peut voir dans le tableau 1 les différentes analyses qui ont été effectuées.

Une fois les fontes en laboratoire terminées et toutes les analyses chimiques complétées, les données amassées furent traitées par un modèle, SNOQUALD (Jones et Sochanski, 1990) qui simule les fontes de neige. 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 lavage (k) dont les valeurs peuvent être différentes selon les espèces ioniques lessivées. SNOQUALD est la version d'un modèle itératif qui tient compte de 2 taux de lessivage: c'est à dire, un taux de lessivage rapide (neige) et un taux de lessivage lent (débris organiques).

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 (µeq/L) des polluants atmosphériques de la lame d'eau de fonte issue du stock de neige.

C_o = concentration initiale (µeq/L) des polluants atmosphérique 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 package IMSL. La détermination du meilleur ajustement est estimé par la somme des différences au carré des concentrations calculées et mesurées.

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

Le test de Erreur Standard a été calculé pour tous les ajustements.

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

où

N = nombre d'échantillons

(Jones et Sochanska, 1990)

Tests de germination

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 emmenée au laboratoire la veille du test pour qu'elle puisse fondre à la température de la pièce.

Un plat de germination contenait 200 graines. Un test de germination équivaut à 100 graines. Pour que les résultats soient statistiquement valables il faut que chaque test soit fait quatre fois. Dans ces expériences, chaque test avec les six différents types d'eau a été fait huit fois. Avant de mettre les graines dans les plats de germination un substrat humide (Kimpak: feuille de cellulose crêpée) humecté avec 120mL 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 0.2µm étaient attachés au bout de la seringue. Un autre 120mL d'eau était mis dans le fond du plat de germination. Par après, les semences étaient déposées sur les couches en faisant attention qu'elles ne se touchent pas les une aux autres. Tous les plats

TABLEAU 2. Concentrations des ions majeurs

	H^+ ($\mu eq/L$)	Ca^{+2} ($\mu eq/L$)	Na^+ ($\mu eq/L$)	K^+ ($\mu eq/L$)	Mg^{+2} ($\mu eq/L$)	NO_3^- ($\mu eq/L$)	SO_4^{-2} ($\mu eq/L$)	Cl^- ($\mu eq/L$)
<i>neige naturelle n=3</i>	20.3 ± 7.0	24.6 ± 9.0	52.2 ± 13.0	6.0 ± 5.3	3.9 ± 1.1	23.1 ± 2.0	12.7 ± 1.0	47.1 ± 7.1
<i>neige artificielle n=11</i>	0.003 ± 0.005	353.7 ± 21.7	97.5 ± 6.8	7.3 ± 1.4	157.6 ± 53.0	19.9 ± 1.0	88.0 ± 0.8	53.5 ± 10.0
<i>eau de fabrication n=2</i>	0.003 ± 0.0001	273.8 ± 33.6	73.9 ± 18.4	6.4 ± 1.8	152.1 ± 87.2	14.8 ± 5.3	75.9 ± 13.2	53.3 ± 10.4

de germination étaient disposés d'une manière aléatoire dans le germoir (Conviron G-30) dans le but d'éliminer un positionnement qui pourrait modifier les résultats. Le bouleau jaune (*Betula lutea*) passait 21 jours dans le germoir puis le décompte était fait pour voir combien de graines avaient germé. Les tests pour l'épinette blanche (*Picea glauca*) étaient faits deux fois: une fois en passant 21 jours dans le germoir, comme le bouleau jaune et l'autre fois en passant 21 jours dans un réfrigérateur de 3 à 5°C pour ensuite être transféré dans le germoir puis y passer 21 jours. Cette étape est nécessaire pour casser la dormance des graines d'épinette blanche (International Seed Testing Association 1985).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Fonte en laboratoire

Les chimies de la neige naturelle et de la neige artificielle sont très différentes. On peut voir dans le tableau 2 la concentration de divers ions trouvés dans la neige naturelle, la neige artificielle et l'eau de fabrication de la neige artificielle. Dans l'eau de fabrication, les concentrations des ions Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- et SO_4^{2-} sont statistiquement différentes, dans un intervalle de confiance à 95%, de celles de la neige artificielle. Ceci pourrait être dû au phénomène de sublimation pendant le refroidissement de l'eau lors de la fabrication de la neige artificielle. On voit que la neige naturelle est moins concentrée en Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} que la neige artificielle. Puisque l'eau de fabrication de la neige artificielle provient d'une rivière dans une région boréale en hiver, il est naturelle de voir des plus faibles concentrations NO_3^- dans celle-ci que dans la neige naturelle. (Jones et Roberge, 1992)

La différence en concentration entre la neige naturelle et la neige artificielle est reflétée par les profils de fonte (figure 2). Lorsqu'on diminue l'échelle de concentration (figure 3) on voit que le profil de concentration des eaux de fonte de la neige naturelle ressemble à celui de la neige artificielle.

[Ca+2] en fonction du volume de fonte

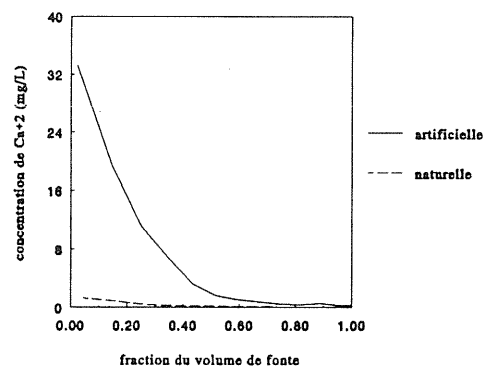


FIGURE 2. Concentration du calcium en fonction du volume de fonte des neiges

Les coefficients de lessivage pour le calcium et le sodium tels que calculés par SNOQUALD sont sensiblement les mêmes pour les deux types de neige (tableau 3). En appliquant le test de Student pour $n=2$ pour la neige naturelle et $n=4$ pour la neige artificielle, on trouve que ces k sont égales du point de vue statistique pour un intervalle de confiance de 99%. Nous considérons donc que la distribution des ions dans la neige artificielle est tout à fait semblable à celle de la neige naturelle, en normalisant toutefois, pour des concentrations différentes. Ces valeurs de k sont du même ordre de grandeur que d'autres valeurs de k trouvées dans des travaux précédents des Jones et Sochanski. La neige naturelle quoiqu'elle a été

TABLEAU 3. Coefficients de lessivage de Ca^{+2} et Na^{+} des fontes de neige

cation	valeurs des k moyens (mm^{-1})		
	neige naturelle (n=2)	neige artificielle (n=4)	k* (n=5)
Ca^{+2}	0.018±0.005	0.014±0.003	0.027±0.005
Na^{+}	0.014±0.003	0.022±0.002	0.023±0.004

k*=k pour neige naturelle des travaux Jones et Sochanska, 1987

échantillonnée dans un état frais dont les cristaux étaient de forme dendritique a subit 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.

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 des pentes de ski a principalement cette forme à la fin de l'hiver, c'est cette forme qui nous intéresse le plus. En connaissant la distribution relative des couverts formés de la neige artificielle et la neige naturelle, la profondeur du couvert et la physico-chimie des eaux de fabrication et la composition chimique de la neige naturelle, il sera donc possible de simuler les eaux de fonte sur une grande superficie de pistes comprenant des couvertures végétales différentes.

[Ca+2] en fonction du volume de fonte

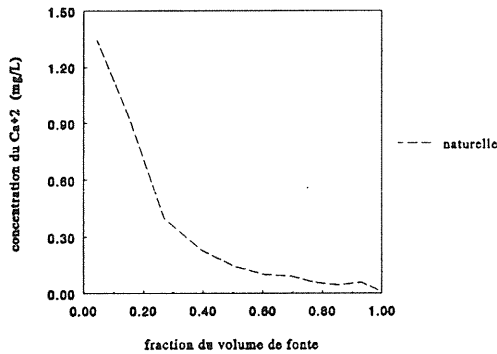


FIGURE 3. Concentration du calcium en fonction du volume de fonte de neige naturelle

TABLEAU 4: Moyenne des taux de germination

Espèces	n	Taux de germination (%)					
		NN(f)	NN	NA(f)	NA	T(f)	T
Bouleau jaune	8	48.00	50.88	49.00	47.38	49.50	50.13
Épinette blanche (stratifiée)	8	83.38	83.38	82.25	82.75	81.75	81.13
Épinette blanche (non-stratifiée)	8	77.25	78.63	79.38	78.00	77.38	77.13

NN=neige naturelle
NA=neige artificielle
T=témoin (eau autoclavée)
(f)=filtrée

Tests de germination

Une fois les tests de germination terminés et le décompte complété, une analyse de variance a été faite par SAS pour voir si les résultats obtenus étaient différents. Aucune différence statistique n'a été trouvée entre les six différentes sortes d'eau. On peut voir dans le tableau 4 que même en regardant simplement la moyenne aucune différence n'apparaît.

Puisqu'une haute salinité diminue habituellement le taux de germination (Weir et al 1982), on peut supposer que la salinité de la neige artificielle ne serait pas assez élevée pour affecter son taux de germination.

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 sont très semblables, donc elles se comportent de la même manière. On peut ainsi simuler la composition de la fonte de neige par des modèles déjà utilisés par la neige naturelle.

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 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.

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 annuels subséquentes aux fontes de neige peuvent être déterminantes dans la réussite des espèces à maintenir leurs présences dans le milieu. Nous poursuivront nos études afin de voir les effets des eaux de fonte de neige artificielle sur le processus physico-chimique des échanges sol-eaux de fonte et les croissances des espèces végétales en montagne.

BIBLIOGRAPHIE

BOUCHARD, J. (1989) ; Bilan technique du système d'enneigement artificiel du Mont-Sainte-Anne; Rapport interne ; 1-5.

DAVIES, T.D., P. BRIMBLECOMBE, M. TRANTER, S. TSIOURIS, C.E. VINCENT, P. ABRAHAM et L.L. BLACKWOOD (1987) ; Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology ; H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas ; D. Reidel Publishing Company ; Boston ; 337-391.

COLBECK, S.C.(1987) ; Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology ; H.G. Jones et W.J. Orville-Thomas ; D. Reidel Publishing Company ; Boston ; 1-35.

EISEL, L.M., K.M. Bradley, C.F. Leaf (1990) ; Estimated Runoff from Man-Made Snow; Water Resources Bulletin ; 26-3: 519-526.

INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (1985) ; Règles internationales pour les essais de semences ; Seed Sci. and Tech. ; 13: 440-451.

JOHANNESSEN, M. et A. HENRIKSEN ; Chemistry of Snowmelt : Changes in concentration during melting; Wat. Resources.Res. ; 14: 615.

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.

LAFEUILLE, J. (1988) ; La fabrication de la
neige ; Société Hydrotechnique de France
Section de glaciologie ; 1-10.

RICHARDSON, G.R. et F.B. SALISBURY
(1977) ; Plant Response to Light Penetrating
Snow ; Ecology ; 58: 1152-1158.

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.