

Record Number:

Author, Monographic: Jones, H. G.

Author Role:

Title, Monographic: La contribution du couvert de glace à l'évolution physico-chimique des eaux du lac Laflamme pendant la fonte printanière

Translated Title:

Reprint Status:

Edition:

Author, Subsidiary:

Author Role:

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau

Date of Publication: 1988

Original Publication Date: Mars 1988

Volume Identification:

Extent of Work: 21

Packaging Method: pages

Series Editor:

Series Editor Role:

Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche

Series Volume ID: 248

Location/URL:

ISBN: 2-89146-245-9

Notes: Rapport annuel 1987-1988

Abstract: Rapport rédigé pour Environnement Canada
10.00\$

Call Number: R000248

Keywords: rapport/ ok/ dl

**La contribution du couvert de glace à l'évolution physico-chimique
des eaux du lac Laflamme pendant la fonte printanière**

H.G. Jones

INRS-Eau

Institut national de la recherche scientifique

2700, rue Einstein - C.P. 7500

Ste-Foy (Québec) - G1V 4C7

Rapport scientifique No 248

Mars 1988

Résumé

La structure physique et la composition physico-chimique du couvert de glace au Lac Laflamme (Parc des Laurentides, Québec) a démontré la présence des zones de slush (mélange eau-glace/neige) d'acidité variable sur le couvert. L'origine de ces zones a été déterminée à partir des spectres chimiques. Les zones de slush dont l'origine est la précipitation sur le couvert ont un niveau d'acidité qui peut dépasser celui du lac. Ces zones, toutefois sont neutralisées par l'arrivée des eaux du lac sur le couvert par le processus de slushing. Ce processus est dû à la perméabilité de la glace quand la température du couvert approche le point de fusion. Dans certaines conditions météorologiques et hydrologiques, les zones de slush d'origine atmosphérique peuvent être drainées vers les eaux sous-jacentes. Ces dernières subissent une augmentation d'acidité; cette augmentation toutefois est minime et ne se mesure pas à l'acidité apportée par le ruissellement du bassin versant pendant la fonte printanière.

Introduction

Quoique le couvert de glace peut jouer des rôles prédominants dans l'évolution physico-chimique des eaux lacustres en saison de fonte, les études spécifiques de ces rôles sont rarement effectuées pendant des programmes de recherche limnologiques (Adams, 1986). Ces rôles sont de deux types. Les premiers encadrent les effets du couvert de glace sur l'écoulement des apports du bassin versant pendant la fonte printanière. Les contraintes exercées par la présence physique de la glace, la température des apports et l'absence de turbulence du au vent donnent lieu à des écoulements laminaires et discrètes des eaux

sous-jacentes du couvert (Bergmann and Welch, 1985). Ceci a une importance particulière en ce qui concerne le degré d'exposition à l'acidité que les frayères de poissons peuvent subir pendant l'arrivée des eaux hautement acidifiées dans le lac (Gunn and Keller, 1986). Le deuxième rôle du couvert de glace est sa contribution directe en polluants acidiqes aux eaux du lac pendant la fonte. Pendant l'hiver le couvert agit comme un accumulateur de polluants atmosphériques par les précipitations humides et les dépôts secs. Ceci peut s'avérer plus ou moins important selon la grandeur relative du bassin versant et la superficie du lac, et l'acidité des eaux de ruissellement pendant la fonte. Le lac Laflamme, le bassin jaugé de l'Environnement Canada, Région du Québec est un petit lac de tête dont les apports de la fonte printanière sont acidifiés. L'évolution physico-chimique du couvert de glace de ce lac et sa contribution en polluants acides aux eaux de printemps ont jamais été un sujet d'étude spécifique dans le programme du lac Laflamme depuis le commencement des travaux en 1980-1981. Dans la discussion ci-dessous nous examinerons le peu de données disponibles sur le comportement du couvert avant et pendant la fonte printanière (1983-1988). Nous aborderons ensuite une discussion sur les scénarios des conditions météorologiques qui pourraient augmenter ou diminuer la contribution du couvert de glace à l'acidité des eaux du lac au printemps.

Description du site d'étude

Le bassin du lac Laflamme (figure 1) est situé dans le parc des Laurentides 80 km au Nord de Québec (47°19'N, 71°07'0). La région se caractérise par une zone forestière de sapinière à bouleau blanc sur une roche mère de gneiss charnokitique précambrien de la province de Grenville. La température moyenne annuelle est de 0,2°C (température minimale moyenne, janvier: -15°C;

température maximale moyenne, juillet: 15°C). La période moyenne sans gel est courte (40 jours). Les vents dominants soufflent dans la direction ouest-est et les précipitations annuelles moyennes enregistrées depuis 1966 sont environ de 1 400 mm dont 34% en neige (Bernier et al., 1983; Plamondon, 1981). Les versants du bassin ont une pente médiane de 8,7% (minimum 0%, maximum 30%).

Le réseau de drainage du lac est peu développé; les nombreux petits ruisseaux qui alimentent la cuvette lacustre ont un régime intermittent sauf le ruisseau principal qui semble maintenir un écoulement permanent quoique peu perceptible en périodes de bas débit. La contribution de l'eau souterraine au débit global du lac est dominante durant la plus grande partie de l'année alors que le ruissellement de surface a une importance particulière en période de fonte printanière (Roberge, 1987).

La superficie du bassin versant est de 0,684 km² et celle du lac est de 0,061 km². La profondeur moyenne du lac se situe à 2,05 m et la profondeur maximale atteint une valeur de 5,3 m. Le volume du lac est de 125 x 10³m³. Le lac se décharge via un ruisseau quoiqu'il y a un autre écoulement hors bassin par la voie souterraine (≈ 7% de l'écoulement annuel). Le débit à l'exutoire du lac varie de 0,001 m³s⁻¹ à 0,198 m³s⁻¹ (Papineau, 1987). Le lac est couvert de glace de mi-novembre à mi-mai.

Méthodologie

La structure physique ou composition physico-chimique du couvert de glace n'ont jamais fait partie d'une étude spéciale ou régulière du lac Laflamme. Les observations sur la structure de la glace ont été prises pendant le forage des

trous pour le prélèvement des eaux sous-jacente à la glace en 1983, 1984, 1985 et 1988. Les dimensions des trous ont varié de 20 cm (foreuse mécanique) à 12,5 cm (foreuse manuelle). Les échantillons de glace blanche ou de "slush" (mélange d'eau et de neige) du couvert pour les analyses chimiques ont été prises d'une façon irrégulière pendant des périodes de pluie ou d'infiltration des eaux du lac à travers le couvert ("slushing", Adams et Allen, 1987). Les détails sur la préservation et les analyses des échantillons sont rapportés dans Jones et al. (1986).

Nous reproduirons aussi des données sur la glace du lac Laflamme prises pendant les travaux de Jones et al. (1984). Enfin, pour les discussions théoriques sur la contribution relative du couvert de glace en polluants acidiques aux eaux du lac nous ferons surtout appel aux travaux de Adams et Allen (1987), Papineau (1987) et les travaux antérieurs de Jones et al. (1984, 1985, 1986) au lac Laflamme et Jones et Ouellet (1983a, b) au lac Matamek, Québec.

Résultats et discussion

La figure 1 démontre l'évolution physique et physicochimique du couvert de glace au Lac Laflamme pour l'hiver-printemps 1983, 1984, 1985 et 1988. Quoiqu'il y ait peu de données sur la nature physique de la glace en continu, le schéma nous a permis de distinguer les caractéristiques grossières de structure et les diverses étapes dans l'évolution du couvert.

En ce qui concerne les caractéristiques physiques, il n'y a que très peu de glace noire dans le couvert du Lac Laflamme. Même pendant les périodes les plus froides de l'année, l'épaisseur de cette glace ne dépasse pas 20 cm (5-20% du couvert à l'épaisseur maximale). La majeure partie du couvert se compose de

la glace blanche, y compris la slush, et parfois un manteau nival; ce dernier toutefois n'atteint des hauteurs rapprochant celles du couvert de neige forestier que sur les rives du lac. La distinction entre slush et glace blanche est souvent difficile à apercevoir surtout quand il y a mélange de strates de slush et de strates de glace blanche pendant le forage de glace. La structure physique du couvert est très similaire à d'autres lacs forestiers des régions du sud de l'Ontario et du Québec (ex.: Plastic Lake, Ontario, Allen, 1986; Adams, 1986). Les lacs des régions plus au Nord dans les régions de transition boréal-subarctique, subarctiques et arctiques se couvrent en hiver avec la glace ayant des pourcentages de glace noire plus élevée. Comme exemple, Knob Lake, Québec, la glace noire varie de 60% (60-80 cm) en période d'épaisseur maximale (1-1.3 m) d'un hiver neigeux à 95% (90-120 cm) pendant un hiver peu neigeux (Adams, 1986).

En effet, la précipitation (neige et pluie) joue un rôle dominant dans l'évolution physique et physico-chimique du couvert. Au Lac Laflamme, le couvert se forme vers la mi-novembre, la première couche est généralement de glace noire quoiqu'un mélange de neige avec eaux de surface et gel rapide peut donner lieu à une première couche de glace blanche. Par la suite, il y a accumulation de neige sur la glace noire en périodes froides. Pendant les périodes plus clémentes, les événements de pluie et de fonte de neige provoquant la formation de slush qui regel pour former la glace blanche. Il y a, toutefois, un autre processus majeur de formation de glace blanche, c'est à dire le "slushing" de la partie supérieure du couvert de glace par les eaux de surface du lac (Adams, 1986). Sous l'influence du poids de la neige et/ou de la glace blanche et suite à la fracture du couvert due au gradient thermique, les eaux du lac peuvent remonter à la surface du couvert. Selon la nature du

couvert et le niveau de pénétration atteint, ces eaux peuvent regeler pour former la glace blanche ou rester dans la neige et glace blanche en état de slush. Plusieurs zones, soit spatiales soit verticales, peuvent donc exister dans le couvert a diverses périodes de son évolution (Jones et Ouellet, 1983 a, b).

Cet envahissement de la surface de la glace par les eaux du lac peut parfois apporter beaucoup d'eau dans le couvert (exemple: 52 cm slush, 13.03.85, 55 cm slush, 21.03.88). Pour évaluer la contribution relative de la précipitation et les eaux du lac à la glace blanche et la slush, il suffit de comparer les spectres chimiques de la glace et la slush à ceux de la précipitation et eaux du lac (Jones et Ouellet, 1983b). Dans le cas de la glace blanche, les spectres chimiques sont généralement difficile à interpréter étant donné l'exosolution des ions pendant le regel et la faible teneur en ions de la glace. Divers paramètres géochimiques notamment le pH, Ca^{2+} , Si et Al peuvent être utilisés plus facilement pour distinguer les origines des zones de slush. Le pH, toutefois, n'est pas un paramètre fiable en période de fonte printanière quand des apports acides du bassin versant coulent sous la glace. Le tableau 1 reproduit des caractéristiques physico-chimiques de quelques échantillons de slush prises sur le couvert du Lac Laflamme et leurs provenances selon les spectres physico-chimiques.

Le 29.03.83 la slush du lac avait comme origine la pluie (39.1 mm) déposée sur le couvert les 19.03 et 20.03. Cette couche a été isolée de l'atmosphère par des chutes de neige le 22.03 et 28.03. La slush n'a donc pas regelé et a gardé presque'intégralement sa composition originale. Dans la même façon la slush du 17.04.1984 représente la pluie (14.3 mm) déposée sur le couvert le 16.04 et

17.04. Par contre, la slush du 24.04.84 aurait cherché sa teneur en ions à partir d'un mélange des eaux du lac et de la précipitation.

Le tableau 2 reproduit la quantité totale d'acidité dans le couvert de glace et dans les eaux du lac pour les dates citées ci-dessus. Les valeurs d'acidité dans le couvert de glace sont approximatives car les contributions relatives de l'eau et de la glace au mélange de la slush ne sont pas connues avec certitude. On doit, toutefois, noter que les couverts comprenant des zones de slush en provenance de pluie et/ou fonte de neige contiennent plus ou presque autant d'acidité que les eaux sous-jacentes au couvert. Afin d'évaluer dans quelle mesure ces zones d'acidité élevée dans le couvert pourraient influencer l'acidité des eaux sous-jacentes, il faudrait évaluer la perméabilité du couvert aux zones de slush avant et pendant la fonte printanière.

Selon Adams et Allen (1987) la formation de la glace blanche suite à la fracture de la glace noire et la remontée des eaux du lac, est suivi par la fermeture de la glace noire et la reconsolidation du couvert. Le couvert de glace deviendrait ainsi imperméable. Toutefois, Browman (1974) a rapporté une série d'expériences sur le couvert de glace de Holland Lake, Montana qui ont démontré que la glace noire est perméable à l'eau quand la température de la glace se lève au-dessus de -1°C . Cette perméabilité est le résultat de la formation des micropores et des microcanaux à cette température. La perméabilité augmente considérablement quand la température de la glace noire s'approche le point de fusion. Jones et Ouellet (1983, a) ont relié la stratification des concentrations ioniques dans la glace du lac Matamek, Québec à ce phénomène de microcanaux dans la glace noire. Adams (1986) a aussi invoqué la présence des microcanaux dans la glace pour expliquer la

perméabilité de cette dernière aux apports de pluie. Allen (1986) a démontré la perméabilité du couvert de glace de Plastic Lake, Ontario, par l'utilisation d'une teinture pour suivre le transfert d'eau à travers la glace. Ainsi, la glace noire non-fracturée peut permettre le transfert des eaux en autant que la température de la glace s'approche à 0°C. Si la glace noire se trouve en contact avec une couche de slush pour une période assez longue, un faible gradient de température autour de 0°C se forme entre les eaux du lac et la slush. Il y aura donc transfert d'eau entre les deux. En période de niveau hydrostatique positif, les eaux du lac remonteraient sur la glace. La réserve d'alcalinité dans les eaux du lac sont assez importantes (Papineau, 1987) pour que ce processus résulte en la neutralisation de la grande partie de l'acidité dans la slush du couvert (exemple Tableau 1, 24.04.1984 et 21.03.1988). Par contre, en périodes de niveau hydrostatique négatif, la fonte de neige ou la pluie déposée sur le couvert seront acheminées vers les eaux sous-jacentes. Ceci se produit pendant la fonte printanière quand le couvert de glace se détache des rives et flotte légèrement à la dérive sur les eaux (Figure 2, mai 1983 et 1984). Il y a, toutefois, des périodes avant la fonte et la débâcle quand le niveau hydrostatique fluctue entre des valeurs positives et négatives (Adams et Allan, 1987). La figure 3 reproduit des conditions dans lesquelles le niveau hydrostatique du couvert de glace peut changer de positif à négatif et ainsi favoriser la perméation des zones de slush de surface vers les eaux sous-jacentes. Le scénario comprend un gradient de température assez prononcé entre les eaux du lac et l'atmosphère en période froide suivi par une période chaude ou pluvieuse. Après la formation de slush, il y a la transformation du déficit thermique dans la glace noire (Figure 3b) en une croissance de glace noire (figure 3c). Le couvert cherche, donc, à se lever, le niveau

hydrostatique diminue et les eaux de slush passent à travers la glace noire qui se trouve à 0°C.

Avec le peu de données disponibles sur l'évolution et la dynamique du couvert de glace au Lac Laflamme ce genre de scénario est spéculatif. On ne trouve pas, d'ailleurs, dans la littérature des travaux spécifiques sur la recherche de ce phénomène. Toutefois, un examen des données de l'évolution de l'acidité des eaux de surface et les conditions météorologiques et hydrologiques au Lac Laflamme, 1983, apporte des indices que ce phénomène pourrait se manifester indirectement. La figure 4 reproduit à la fois la concentration des H⁺ dans les eaux sous-jacentes à la glace au centre du lac, le volume journalier de la fonte de neige, et le débit à la décharge du lac mars-mai 1983. Après le 18.04 quand les apports de ruissellement du bassin ont commencé à influencer le lac, il est difficile de discriminer entre l'effet de pénétration de slush dans le lac et les apports de ruissellement sur l'acidité des eaux sous-jacentes à la glace. Avant le 18.04, toutefois, les apports hydrologiques (ruisseau principal) ont été relativement stables (sauf pour le 20.03) et leurs concentrations en H⁺ n'ont jamais dépasser le seuil de 0,8 µeq L⁻¹.

Les 19.03 et 20.03 un événement de pluie (39.1 mm) inonde le lac et la concentration de H⁺ des eaux sous-jacentes le 22.03 est de 1.51 µeq L⁻¹. Par la suite, il y avait une période très froide et l'acidité des eaux sous-jacentes a baissé (0.81 µeq L⁻¹). Le 6, 7 et 8.04 une fonte se produit avec un peu de pluie et l'acidité des eaux sous-jacentes remonte à 1.55 µeq L⁻¹. L'acidité des eaux ensuite diminue (14 et 16.04) avant le commencement de la fonte en continu les 17-18.04. Hors des considérations méthodologiques (Jones, 1988), il semble donc que cette dernière remontée de l'acidité des eaux

sous-jacentes à la glace (8.04) avant la fonte printanière majeure soit une manifestation du transfert de slush à travers la glace. L'acidité de ces eaux a augmenté ($1.55 \mu\text{eq L}^{-1}$) tandis que les eaux plus profondes ont maintenu un niveau d'acidité au-dessous de $0.8 \mu\text{q L}^{-1}$ (Jones et al., 1984).

Le faible niveau d'acidité de ces eaux sous-jacentes indique, toutefois, que le pouvoir de neutralisation de ce genre d'apports d'acidité par les eaux du lac est grand; au moins au centre du lac. Ces apports pourraient avoir une influence beaucoup plus grande sur l'acidité des eaux proches des rives où les eaux sous-jacentes sont peu profondes et l'accumulation de la neige élevée.

Conclusion

L'origine des zones de slush sur le couvert au Lac Laflamme démontre que l'acidité des zones dû aux dépôts de précipitations sur le lac est très élevée. Cette acidité, toutefois, est neutralisée dans le couvert par la remontée des eaux sous-jacentes à la glace pendant le processus de "slushing". Ce processus est le résultat de la perméabilité de la glace quand la température est entre -1°C et 0°C et le niveau hydrostatique est positif. Dans certaines conditions météorologiques et hydrologiques, les zones d'acidité peuvent aussi pénétrer au niveau des eaux sous-jacentes à la glace avant la fonte majeure. Ces dernières subissent, donc, une augmentation d'acidité. Celle-ci, toutefois, est minime étant donné la capacité de neutralisation des eaux du lac à ce temps-ci de l'année.

Références

- Adams, W.P. (1986). Illustrations of effects of ice in the distribution of major ions in lakes. Proceedings of the Eastern Snow Conference, 43th Annual Meeting, Hanover, NH, June 5-6, 233-236.
- Adams, W.P. and Allen, C. (1987). Aspects of the chemistry of ice, notably snow, on lakes. In: Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. Eds. H.G. Jones and W.J. Orville-Thomas. D. Reidel Publishing Company. NATO-ASI Series V, 211: 393-466.
- Allen, C. (1986). Spatial distribution of meltwater in an ice covered lake. Proceedings of the Eastern Snow Conference, 43th Annual Meeting, Hanover, NH, June 5-6, 228-232.
- Bergmann, M.A. et Welch, H.E. (1985). Spring meltwater mixing in Small Arctic Lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42: 1789-1798.
- Bernier, P., Padilla, F., Dessureault, M., Gélinas, P.J., Azzaria, L.M. et Goulet, S. (1983). Étude hydrogéologique et hydrogéographique du bassin versant du lac Laflamme en 1982. Rapport préparé pour Environnement Canada, Département de géologie, Université Laval, Québec, 238 p.
- Browman, L.G. (1974). Channels in ice. In: Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice resources. Proceedings of an interdisciplinary symposium, Monterey, California, December 2-6, 1973, pp. 224-234.

Gunn, J.M. et Keller, W. (1986). Effects of acidic meltwater on chemical conditions at nearshore spanning sites. *Water Air and Soil Pollution*, 31: 545-552.

Jones, H.G. (1988). L'échantillonnage des eaux lacustres sous couvert de glace: la représentativité des résultats et la nécessité de développer une méthodologie fiable. INRS-Eau, rapport scientifique No 249, 16 pages. Pour la direction des Eaux intérieures, Environnement Canada, Région de Québec.

Jones, H.G., Sochanska, W., Charette, J.Y. et Stein, J. (1986). Aspect qualitatif du développement au bassin du lac Laflamme d'un modèle d'impact des précipitations acides - Phase de la fonte printanière de 1985. INRS-Eau pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région de Québec, 142 p.

Jones, H.G., Sochanska, W., Charette, J.Y. et Stein, J. (1985). Aspect qualitatif du développement au bassin du Lac Laflamme d'un modèle prédictif de l'impact des précipitations acides - phase de la fonte printanière de 1984, Québec, INRS-Eau, RS 182. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région de Québec, 96 p.

Jones, H.G., Sochanska, W., Gauthier, J.M., Bougie, R. et Charette, J.Y. (1984). Développement d'une méthodologie d'étude sur les facteurs contrôlant la qualité des eaux de fonte et des eaux de ruissellement printanier au lac Laflamme, Québec. INRS, rapport scientifique No 165, 145 p., 7 annexes. Pour la Direction des eaux intérieures, Environnement Canada, Région du Québec.

Jones, H.G. and Ouellet, M. (1983a). Mécanisme de translocation de matière chimique et microbiologique dans la couverture de glace de quelques lacs. Eau du Québec, 16(1): 71-80.

Jones, H.G. and Ouellet, M. (1983b). Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques de la couverture de glace de quelques lacs. Eau du Québec, 16(2): 174-181.

Papineau, M. (1987). Effects of acid precipitation on a boreal forest-ecosystem ion budgets and changes in water chemistry for the Laflamme Lake watershed. Environment Canada, Conservation and Protection, Inland Waters and Lands Branch, Quebec region, 108 p., 1 annexe, 1p.

Plamondon, A.P., 1981. Étude hydrologique du bassin du Lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec, en relation avec le programme d'étude d'impact des pluies acides sur l'environnement forestier. Rapport effectué pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région de Québec, 239 p.

Roberge, J. (1987). Hydrologie de la fonte nivale dans un environnement forestier boréal. Thèse de doctorat, Faculté de foresterie, Université Laval, 81 p.

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques et provenance des zones de slush dans le couvert de glace, lac Laflamme 1983, 1984 et 1988.

Date	H ⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Provenance
29.03.83	95,5*	--	39	109,6	Pluie (≈ 100%)
17.04.83	22,39	--	--	--	Pluie (≈100%)
30.01.84**	1,0	--	3,3	10,2	Pluie (?), eaux du lac (?)
24.04.84	4,17	4,9	7,2	4,9	Pluie (87%), eaux du lac (13%)
21.03.88	1,41	--	24,5	101,4	Pluie (?), eaux du lac (?)

* Toutes les concentrations en $\mu\text{eq L}^{-1}$.

** Glace blanche seulement.

Tableau 2: Répartition d'acidité, eq, entre les eaux lacustres et le couvert de glace, lac Laflamme 1983-1985 et 1988.

Date	Acidité totale dans la cuvette lacustre	Acidité dans les eaux du lac*	Acidité dans le couvert de glace**
29.03.83	384,7	66,7 (17)***	318,3 (83)
17.03.83	219,1	126,2 (58)	93,1 (42)
30.01.84	81,4	33,4 (41)	48,2 (59)
24.04.84	171,3	126,0 (74)	45,3 (26)
21.03.88	89,7	67,7 (75)	22,7 (25)

* Calculé à partir des profils physico-chimiques sauf 30.01.84 et 21.03.88, estimé à partir de la colonne d'eau.

** En assumant slush = Eau (50%), glace-neige (50%).

*** %

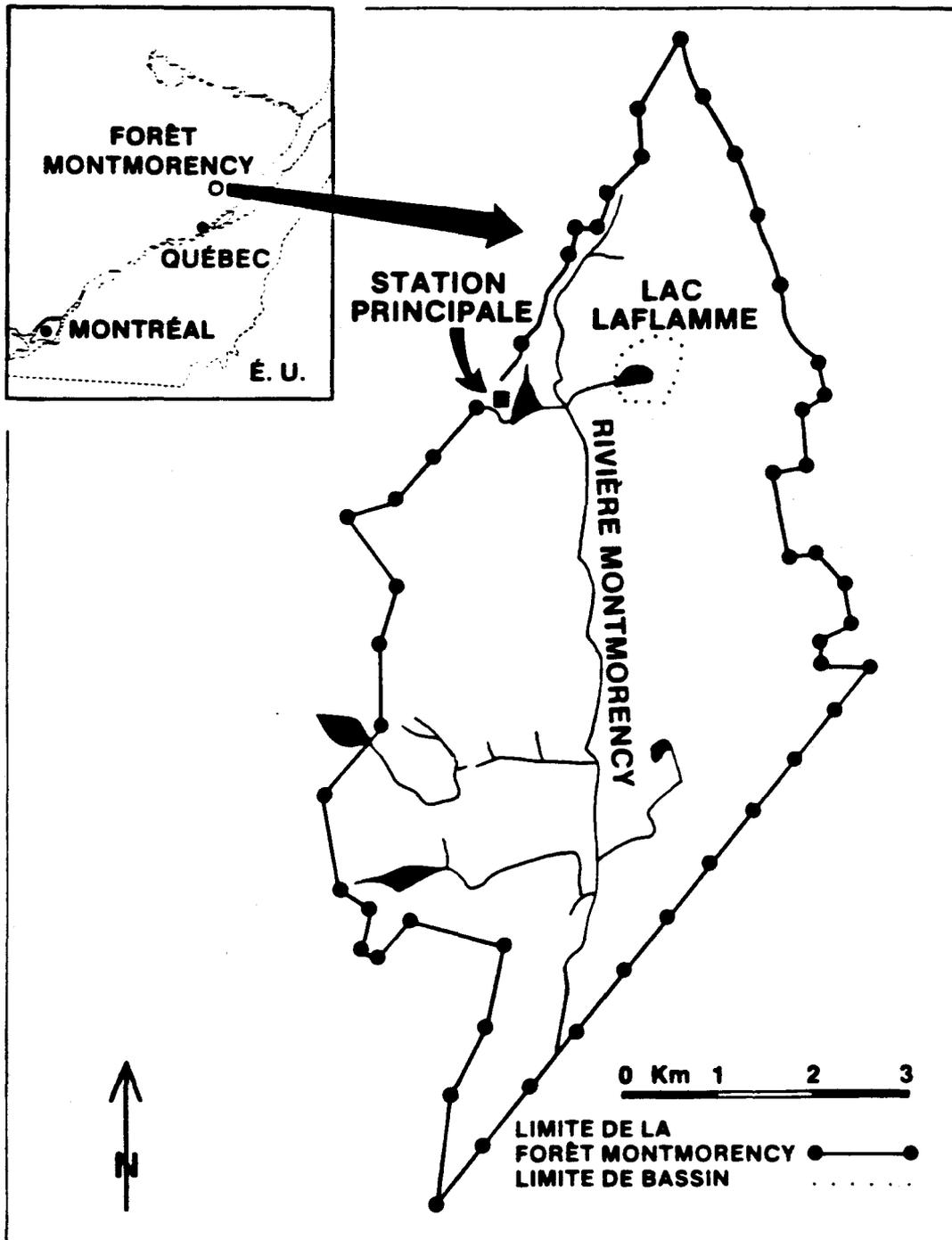


FIGURE 1. Localisation de la Forêt Montmorency

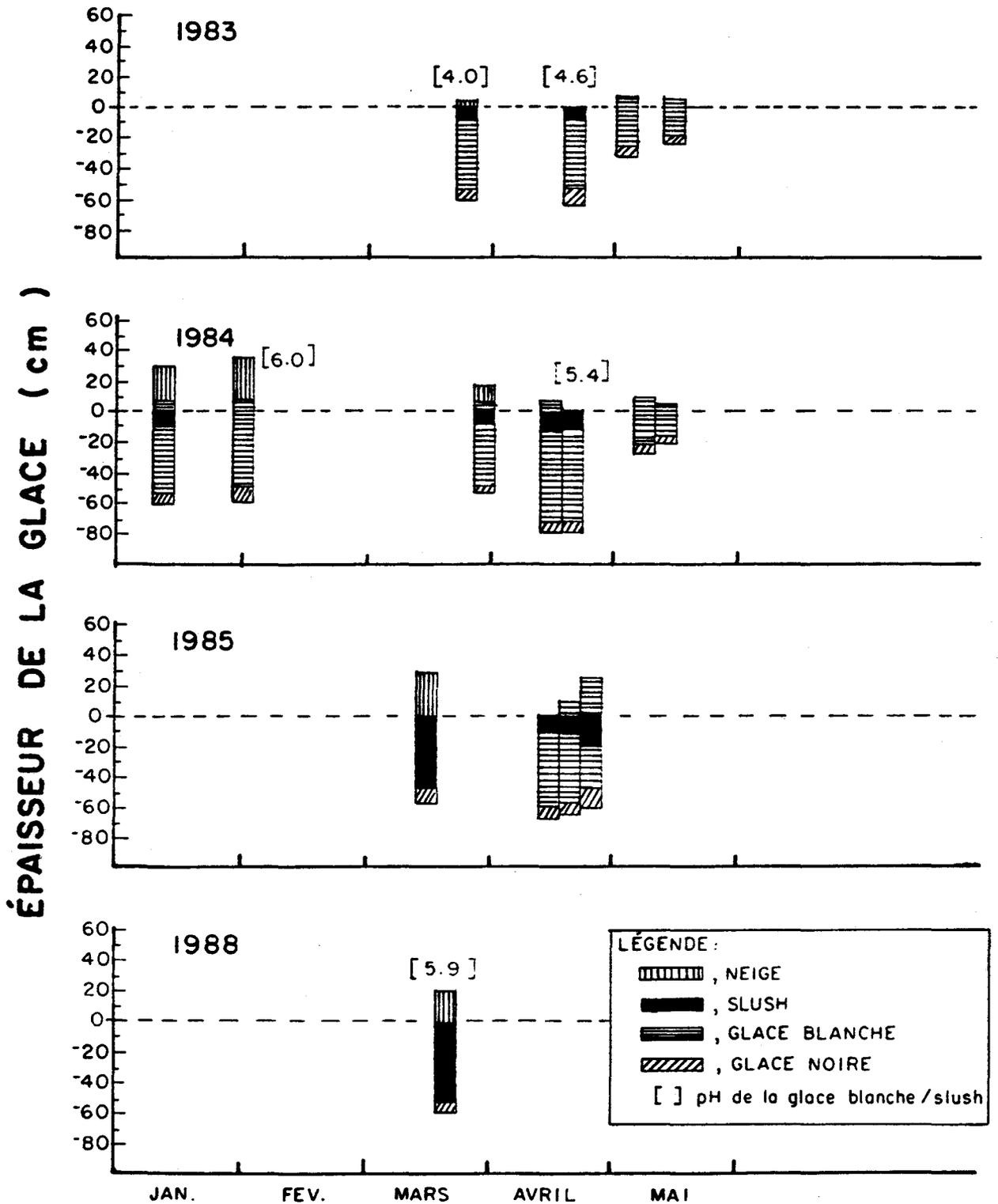


Figure 2: pH des eaux sus-jacentes et structure physique du couvert de glace, Lac Laflamme, 1983-1985 et 1988.

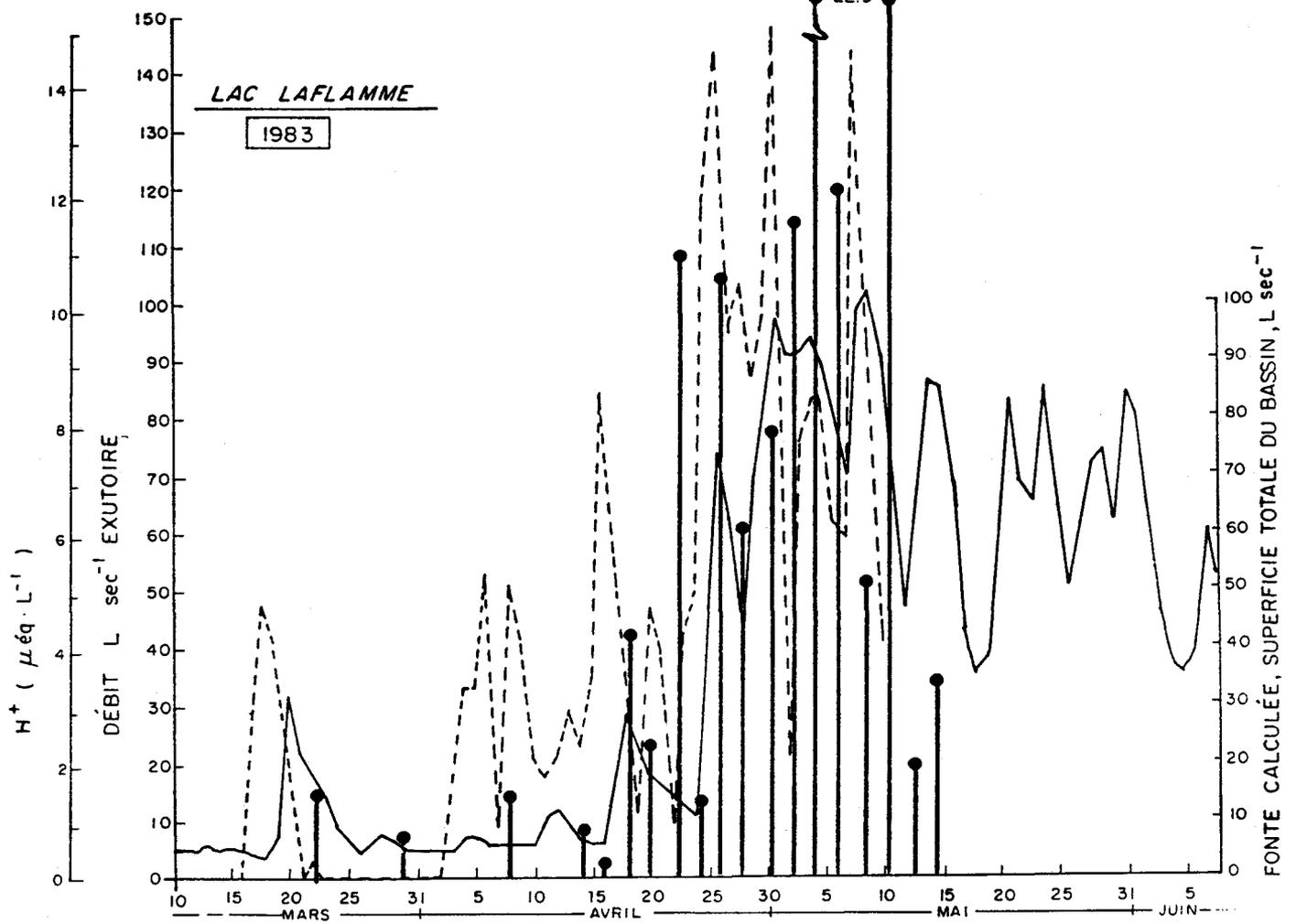


Figure 4: Concentration de H^+ (•) dans les eaux sous-jacentes à la glace, fonte de neige calculée (---) et débit à la décharge du lac (-), Lac Laflamme, 1983.