

**Record Number:****Author, Monographic:** Jones, H. G.//Charette, J. Y.//Leclerc, M.//Nantel, A.//Roberge, J.  
Boudreault, P.**Author Role:****Title, Monographic:** Acidification épisodique des eaux du lac Laflamme : synthèse des  
données physico-chimiques et hydrologiques des fontes printanières 1983-1985**Translated Title:****Reprint Status:****Edition:****Author, Subsidiary:****Author Role:****Place of Publication:** Québec**Publisher Name:** INRS-Eau**Date of Publication:** 1987**Original Publication Date:** Décembre 1987**Volume Identification:****Extent of Work:** 42**Packaging Method:** pages**Series Editor:****Series Editor Role:****Series Title:** INRS-Eau, Rapport de recherche**Series Volume ID:** 246**Location/URL:****ISBN:** 2-89146-243-2**Notes:** Rapport annuel 1987-1988**Abstract:** Rapport rédigé pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures,  
région du Québec  
10.00\$**Call Number:** R000246**Keywords:** rapport/ ok/ dl

Rapport technique

Version finale

Acidification épisodique des eaux du  
lac Laflamme: synthèse des données  
physico-chimiques et hydrologiques des  
fontes printanières 1983-1985

H.G. Jones<sup>1</sup>

J.Y. Charette<sup>2</sup>

M. Leclerc<sup>1</sup>

A. Nantel<sup>1</sup>

J. Roberge<sup>1</sup>

P. Boudreault<sup>1</sup>

Rapport scientifique no. 246

<sup>1</sup> INRS-Eau, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7

<sup>2</sup> Direction des eaux intérieures, Environnement Canada, Région du Québec,  
Sainte-Foy (Québec)

Décembre 1987

Rapport technique

Version finale

Acidification épisodique des eaux du  
lac Laflamme: synthèse des données  
physico-chimiques et hydrologiques des  
fontes printanières 1983-1985

H.G. Jones<sup>1</sup>

J.Y. Charette<sup>2</sup>

M. Leclerc<sup>1</sup>

A. Nantel<sup>1</sup>

J. Roberge<sup>1</sup>

P. Boudreault<sup>1</sup>

Rapport scientifique no. 246

<sup>1</sup> INRS-Eau, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7

<sup>2</sup> Direction des eaux intérieures, Environnement Canada, Région du Québec,  
Sainte-Foy (Québec)

Décembre 1987

## TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
Résumé .....	ii
Abstract .....	iii
1. Introduction .....	1
2. Objectifs .....	3
2.1 Objectif global du programme du Lac Laflamme .....	3
2.2 Objectif spécifique de l'étude la fonte au Lac Laflamme, 1988 .....	3
2.3 Pertinence du travail de synthèse aux objectifs spécifiques de la fonte de 1988 .....	4
3. Description du site d'étude .....	6
4. Méthodologie .....	7
4.1 Compilation de la Banque de données hydrologiques .....	7
4.2 Traitement des données hydrologiques .....	7
4.3 Modèle hydraulique des écoulements des eaux lacustres .....	10
4.4 Compilation de la Banque de données physico-chimique .....	14
4.5 Traitement des données physico-chimiques .....	14
4.6 Calculs des données physico-chimiques .....	15
5. Résultats et Discussions .....	20
5.1 La campagne de 1983 .....	20
5.2 La campagne de 1984 .....	25
5.3 La campagne de 1985 .....	26
6. Conclusions et recommandations pour la campagne de fonte de 1988 .....	29
6.1 Conclusions globales .....	29
6.2 Recommandations spécifiques .....	30
7. Références .....	32
8. Annexes	

## RÉSUMÉ

La synthèse des données hydro-géochimiques des eaux de précipitation, de fonte de neige, d'écoulement de surface et souterrain, et des eaux lacustres pendant la fonte de neige 1983, 1984 et 1985 a montré qu'il existe une ambiguïté dans l'interprétation des données. Les concentrations des ions majeurs mesurés dans des échantillons des eaux superficielles du lac sont apparues inconciliables avec les concentrations théoriques de ces eaux calculées à partir des intrants du bassin lacustre pendant la période de fonte.

Nous croyons que la méthodologie de prélèvement des eaux sous-jacentes au couvert de glace a pu influencer les caractéristiques physico-chimiques de celles-ci et peut être responsable des écarts entre les concentrations théoriques et mesurées. Il en résulte que l'évolution physico-chimique apparente des eaux sous la couverture de glace pendant la fonte de 1983-1985 pourrait être biaisée. Nous recommandons donc que la campagne de mesure des eaux lacustres de 1988 soit revue; qu'on accorde priorité à la méthodologie d'échantillonnage des eaux sous la glace dans des zones riveraines de 1988. La méthode d'échantillonnage devrait tenir compte de l'évolution physique et physico-chimique du couvert de glace et des techniques fiables de prélèvements des eaux sous-jacentes à ce couvert pendant la fonte.

## ABSTRACT

A synthesis of hydrological and chemical data for precipitation, snow meltwaters, surface waters, subsurface waters, groundwaters at the Lac Laflamme watershed, and lake waters during the spring melts of 1983, 1984 and 1985 showed that an ambiguity can result from the analysis of the data by different methods. This is reflected in the fact that the concentrations of major ions measured in the waters underneath the ice cover cannot be reconciled with the calculated ionic concentrations for these waters derived from lake inputs during the melt.

It is suggested that the methodology used to sample the waters under the ice cover i.e. the boring of holes in the ice, is responsible for the bias in the major ion concentrations during the melt of 1983 and 1985. It is recommended that the lake sampling programme for 1988 be revised and that the priority be given to the choice of the sampling technique for the inshore area. The technique should be compatible with the physical and chemical evolution of the ice cover during the melt and with the necessity for assuring a non-biased sampling method for the under-ice waters.

## 1. INTRODUCTION

Le réchauffement printanier des écosystèmes nordiques et alpins donne lieu à la fonte de neige. Selon l'évolution de l'ablation du couvert nival, la fonte peut se transformer en un, ou plusieurs épisodes de flux hydrologiques (Marmorek et al., 1986). Ces flux de surface, consistent en des eaux ayant les caractéristiques physico-chimiques particulières de la saison printanière (Seip, 1980). Les spectres chimiques des eaux à cette période sont le résultat de diverses voies d'acheminement et du temps de résidence des écoulements dans le sol et les assis géologiques. Quoique le défi de modeler ces caractéristiques physiques et physico-chimiques des eaux de surface est d'envergure (Wheater et al., 1986), plusieurs modèles ont été développés depuis dix ans. Ces modèles ont été structurés pour simuler surtout la qualité hydrochimique ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) des pulses acides printaniers (ex.: Christopherson et al., 1982, Rusted et al., 1986). Les pulses sont le résultat d'un flux des eaux de fonte, de forte ou de faible importance. Le flux de faible débit de la première fonte du printemps est concentré en composants acides (Johannessen et Henricksen, 1978). Le flux de fort débit de la fonte massive par contre, apporte des eaux beaucoup plus diluées (Jones et al., 1984). Ces dernières eaux ont un temps de résidence court dans le sol. Les modèles hydrogéochimiques de flux de surface s'appliquent surtout à ce type de ruissellement.

Dans le cas des lacs il n'existe présentement aucun modèle pour simuler l'arrivée et la progression des pulses acides en provenance de la fonte printanière dans les écosystèmes lacustres. Les modèles d'acidification des lacs à long terme (Wright, 1983) ne peuvent pas répondre aux exigences de résolution spatiale et temporelle requises par un modèle conceptuel du comportement des lacs au printemps. Même les modèles de simulation des flux hydrologiques printaniers dans les bassins versants ne considèrent les lacs que comme des "boîtes noires" (Booty et Kramer, 1984). Le modèle de ILWAS (Chen et al., 1979), toutefois, destructure le lac en strates pour la simulation d'écoulement hydrologique mais ne tient pas compte de tous les apports donnant naissance aux pulses printaniers. En effet, les origines des eaux printanières dans le bassin lacustre sont multiples. La fonte des congères riveraines (Charette et al., 1984), le ruissellement hypodermique (Roberge, 1987), la

résurgence des eaux souterraines à travers le lit du lac (Azzaria et al., 1983) et la fonte du couvert de glace (Adams et Allen, 1987), peuvent tous contribuer à propager des flux d'acidité dans le système.

Dans le cas du Lac Laflamme, Québec, l'évolution du couvert de glace et les caractéristiques hydrauliques et bathymétriques du bassin jouent des rôles déterminants dans la diffusion d'acidité dans les eaux du lac. Ceux-ci déterminent, donc, le degré d'exposition des organismes à l'écoulement acide au printemps (ex.: zone de frayère, Gunn et Keller, 1986). Depuis 1983, INRS-Eau et la Direction des eaux intérieures, Environnement Canada, région de Québec, étudient les caractéristiques hydrogéochimiques des eaux de fonte de ruissellement et lacustres au Lac Laflamme. Les travaux décrits ci-dessous visent à faire ressortir les faits saillants des campagnes de 1983, 1984 et 1985 et ceci dans une perspective de synthèse des connaissances acquises pendant cette période.

## 2. OBJECTIFS DES ÉTUDES DU LAC LAFLAMME

### 2.1 Objectif global du programme du lac Laflamme

L'objectif ultime des travaux au Lac Laflamme d'ici 1990, est de développer un modèle de la progression du(des) pulse(s) acide(s) à travers le bassin versant pendant la fonte printannière. Le modèle développé doit pouvoir simuler les caractéristiques spatiales et temporelles des pulses dans les lacs sous le couvert de glace. Ce modèle est surtout physique, c'est-à-dire basé sur les processus. Il est structuré à partir des deux sous-modèles; un modèle prédictif de la qualité des eaux de fonte (SNOQUAL1; Stein et al., 1986; Jones et al., 1986) et un modèle de la qualité des eaux de ruissellement (Jones et Bédard, 1987; Bédard et Jones, 1986) qui est en voie de développement.

### 2.2 Objectif spécifique de la fonte au lac Laflamme, 1988

La campagne d'échantillonnage de la fonte de 1988 constitue une étape importante du développement du modèle prédictif. La méthodologie d'échantillonnage devra permettre:

- i) Identifier les origines des eaux acidifiées (intrants) dans les zones critiques des lacs (sites de fraie).
- ii) Suivre l'évolution spatiale et temporelle des pulses d'acidité dans ces zones
- iii) Intégrer ces données dans un modèle hydraulique d'écoulement printanier dont, d'une part, le pas de temps de simulation est compatible avec la fréquence de la collecte des échantillons et, d'autre part, la précision de discrimination spatiale reflète les dimensions relatives des lieux stratégiques et le lac.

Cette méthodologie devra comprendre:

- i) La détermination des coordonnées des lieux stratégiques de l'étude.

- ii) La définition de techniques fiables pour l'échantillonnage des intrants et des eaux du lac pendant la fonte. Ceci afin que les conclusions sur les origines des intrants au lac et leur cheminement dans le système lacustre puissent être clairement identifiés.
  
- iii) Le choix:
  - a) des sites d'intrants susceptibles d'influencer les lieux stratégiques;
  - b) les profils temporels des pulses acides en provenance de ces intrants.
  
- iv) Le choix du modèle hydrologique dont les caractéristiques de simulation spatio-temporels sont compatible avec le choix des sites et des profils temporels.

### 2.3 Pertinence du travail de synthèse aux objectifs spécifiques de la fonte de 1988

Afin de préciser la méthodologie décrite ci-haut nous avons entrepris une synthèse de toutes les données disponibles sur la qualité physico-chimique des eaux du bassin versant du lac Laflamme entre 1983 et 1986 (tableau 1).

Beaucoup de ces données ont été prises dans des études dont les objectifs étaient différents les uns des autres. Toutefois, nous avons jugé opportun d'aborder la synthèse de toutes ces données afin de mieux structurer nos connaissances sur les interactions eaux de fonte - ruissellement - lac pendant la période printanière.

Dans ce travail, nous présentons un sommaire de nos connaissances sur:

- i) La distribution spatiale et la progression temporelle des pulses d'acidité dans le système lacustre pendant divers épisodes de la fonte printanière.
  
- ii) Les origines des eaux d'écoulement (intrants) qui ont donné lieu à ces patrons de diffusion et progression des eaux acides observés dans le bassin du lac.

Ce sommaire est suivi par un plan technique d'échantillonnage des sites stratégiques du lac pour la fonte de 1988 (section 6.2). Ce section comprend aussi quelques recommandations sur le développement futur du modèle intégré de la qualité des eaux du lac pendant la fonte printanière.

#### 4. MÉTHODOLOGIE

##### 4.1 Compilation de la banque de données hydrologiques

Les données sur le niveau du lac et le débit à la décharge du lac ont été fournies par Environnement Canada, Direction des Eaux intérieures (Région de Québec). Les données pertinentes à cette synthèse (1983-1985) sont reproduites dans les annexes 2 et 3. Les données sur le ruissellement hypodermique dans le sol du bassin versant nord en 1985 sont extraites des travaux de Roberge (1987). Les données de 1983 et du bassin du versant sud en 1985 sont les résultats des calculs utilisant le modèle SNOW 17 et en tenant compte de certaines hypothèses de travail (section 4.2).

##### 4.2 Traitement des données hydrologiques

Les apports en eau journaliers dans le lac et la répartition spatiale des apports le long des rives ont été déterminés à partir des mesures hydrologiques.

Les apports en eau totaux ont été évalués en utilisant la relation suivante:

$$I_T = Q_{ex} + Q_{st} + \Delta S \quad (1)$$

où:

$I_T$  : est l'apport en eau total pour la journée;

$Q_{ex}$  : représente le volume d'eau évacué à l'exutoire pour la même période;

$Q_{st}$  : représente le volume d'eau évacué par voie souterraine (évalué à 50 m<sup>3</sup>/jour);

$\Delta S$  : l'accroissement du volume d'eau stocké dans le lac

$$\Delta S = V_f - V_i \quad (2)$$

où:

$V_f$  et  $V_i$  représentent respectivement les volumes final et initial d'eau dans le lac. Le volume d'eau contenu dans le lac s'obtient par:

$$V \text{ (m}^3\text{)} = 59 \times \text{niveau du limnigraphe (mm)} + 99422 \quad (3)$$

Pour établir la répartition des apports en eau le long des rives, l'apport en eau total a été redistribué entre les rivages des compartiments A, B, C, D, F, G, H et I du bassin versant (annexe 2, figure 1). Pour ce faire, on a considéré, selon leur provenance, cinq types d'eau; les apports en eau souterraine ( $I_{st}$ ), l'eau hypodermique ( $I_{hy}$ ), l'eau des congères riveraines ( $I_{cr}$ ), l'eau provenant de la fonte du couvert de glace ( $I_f$ ) et l'eau des précipitations qui tombe directement sur le couvert de glace ( $I_p$ ). La méthodologie détaillée de la quantification de chaque intrant dans le lac est reproduit à l'annexe 2.

$$I_T = I_{st} + I_{hy} + I_{cr} + I_f + I_p \quad (4)$$

La fonte des congères ( $I_{cr}$ ) a été calculée séparément pour les compartiments exposés au sud (A, B, C et D) et ceux exposés au nord (F, G, H et I), à l'aide du modèle SNOW-17 (Anderson, 1973). Les résultats obtenus sont exprimés  $\text{m}^3/\text{j}$  pour chacun des compartiments ainsi que pour l'ensemble du lac.

Les hauteurs d'écoulement hypodermique ( $I_{hy}$ ) déjà évaluées par Roberge en 1985 dans le compartiment C ont été extrapolées pour tout le versant nord (compartiments A à E). Pour le versant sud (compartiments F à I) on a d'abord recalibré SNOW-17 à partir des données de ligne de neige de 1981 à 1982. Il a suffi de changer la valeur du paramètre MFMAX de ce modèle (Roberge, 1987); 1985); ceci a été ramené à 0.50. On a pu ainsi simuler les hauteurs de fonte journalière sur le versant sud. On a ensuite supposé que, comme sur le versant nord, le ruissellement ne se produisait que lorsque la fonte cumulée dépassait 130 mm et que le taux journalier excédait le taux d'infiltration calculé la même journée sur le versant opposé.

En 1983 puisque nous ne disposions d'aucune mesure de ruissellement hypodermique nous avons généré ces valeurs en se basant sur les observations du

comportement de l'écoulement en 1985. On a supposé que les écoulements hypodermiques n'étaient significatifs que lorsque les taux de fonte excédait 10 mm/j. Lorsque les deux versants génèrent des écoulements hypodermiques, leurs taux ont été ajustés afin que la valeur de  $I_{st}$  soit de l'ordre de 5 000 m<sup>3</sup>/j. Ce volume semble être la capacité maximale de décharge des eaux souterraines pendant les principales pointes de fonte lorsque l'écoulement hypodermique devient important.

La hauteur (mm) des écoulements hypodermiques est multipliée par la superficie de chacun des compartiments afin d'obtenir le volume de l'écoulement par compartiment et pour l'ensemble du bassin. L'écoulement hypodermique du compartiment E qui ne possède pas de rivage est déversé sur la rive du compartiment F.

Les hauteurs d'écoulement dues à la fonte de glace ( $I_f$ ) ont été calculées à partir des mesures de glace "in situ".

Les hauteurs de précipitation ( $I_p$ ) proviennent des mesures enregistrées par les pluviomètres.

L'écoulement souterrain total ( $I_{st}$ ) a été calculé ainsi:

$$I_{st} = I_T - (I_{hy} + I_{cr} + I_f + I_p) \quad (5)$$

La contribution totale des eaux souterraines a été ensuite répartie entre les rivages de chaque compartiment de la façon suivante:

Compartiment:	A	B	C	D	F	G	H	I
Proportion:	0%	5.9%	17.3%	26.8%	17.7%	20.4%	8.7%	3.2%

Ces proportions ont été déterminées en se basant sur la carte des directions d'écoulement souterrains fournie par Bernier et al. (1983).

En additionnant les apports de chacun des types d'écoulement on a obtenu pour chacun des huit segments de rivage un total journalier en m<sup>3</sup>. L'écoulement du ruisseau ET-9 sur la rive du compartiment F est inclus dans les apports en eau

calculé sur ce segment de rivage. La concentration des apports en eau le long de l'embouchure est reproduite lors de la distribution du volume d'eau entre les éléments qui correspondent au rivage de F.

Ce sont les apports en eau journaliers par segment de rivage qui ont servi d'intrants au modèle d'éléments finis qui simule les directions d'écoulement et les vitesses de la circulation des eaux à travers le lac. De plus, ces apports sont à la base des calculs des bilans de masse physico-chimiques des flux hydrogéochimiques pendant la fonte (section 4.6).

#### 4.3 Modèle hydraulique des écoulements des eaux lacustres

Ce modèle de simulé par la méthode des éléments finis des caractéristiques hydrodynamiques de la couche superficielle des eaux du Lac Laflamme sous couvert de glace.

En fonction de la répartition des débits répartis spatialement sur tout le pourtour du lac et de leur variation journalière, nous avons utilisé le modèle numérique d'éléments finis MEFLU-2.0 (Leclerc et al., 1987; TAO Simulations, 1987) pour simuler les conditions hydrodynamiques d'orientation et de vitesse d'écoulement de la couche superficielle des eaux sous couvert de glace. Ces données ont été générées sur près de 900 points couvrant la surface du lac pour le 18 avril, le 25 avril, le 1er mai, le 9 mai, et le 17 mai 1983 ainsi que le 29 avril, le 1er mai, le 6 mai, le 11 mai et enfin le 14 mai 1985. Pour fournir une image plus descriptive de l'évolution des eaux périphériques vers l'exutoire du lac, nous avons simulé les parcours de bouées fictives larguées simultanément en divers points sur le pourtour du lac traçant ainsi le déplacement d'un front d'onde virtuel pour deux jours consécutifs, les 24 et 25 avril 1983. Les dates pour la simulation des écoulements ont été choisies selon les étapes de la progression de la fonte (commencement de la fonte, fonte massive (y inclus les décharges maximales en périodes chaudes et plus restreintes en périodes froides) et l'après fonte. De plus, trois de ces dates (25 avril, 1er mai et 17 mai 1983) représentent les jours des campagnes intensives d'échantillonnage des eaux du lac. Ces campagnes ont été entreprises afin de déterminer la variabilité de la composition physico-chimique des eaux de surface et celles de profondeur (section 5.1).

Le modèle MEFLU-2.0 développé conjointement à TAO Simulation, à l'INRS-Eau et à l'Université Laval, utilise la méthode des éléments finis. Il fournit essentiellement des résultats sur l'hydrodynamique (vitesse, orientation, niveau). Le principe de conservation de la quantité de mouvement est décrit à partir des équations de Saint-Venant et le principe de conservation de masse à partir de l'équation de continuité (équations 6-10). On assume négligeables les variations des vitesses dans l'axe vertical obtenant ainsi un modèle bidimensionnel bien adapté aux écoulements gravitationnels en eau peu profonde. Le modèle comporte les hypothèses suivantes:

- la pression est hydrostatique;
- les termes d'accélération verticale sont assumés négligeables;
- les variations de la vitesse sont faibles dans la direction verticale.

Équation de continuité: 
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Équation de mouvement: 
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u\partial u}{\partial x} + \frac{v\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = F_X \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u\partial v}{\partial x} + \frac{v\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = F_Y \quad (8)$$

1            2            3

avec

$$F_X = \frac{-g|V|u}{C^2H} + f_c v + v_T \Delta u \quad (9)$$

$$F_Y = \frac{-g|V|v}{C^2H} - f_c u + v_T \Delta v \quad (10)$$

4            5            6

où:

1            : accélération locale;

2            : accélération convective;

- 3 : pression hydrostatique;
- 4 : frottement par le fond (contrainte de Chézy);
- 5 : force de Coriolis;
- 6 : contraintes turbulentes de Reynolds;
- u, v : vitesses moyennes selon x et y (x orienté à l'est, y au nord);
- v : la résultante des vitesses;
- h : hauteur d'eau relative;
- $F_x, F_y$  : forces massiques selon x et y;
- g : gravité;
- C : coefficient de Chézy;
- $f_c$  : coefficient de Coriolis;
- $\nu_T$  : la viscosité turbulente horizontale;
- $\Delta$  : opérateur Laplacien =  $\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right]$ .

L'élément de base utilisé dans MEFLU-2.0 est un triangle composé de 6 noeuds: 3 noeuds commet et 3 noeuds à mi-côté. La position de chaque noeud de chaque triangle est caractérisée dans le domaine par les coordonnées selon les axes X et Y. Les composantes "u" et "v" de la vitesse ainsi que la hauteur d'eau sont affectées aux noeuds. l'interpolation par élément fini utilise une technique d'approximation nodale. L'approche consiste à utiliser une approximation quadratique (n = 6 noeuds) pour les vitesses et une approximation linéaire (n = 3 noeuds) pour la hauteur d'eau. Comme la hauteur d'eau, la bathymétrie est approximée linéairement à l'intérieur d'un élément.

La densité du maillage a été déterminée en fonction de la précision recherchée, de la durée des calculs, de la présence de singularités (affluents, effluents, baies, chenaux, etc.). Considérant les équipements informatiques disponibles, il a été jugé optimal d'adopter un maillage de 400 à 500 éléments triangulaires.

Pour fournir les simulations des conditions hydrodynamiques de la couche superficielle des eaux du lac Laflamme, certaines hypothèses de travail ont été formulées en fonction des données disponibles et de la connaissance du milieu.

Ces hypothèses sont:

- que la présence du couvert de glace annihile l'influence du vent sur la génération de courants en surface;
- que l'effet du frottement engendré par la présence du couvert de glace est quasi-nulle (coefficient de frottement "n" de Manning très faible);
- que l'orientation et l'intensité des courants sont principalement régis par la quantité et la distribution des apports d'eau sur le pourtour du lac ainsi que par la limite physique imposée par la forme du littoral confinant l'écoulement lors du cheminement des eaux vers l'exutoire;
- que tel qu'observé dans des conditions similaires (Bengtsson, 1986), les eaux apportées au lac sont transitées dans la couche superficielle établie entre le pied de glace et la thermocline d'hiver.

Il est important de préciser que dans le cas présent d'application, l'épaisseur de cette couche superficielle spécifiée dans le modèle par une bathymétrie équivalente (épilimnion d'hiver = profondeur bathymétrique) est le paramètre le plus sensible du modèle. On comprend aisément que pour obtenir un même débit sur une section plus grande ou plus petite, on doit alors ralentir ou accélérer les vitesses ce qui influence alors directement la qualité des simulations.

Enfin, pour bien représenter le problème d'écoulement, nous avons considéré la situation comme une suite d'événements quasi-stationnaires avec un pas de temps

de un jour. Comme de plus, le problème est non-linéaire, la solution est obtenue dans le modèle par une méthode de Newton-Raphson et Euler implicite.

Une description plus détaillée du modèle et la procédure de simulation se trouve en annexe (Annexe 4).

#### 4.4 Compilation de la banque de données physico-chimiques

La banque de données (Annexe 1) a été assemblée de divers études sur la fonte printanière au lac Laflamme (Jones et al., 1984; Jones et al., 1985; Jones et al., 1986). Cette série de rapports contient toutes les informations relatives à la collecte des échantillons<sup>1</sup>, la conservation, et les analyses de ces derniers.

#### 4.5 Traitement des données physico-chimiques

Tous les traitements sauf l'analyse de regroupement, ont été réalisés avec un micro ordinateur IBM XT.

Les coordonnées spatiales des stations du lac (fonte de 1983) furent déterminées en utilisant une table à digitaliser (PENPAD, Pencept inc.). Ces coordonnées furent ensuite intégrées aux fichiers qualité de l'eau préparés avec le logiciel KMAN version (vs) 2.01.00 (Micro Data Base System inc.).

La construction des graphiques tridimensionnels et celle des figures d'iso-concentration pour chaque paramètre, furent effectuées à l'aide des logiciels SURFER vs 3.0 et PLOTCALL vs 1.12 (Golden Software). Les figures d'iso-concentration furent éditées de façon à ce que les isolignes soient restreintes aux limites spatiales des stations. Ces figures furent complétées

---

<sup>1</sup> Une erreur s'est glissée dans le rapport Jones et al., 1986. L'échantillonnage des eaux du lac à travers la couverture de glace pendant la fonte de 1985 a été effectué avec un tube (10 mm de diamètre intérieur) lié à une pompe peristaltique et non pas avec une bouteille de prélèvement Van Dorne tel que décrit dans la section 2.2 du rapport.

par l'ajout des lignes de contour du lac, du titre et des légendes. Le travail d'édition a été effectué à l'aide du logiciel AUTOCAD.

Pour l'étude de l'évolution spatiale et temporelle de la qualité de l'eau au cours de la fonte printanière, nous avons cherché à regrouper les données en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. Ceci de façon à mettre en évidence les changements spatio-temporels majeurs qui se produisent durant la fonte dans le système lacustre et d'identifier l'origine de ces changements. L'analyse de regroupement pour les données spatiales et temporelles ont été effectuées à l'aide du module P2M de BMDP (analyse de regroupement par cas) sur les paramètres suivants: la conductivité,  $H^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  et  $HCO_3^-$ . À cause de faible concentration, le  $PO_4^{3-}$  ne fut pas considéré dans l'analyse.

Dans l'étude des données physico-chimiques, la priorité a été accordée:

- a) Aux eaux de surface et de profondeur du lac pour trois dates en 1983; 25 avril, 1 mai et 17 mai. Ceci afin d'établir le regroupement spatial des stations ayant des eaux de la même composition physicochimique sous la couverture de glace;
- b) Aux eaux du centre du lac et celles de l'exutoire du lac pour la période 20 avril - 11 mai 1983. Ceci afin de faire ressortir les jours ou les périodes dont les eaux du lac et de la décharge affichaient une qualité similaire;
- c) Aux eaux ambiantes et les eaux interstitielles au site du frayère en 1985. Ceci afin de regrouper des jours ou périodes de l'évolution similaire de l'acidité dans le lieu de fraie.

La représentation graphique des caractéristiques de chaque groupe identifié et celle de l'évolution temporelle, ont été réalisées à l'aide du logiciel 123 vs 2.0 (Lotus Development Co.).

#### 4.6 Calculs des bilans de masse hydrochimiques du Lac Laflamme

Nous avons calculé l'évolution du bilan hydrochimique du lac à partir:

- i) des volumes et des concentrations des ions majeurs dans les eaux sous le couvert de glace;
- ii) des volumes et des concentrations des ions majeurs dans des apports en eaux dans le lac et;
- iii) de la vitesse de progression des eaux de surface sous le couvert de glace.

Ceci afin de valider nos hypothèses sur les origines des apports qui influencent la qualité des eaux de surface et des frayères pendant des différentes périodes de la fonte.

Nous avons utilisé deux types de bilans:

- i) Le bilan global du lac pendant des périodes, ou pour toute la période, de fonte;
- ii) Les bilans spécifiques et simplifiés de certaines zones de surface du lac pendant les périodes très courtes.

Ceci afin de valider les hypothèses sur les origines de la composition chimique de ces eaux.

Les paramètres chimiques compris dans la méthodologie pour le calcul de bilan global est reproduit en annexe 3.

La méthodologie pour le calcul des bilans spécifiques d'une zone quelconque du lac considéré chaque zone comme un réservoir vide ( $\text{Volume} = V_z$ ) au temps 0. Le réservoir, donc, est vidé instantanément au commencement du pas de temps ( $t$ ). Par la suite, il est rempli par des apports dont la somme des volumes ( $\sum_0^t V_A$ ) apportés dans le temps  $t$  égal  $V_z$ . La composition des eaux de zone est considérée comme homogène; il y a donc un mélange complet des apports. Le modèle est très grossier car il ne comprend pas les phénomènes de mélange par advection, convection et diffusion avec les zones environnantes. Par contre, il est flexible dans la mesure où il permet de varier les dimensions de la zone

d'étude et le temps de pas ( $t$ ) selon la caractéristique hydrologique du lac à un moment donné.

Au temps  $t$ :

$$[C]_{z(t)} \cdot [V]_{z(t)} = \sum_0^t [C]_A \cdot [V]_A \quad (11)$$

où:

$[C]_{z(t)}$  et  $[V]_{z(t)}$  sont la concentration (eq  $m^{-3}$ ) et le volume ( $m^3$ ) respectivement de la zone Z.

$\sum_0^t [C]_A \cdot [V]_A$  est la somme des bilans ( $[C] \cdot [V]$ ) de tous les apports dans la zone.

$t$  = temps de renouvellement (jours) des eaux dans la zone Z ( $[V]_Z / \sum_0^1 [V]_A$ ) tel que déterminé par le modèle d'éléments finis de l'écoulement des eaux de surface sous le couvert de glace.

Exemple pour une zone riveraine du lac:

$$[C]_{z(t)} \cdot [V]_{z(t)} = ([C]_{st} \cdot [V]_{st})_{0 \rightarrow t} + ([C]_{hy} \cdot [V]_{hy})_{0 \rightarrow t} + ([C]_{cg} \cdot [V]_{cg})_{0 \rightarrow t} + ([C]_{cr} \cdot [V]_{cr})_{0 \rightarrow t} \quad (12)$$

où:

$[C]_{st}$  et  $[V]_{st}$  sont respectivement la concentration moyenne et le volume des apports des eaux souterraines pendant le temps "t",

$[C]_{hy}$  et  $[V]_{hy}$  sont la concentration moyenne volumétrique et le volume respectivement des apports de ruissellement hypodermique pendant le temps,

$[C]_{cg}$  et  $[V]_{cg}$  sont la concentration moyenne volumétrique et le

volume respectivement des apports en provenance du couvert de glace pendant le temps,

$[C]_{cr}$  et  $[V]_{cr}$  sont la concentration moyenne volumétrique et le volume respectivement des apports directs en provenance des congères de la rive du lac pendant le temps "t".

De plus:

$$[C]_{cg} \cdot [V]_{cg} = [C]_g \cdot [V]_g + [C]_p \cdot [V]_p \quad (13)$$

où:

$[C]_g$  et  $[V]_g$  sont la concentration moyenne volumétrique et volume respectivement des apports de la fonte de la glace blanche et de la glace noire du couvert de glace.

$[C]_p$  et  $[V]_p$  sont la concentration moyenne volumétrique et volume respectivement des apports de la pluie (ou fonte de neige) sur le couvert de glace.

Comme hypothèse de travail (voir résultats, section 5) nous avons considéré que la majeure partie de toute fonte en provenance de la glace blanche et de la pluie (ou fonte de neige sur le couvert) a été tenue à l'écart des eaux sous-jacentes au couvert de glace pendant que le niveau hydrostatique du lac était positif. Une fois la glace détachée du bord du lac et en état libre de flottaison le réseau de drainage du couvert permettait le transfert des eaux de la surface du couvert aux eaux sous-jacentes.

À partir des données hydrologiques sur le volume des apports (section 4.2), des mesures chimiques sur les échantillons des divers apports, et du temps de déplacement des eaux, nous avons calculé les bilans de masse des eaux sous-jacentes à la glace. Nous avons, par la suite comparé ces bilans avec ceux obtenus pour des jours où nous avons des mesures de la composition de ces eaux. Les résultats de ces travaux sont décrits dans la section suivante.

## 5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 5.1 La campagne de 1983

En 1983, deux des éléments majeurs de l'étude du système lacustre ont été:

- i) l'étude de la distribution spatiale des éléments majeurs Al et Mn dans les eaux de surface sousjacentes au couvert de glace (0-0.5 m) le 25.04, 01.05 et 17.05 et les eaux de fond (2 m et 4 m) le 01.05 et 17.05 dans la partie est du lac.
- ii) l'étude de l'évolution dans le temps (tous les deux jours; 22.03 - 26.05) des éléments majeurs, Al et Mn dans les eaux de surface (0-0.5 m) au centre du lac, aux embouchures des tributaires et à l'exutoire du lac.

Les mesures du système lacustre furent alors complétés par l'analyse journalière des eaux de fonte (lysimètre, 20 m<sup>2</sup>, sur le versant nord du bassin) et l'analyse des précipitations (collecteur Sangamo; par évènement).

Le tableau 2, 3 et 4 montrent les résultats de l'analyse de regroupement des stations des eaux de surface pour le 25.04 le 01.05 et le 17.05 respectivement. Les regroupements pour ces dates ont été effectués en utilisant tous les paramètres physico-chimiques inscrits dans l'annexe 1. Les regroupements basés uniquement sur les concentrations de Ca<sup>++</sup> montrent essentiellement le même regroupement de stations. Les figures 1, 2 et 3 reproduisent ces regroupements de stations en zones des eaux de surface de qualité similaire (pour une date donnée) le 25.04, 01.05 et 17.05 respectivement. Les figures montrent que la surface du lac présente, à différentes périodes de la fonte, des zones homogènes mais de teneur en calcium distinctes:

- i) très faibles, moyennes et élevées le 25.04;
- ii) très faibles et moyennes le 01.05;

iii) moyennes le 17.05.

À partir d'une analyse des concentrations en  $\text{Ca}^{++}$  de la pluie le 17-18.04 et le 24-25.04 et l'analyse de la concentration des eaux de fonte (17.04 - 25.04) nous avons formulé comme première hypothèse que l'origine des eaux dans la zone 1 du 25.04 était l'écoulement laminaire sous le couvert de surface des eaux de pluie peu chargées en éléments géochimiques du bassin versant (Ca, Mg, Al, Mn). Ces eaux après lessivage des congères de la rive et seraient rapidement entrées dans le lac, avec peu de contact avec le sol ou la végétation. Afin de valider cette hypothèse, nous avons calculé le bilan de masse pour la zone 1 (Fig. 1) à partir de tous les intrants (mesurés ou calculées) dans le lac. Selon le bilan de masse (tableau 5), l'existence d'une zone de cette dimension possédant de si faibles teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ , est peu probable. Ceci si l'on considère les caractéristiques quantitatives et qualitatives des apports du bassin ayant rempli la zone 1 dans les deux jours ( $t=2$ ) avant le 25.04.

Quoique le modèle d'écoulement hydraulique (figure 4) nous confirme qu'une zone de cette envergure à 0.5 m de profondeur sous la glace est possible à partir de la totalité des apports, le calcul de bilan de masse des eaux de la zone (équation 11) basé sur ces apports (équation 4) résulte en une charge totale de  $\text{Ca}^{++}$  beaucoup plus élevée que celle calculée à partir des mesures sur le terrain.

Cette apparente contradiction peut s'expliquer de 2 façons:

- i) les apports en eaux réels sont différents des apports estimés par le modèle hydraulique;
- ii) la zone observée n'est effectivement qu'un artefact de la méthodologie (c'est-à-dire une zone apparente).

Examinons ces deux possibilités:

En dépit du fait que l'estimation des quantités relatives des apports par la méthode hydrologique (annexe 2) est une première approximation de la réalité, nous la considérons plus plausible que l'alternative qui se présente.

C'est-à-dire, que la quasi totalité des apports provient des congères, ceci découle du calcul du bilan de masse physico-chimique pour la zone 1. En effet, pour que le bilan calculé à partir des apports soit comparable quantitativement avec celui calculé à partir des mesures "in-situ", il faudrait que la plus grande partie des apports (92%) soit provenue des congères. En d'autres termes, la superficie des congères de rive qui aura acheminé les eaux de fonte directement dans le lac, sans passer par le sol, soit 308 fois plus élevée que celle estimée par les études in-situ. Quoiqu'un tel écoulement soit possible (ex. persistance d'une couche de glace imperméable au sol sur une très grande étendue du bassin versant) nos observations directes de l'écoulement "in situ" pendant cette période laissent croire que ce genre de phénomène est peu probable. Il nous reste donc la deuxième hypothèse que la zone des eaux très diluées n'est qu'une zone apparente. Cette anomalie serait reliée à la méthodologie dont nous nous sommes servi pour échantillonner les eaux sous-jacentes, c'est-à-dire le forage d'une trentaine de trous (20 cm de diamètre) à travers le couvert de glace de l'est du lac quelques jours avant le 25.04 (trous 1-6, 18.04; 7-24, 19.04; 25-27, 20.04).

Cette méthodologie a été souvent utilisée pour ce genre d'échantillonnage sans biais apparent (Welch et Bergmann, 1985; Gunn et Keller, 1986). Welch et Bergmann, par exemple, ont foré des trous dans le couvert de glace des lacs arctique (les lacs Sagvaqjuac) afin de suivre la progression des ajouts de Rhodamine B dans les eaux sous-jacentes et plus profondes des lacs. Ces auteurs ont prélevé les échantillons d'eau à travers des trous d'environ 10 cms de diamètre. Les échantillons ont été prélevés dans une région où il y a très peu de couverture de neige sur la glace et à des températures de l'air voisines de  $-25^{\circ}\text{C}$ . Les conditions de fonte au Lac Laflamme en 1983 présentent des caractéristiques bien différentes. Dans le cas du Lac Laflamme, une couche d'eau en provenance de la pluie et de la fonte du couvert de neige sur la glace a inondé le couvert de glace après le forage des trous. Ces eaux auraient pu s'infiltrer dans les trous d'échantillonnage et biaiser l'image de l'évolution spatiale et temporelle de la qualité de l'eau.

La pression hydrostatique du lac étant positive pour cette période de la fin d'avril et première semaine de mai (4-14 cms), nous avons jugé initialement que le mélange des eaux sous-jacentes avec l'eau sur le couvert de glace avait été

minimal. Nous croyons maintenant qu'un tel mélange est possible si l'on considère:

- i) la génération de turbulence autour des trous par le mouvement des courants d'eaux sous-jacents;
- ii) les courants induits dans les trous par le mouvement de la glace vers des nouveaux états d'équilibre causés par l'arrivée de pluie sur le couvert;
- iii) l'existence des courants verticaux et convectifs dû au réchauffement localisé des eaux autour des trous;
- iv) la turbulence des eaux (mêlées avec la neige) de surface par le vent;
- v) le déplacement des eaux de surface dans le trou par l'insertion de la bouteille de prélèvement pendant l'échantillonnage.

Adams et Allen ont étudié le phénomène de mélange des eaux de surface du couvert de glace avec ces eaux sous-jacentes du couvert à Colour Lake dans l'Isle Ellesmere de l'Arctique canadien (Adams et Allen, 1987). Ces auteurs ont observé que des courants d'eau sur la glace générés par le vent et le mouvement vertical du couvert peuvent entraîner les eaux sous-jacentes par des écoulements en tourbillon jusqu'à une profondeur de 5.5 m. Il faut mentionner cependant, que dans ce cas, le trou était relativement grand (2 m) et la pression hydrostatique négative, ce qui n'était pas le cas au Lac Laflamme le 25.04. Toutefois, les possibilités de mélange (i-v) selon les processus décrits ci-haut et l'existence de mélanges des eaux de surface de la glace (pluie + fonte de neige) avec les eaux sous-jacentes dans d'autres conditions (Adams et Allen) appuient l'hypothèse que la qualité de l'eau de surface dans la zone 1 n'est pas représentative de la qualité réelle dans l'ensemble de la zone. De plus, en calculant le bilan global journalier à la décharge du lac nous n'avons pas observé à l'exutoire du lac, une qualité de l'eau qui aurait pu être reliée quantitativement à l'arrivée à la sortie du lac des eaux de la zone 1 du 25.04. Nous avons pu, par contre, constater qualitativement l'arrivée des eaux de la zone 1 à la décharge du lac (voir ci-dessous).

Les données disponibles ne nous permettent cependant pas de trancher sans équivoque entre l'hypothèse de la réalité du phénomène ou un effet local de la technique d'échantillonnage. Nous concluons que la probabilité est très élevée que la méthodologie influence la qualité des eaux sous-jacentes à la glace dans la manière décrite. La question, toutefois, peut être posée - pourquoi n'observons-nous pas une zone homogène dans toute la partie du lac où nous avons percé des trous? Nous n'avons pas présentement la réponse à cette question. Il se peut que la région du lac où on a mesuré les teneurs plus élevées de tous les éléments, aient été moins assujetties aux phénomènes de mélange que la zone des eaux diluées. Il faut noter par contre, que parmi les trous de la zone de teneurs élevées en composants chimiques la plupart ont été forés 2 jours plus tard que les trous de la zone des eaux diluées.

Le 01.05 une zone des eaux encore diluées a été mesurée sur la plus grande partie de la superficie est du lac; dans le cas où la zone serait réelle, elle pourrait représenter le déplacement des eaux diluées du 25.04 vers le centre du lac (Fig. 2). Par contre, et contrairement à la distribution spatiale des eaux sous-jacentes à la glace le 25.04, une zone de teneur moyenne en  $\text{Ca}^{2+}$  ( $12-28 \mu\text{eq L}^{-1}$ ) s'est trouvée étroitement associée avec les embouchures des tributaires ET9, R12 et R13. À ce moment là, le débit dans le système était très élevé (fig. 6,  $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$  à la décharge). L'analyse de regroupement sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux de cette dernière zone ne permet pas de les associer aux tributaires dont la qualité forme un groupe bien distinct. L'analyse de regroupement ne nous permet pas de conclure sur les origines des eaux lacustres. Nous n'avons pu avec cette technique relier chimiquement les eaux du lac aux intrants ou extrants du bassin sur une base temporelle ou spatiale; et ceci, ni dans le cas des eaux du lac vis-à-vis celles des tributaires, ni dans le cas des eaux de la décharge du lac vis-à-vis celles du lac (figure 5). Nous attribuons ce fait au divers intrants du lac, au mélange avec les eaux peu profondes, l'interaction des intrants et extrants avec les sédiments lacustres, et la complexation entre les métaux (Ca, Al, Mn) et la matière organique des eaux des intrants qui aurait pu provoquer la précipitation de ceux-ci dans les zones riveraines. Nous avons observé, à cet effet, que les eaux colorées d'écoulement superficiel ont laissé des dépôts particuliers appréciables sous la glace dans la zone riveraine pendant la fonte. En ce qui concerne le contact entre les eaux et les sédiments, elles

semblent apporter des changements appréciables dans la qualité des eaux de la décharge surtout en Al et Mn. Ainsi, la Figure 7 montre l'arrivée à l'exutoire du lac le 2 mai des eaux diluées de la zone #1 du 25.04 ce qui est devenu la zone diluée #2 du 01.05; le  $\text{Ca}^{2+}$  chute brusquement pendant le passage de ces eaux dans la décharge. Toutefois, l'interaction de ces eaux avec les sédiments et végétation à la sortie du lac résulte en des teneurs très élevées en Al des extrants par rapport à celles que l'on a observées dans la zone originale (25.04). Il faudrait remarquer que la progression des eaux très diluées de la zone riveraine de l'est du lac à travers le bassin (01.05 zone #2, 02.05 décharge) se conforme très bien ( $\pm$  un jour) avec le modèle hydraulique d'écoulement (figures 4 et 8).

Toutes ces observations suggèrent que la zone des eaux très diluées du 25.04 était réelle dans le sens où elle représentait des intrants dans le lac très dilués mais que notre méthodologie de prélèvement des eaux a biaisé les concentrations réelles de ces eaux. Nous considérons que la méthode de forage de trous est acceptable dans le cas où la couverture de glace n'est pas assujettie à une fonte élevée de glace blanche ou de la pluie (exemple: pendant les périodes de basses températures, Welch et Bergmann, 1985).

La distribution spatiale des eaux de surface du 17.05 (figure 3) fait ressortir deux zones principales; une zone dont la qualité homogène indique un écoulement est-ouest de nature pélagique et une zone d'écoulement associée avec les rives. Ce patron de distribution des eaux se conforme bien avec la distribution des vitesses d'écoulement dans le lac pour cette date (figure 9). Néanmoins, et encore, le regroupement des eaux des tributaires et celles du lac ne sont reliées qu'à un très haut niveau dans l'analyse de regroupement (figure 4); c'est-à-dire que ces deux milieux sont chimiquement nettement distincts.

## 5.2 Campagne de 1984

Il n'y a eu que très peu de mesures sur les eaux du lac en 1984. La campagne de cette année-là a surtout été concentrée sur les relations physico-chimiques entre l'écoulement hypodermique et la nappe phréatique pendant le rehaussement de cette dernière au printemps. La campagne a permis, toutefois, de rassembler de précieuses informations sur l'écoulement direct des eaux hypodermiques dans

le lac et les lieux possibles des intrants des eaux "souterraines". Des profils de température dans le lac (Fig. 10 a, b, c) ont permis d'établir que la thermocline se situait entre 1 et 2m au commencement de la fonte (27.04). La profondeur de la thermocline n'a pas changé pendant la fonte mais la température à 0.5m a augmenté de 0.5 à 1.5°C. Ces observations ont été utilisées pour définir la méthodologie de la campagne de 1985.

### 5.3 La campagne de 1985

La campagne de 1985 avait été conçu de façon à:

- i) valider l'écoulement laminaire d'une zone d'eau très diluée à travers le lac au commencement de la fonte;
- ii) suivre l'évolution de cet écoulement laminaire au site de fraie ainsi que l'influence physico-chimique de cet écoulement et l'écoulement des eaux souterraines sur les eaux interstitielles du frayère.

Pour valider l'écoulement laminaire à travers le lac nous avons foré au centre du lac un trou de quelques centimètres de diamètre. Ce trou était situé approximativement à 8 m du site de prélèvement (ouverture > 20 cm) d'Environnement Canada. Les eaux ont été prélevées à 0.5, 2 m et 4 m avec un petit tuyau couplé à une pompe peristaltique. Pendant la fonte il n'y avait que très peu de pluie. Pour l'échantillonnage des eaux ambiantes et des eaux interstitielles, nous avons utilisé la méthode de Gunn et Keller (1986) c'est-à-dire une glacière sans fond prise dans la glace au-dessus de la fraie. En enlevant le couvercle, les eaux ont été prélevées avec l'aide d'un petit tuyau raccordé à une pompe manuelle en plastique.

Dans l'étude de l'évolution concomitante des eaux au centre du lac (0.5 m, 2 m, et 4 m) et les eaux de fonte, les résultats (Figures 11-21) sur l'écoulement laminaire semblent être concluantes dans tous les cas (conductivité, Alcalinité,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Mn, Al, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K, Mg); les eaux du centre du lac répondent rapidement à la qualité physico-chimique de la fonte telle que mesurée dans les lysimètres sur le versant nord. Il est remarquable que la strate d'eau à la profondeur de 0.5 m montre une évolution concomitante avec

celle des eaux de fonte. Par ailleurs, sauf pour l'ion hydrogène, la concentration des ions majeurs au centre du lac à 0.5 m est apparue semblable à celle des eaux de fonte. La valeur de  $H^+$  était moins élevée dans les eaux du lac à cause de l'effet cumulatif des petites différences en ions majeurs. Une neutralisation partielle des eaux de fonte se produit ainsi au cours de leur progression à travers le lac. Les résultats restent toutefois ambigus parce qu'on ne peut distinguer sans équivoque l'écoulement laminaire de l'intrusion des eaux de fonte en provenance du couvert de glace par les trous de prélèvement. Nous considérons, néanmoins, que la méthodologie de prélèvement en 1985 a été beaucoup plus fidèle pour évaluer l'état du système que celle de 1983.

À partir des résultats de 1985, il est donc possible de repenser l'hypothèse originale de 1983; c'est-à-dire qu'il y a, en effet, un écoulement des eaux de fonte très diluées sous le couvert de glace. Il se peut que la présence des trous cause un effet de turbulence et d'entraînement des eaux de la fonte de la glace dans les eaux sous-jacentes pendant certaines périodes; résultant en une profondeur d'écoulement apparente plus grande que la profondeur réelle.

À la lumière de ces résultats, on peut se demander aussi s'il n'existerait pas une autre couche d'écoulement laminaire sous la glace. Les figures 22-25 démontrent l'évolution de la qualité des eaux (Cond.,  $SO_4^{2-}$ , Al,  $Ca^{2+}$ ) du ruisseau principal en 1985; en aucun moment nous n'avons pu détecter des eaux à 0.5 m au centre du lac ayant une composition similaire à celle des tributaires. Y-a-t-il un couloir d'écoulement des eaux des tributaires entre 0.5 m et le fond du lac? Des changements dans la qualité de l'eau à 4m de profondeur suggère qu'un tel couloir existe.

Vers le 3 avril 1985, par exemple, période qui correspond au début de la fonte et à l'infiltration des eaux de fonte vers la nappe phréatique, le comportement des paramètres chimiques dans l'hypolimnion est variable. Mais dans l'ensemble, les changements les plus évidents (figs. 11-21) surviennent dans la zone la plus profonde (4m). À part les ions  $NH_4$ ,  $NO_3$  et  $SO_4$  (fig. 13, 14, 15) dont le comportement peut être associé à l'activité biologique, on observe une forte augmentation de l'alcalinité (fig. 12), du calcium (fig. 18) et du sodium (fig. 19). Le fait que cette augmentation à 4m est rapide et qu'elle coïncide

avec le début de la fonte, suggère que ce phénomène est relié à de nouveaux apports dans la zone profonde de l'hypolimnion. Les fortes concentrations observées proviennent à notre avis, d'un apport accru des eaux souterraines dans la zone profonde, possiblement via la cuvette lacustre à proximité des berges.

La campagne de 1985 nous a permis de voir que les eaux ambiantes des frayères (figures 26-31) sont soumises à un stress acide plus important que les eaux du centre du lac. L'évolution des concentrations de  $\text{Ca}^{2+}$  sont très semblables tandis que les concentration de l'Al étaient plus élevées au site de fraie vers la fin de la fonte.

Quoiqu'il y ait des différences (selon l'ion majeur), entre l'évolution des eaux ambiantes au site de fraie et les eaux à 0.5 m au centre du lac, la concomitance des changements dans les états chimiques des deux systèmes renforce notre hypothèse des écoulements laminaires. Nous n'avons pas décelé près du site de fraie, des eaux ayant une composition chimique caractéristique des eaux de ruissellement hypodermique (voir figures 22-25). Pourtant, les observations des chercheurs témoignent l'arrivée au bord du lac des ruissellements en provenance du sol pendant la fonte massive. Est-ce que la présence d'un trou de prélèvement des eaux peut affecter autant les eaux sous la glace pour que ces premières ne reflètent pas du tout les conditions physicochimiques réelles sous le couvert?

Enfin, en ce qui concerne les eaux interstitielles de la fraie, l'évolution physico-chimique est relativement stable comparée à celle des eaux ambiantes. L'évolution de quelques ions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) indique que ces eaux sont sujettes à des variations notamment pendant et après les périodes de pluie.

## 6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 6.1 Conclusions globales

La recherche au bassin du Lac Laflamme depuis 1983 était surtout concentrée sur les premières étapes d'une modélisation du système bassin versant-lac; la dernière étape de ce processus étant le développement d'un sous-modèle d'écoulement des eaux acides dans le bassin du lac. Pour cette raison, le système lacustre n'a été étudié que sur une base complémentaire pendant la phase de développement des sous-modèles de fonte de neige et d'écoulement dans le sol. C'est pourquoi aussi l'approche du système lacustre a été surtout qualitative de type "monitoring" en utilisant des méthodes conventionnelles.

La synthèse quantitative des bilans de masse physico-chimiques des eaux montrent que les résultats de l'analyses qualitatives de la distribution et évolution des eaux du lac et ceux des calculs quantitativs des apports dans le bassin sont contradictoires.

Nous concluons donc que les résultats de 1983 et 1985 sont ambigus. Selon le calcul des bilans de masse physico-chimiques des eaux sous-jacentes à la glace, la grande majorité des intrants n'auraient eu que peu ou pas de contact avec le sol! D'autre part, il est fort probable qu'il existe plusieurs écoulements laminaires parallèles sous la glace pendant la fonte. Le premier écoulement serait celui des eaux de fonte ayant eu peu de contact avec le sol. Celui-ci occuperait la strate sous-jacente à la glace au commencement de la fonte. Plus tard, à cet écoulement s'ajouterait les eaux de fonte de la glace elle-même. Puis, lorsque l'infiltration devient importante, on retrouverait tant dans les eaux plus profonde (4m) l'écoulement des eaux d'origine souterraine. Enfin, bien que la méthode de prélèvement utilisée soit d'usage courant, elle laisse planer un doute sur la représentativité des échantillons. Il se peut, en effet, que les mesures de surface soient systématiquement biaisées par la méthodologie utilisée.

Puisque la méthodologie est essentielle pour:

- i) évaluer précisément les stress acides sur les diverses parties du lac pendant la fonte;
- ii) développer un sous-modèle fiable d'intrants physico-chimiques au modèle hydraulique, et;
- iii) réinterpréter sans équivoque tous les résultats sur l'évolution physico-chimique des eaux du lac sous la couverture de glace depuis 1983.

Il faudrait repenser en priorité la méthode de prélèvement des eaux sous la glace dans les zones riveraines et pélagiques pour la fonte de 1988.

#### 6.2 Recommandations spécifiques

Afin de définir la méthodologie d'échantillonnage et de s'assurer de sa fiabilité, nous recommandons:

- i) un suivi physique et physico-chimique de l'évolution de la couverture de glace à partir de la mi-hiver; des expériences de contrôle sur la perméabilité de la glace sans, ou avec, trous de prélèvement. Cette étude devrait être complétée par la mesure du niveau géodésique de la glace, son épaisseur, sa structure verticale, sa composition chimique, et l'évolution du bilan de masse physique et physico-chimique pendant la fonte;
- ii) se définir un protocole expérimental de prélèvements d'eau à divers niveaux ( $\approx$  5-10 cms) sous la glace entre les couches superficielle et plus profondes. Cette approche devrait être basée sur une variété de techniques de prélèvement afin d'assurer la fiabilité des mesures et d'évaluer l'efficacité des techniques d'échantillonnage. Quelques-unes de ces méthodes sont illustrées dans les figures 32 et 33.
- iii) un suivi physique de ces strates par des profils physico-chimiques (température conductivité, pH, O<sub>2</sub>) en utilisant une sonde ayant une bonne précision de mesure.

Nous recommandons de plus que les sites pour cette étude intensive de la glace et les eaux sous-jacentes soient ceux indiqués sur la figure 34, et que ces stations soient divisées en deux catégories:

- i) les stations de mesures intensives et de contrôle (ex.: origine des eaux);
- ii) les stations de monitoring (ex.: évaluation temporelle).

Le choix de ces stations doit être fait selon les priorités suivantes:

- i) sites de fraie;
- ii) sites du tributaire principal;
- iii) centre du lac et;
- iv) sortie du lac.

Cette prioritisation des sites tient compte des objectifs tels que décrits dans la section 2.2

## 7. RÉFÉRENCES

- 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.
- Anderson, E.A., 1973. National Weather Service River Forecast System. Snow accumulation and ablation model. N.O.A.A. Tech. Mem., NWS Hydro-17, U.S. Dept. of Commerce, 217 p.
- Azzaria, L.M., Gélinas, P.J., Robitaille, R. et Wilhelmy, J.F., 1982. Étude géologique et hydrogéologique du lac Laflamme, Parc des Laurentides, Québec. Université Laval, Département de géologie, pour Environnement Canada. Direction générale des eaux intérieures, région du Québec, 95 p.
- Bédard, Y. and Jones, H.G. (1986). Sulfate dynamics in a boreal forest site during snowmelt. Proceedings of the 43<sup>rd</sup> Eastern Snow Conference, CREEL, New Hampshire, 4-6 June 1986: 45-54.
- Bengtsson, L. (1986). Dispersion in ice-covered lakes. Nordic Hydrology, 17: 151-170.
- 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, Dépt. de géologie, Univ. Laval, Québec, 238 pp.
- Booty, W.G. and Kramer, J.R., 1984. Sensitivity analysis of a watershed acidification model. Phil. Trans., Soc. Lond. B. 305: 441-449.
- Charette, J.Y., Jones, H.G., Sochanska, W. et Gauthier, J.M., 1984. Changes in lake water quality during spring runoff in a northern boreal forest subjected to acidic precipitation. Dans: Proceedings of the Canadian Hydrology Symposium no. 15. Université Laval, Québec, Canada. June 10-12, 1984. p. 201-220.

Chen, C.W., Gherini, S.A. and Goldstein, R.A. (1979). Modeling the lake acidification process. Dans: Ecological effects of acid precipitation. Report EA-79-6-LD (Workshop Proceedings; December 1979) of a workshop held in Galloway, United Kingdom, September 1978. Prepared by Central Electricity Research Laboratories, Surrey, United Kingdom for the Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Christophersen, N. Seip, H.M. and Wright, R.F., 1982. A model for streamwater chemistry a Birkenes, Norway. *Wat. Resour. Res.*, 18: 977-996.

Gunn and Keller, 1986. Effects of acidic meltwater on chemical conditions at nearshore spanning sites. *Water, Air, and Soil Pollution*, 30: 545-552.

Johannessen, M. and Henricksen, A. 1978. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resour. Res.* 14: 615-619.

Jones, H.G. and Bédard, Y. (1987). The dynamics and mass balances of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in meltwater and surface-runoff during spring melt in a boreal forest. In: "Forest Hydrology and Watershed Management". IAHS Publication No. 167: 19-31.

Jones, H.G., W. Sochanska, J.Y. Charette, J. Stein, 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., W. Sochanska, J.Y. Charette, J. Stein, 1985. Aspect qualitatif du développement au bassin du Lac Laflamme d'un modèle d'impact des précipitations acides - Phase de la fonte printanière de 1984. INRS-Eau pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région de Québec. 80 p.

Jones, H.G., W. Sochanska, J.Y. Charette, J.M. Gauthier, R. Bougie, 1984. Le développement d'une méthodologie d'étude sur les facteurs de contrôle de la qualité des eaux de ruissellement printanier au Lac Laflamme, Québec. INRS-Eau et Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région de Québec. 201 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 RS 165, 145 pp., 7 annexes pour Direction des eaux intérieures, Environnement Canada, Région de Québec.

Marmorek, D.R., Thornton, K.W., Baker, J.P., Bernard, D.P. and Reuber, D.P., 1986. Acidic Episodes in Surface Waters: The State of Science. Final report for the U.S. environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon, 232 pp.

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.

Rustad, S., Christophersen, N., Seip, H.M. and Aillon, P.J., 1986. Short-term acidification of streams and lakes as a result of snowmelt. A model for streamwater chemistry in a tributary to Harp Lake during snowmelt. Proceedings of the Muskoka Conf. on Acid Precipitation Water Air and Soil Poll.

Stein, J., Jones, H.G., Roberge, J. and Sochanska, W. (1986). The prediction of both runoff quality and quantity by the use of an integrated snowmelt model. In: Modelling snowmelt - induced processes". Editor E.M. Morris, IAHS Publication No 155: 347-358.

Seip, H.M., 1980. Acid snow-snowpack chemistry and snowmelt. In: T.C. Hutchinson and M. Havas (eds.). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York, pp. 77-94.

Welch, H.E. and Bergmann, M.A., 1985. Water circulation in small arctic lakes in winter". Can. J. Fish. Aquatic Sci., 42: 506-520.

Wheater, H.S., Bishop, K.H. and Beck, M.B., 1986. The identification of conceptual hydrological models for surface water acidification. Hydrological Processes, 1: 89-110.

Wright, R.F., 1983. Predicting acidification of North American Lakes. Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Oslo, Norway. Rep. No 0-81036. 165 pp. for U.S. Environmental Protection Agency.

Tableau 5

Bilan de masse pour  $\text{Ca}^{2+}$  (meq) pour la zone 1, 0 - 0.5 m, (figure 1) calculé à partir de i) tous les apports en eau dans la zone 1 du 23.04 à 25.04, 1983 et ii) des prélèvements des échantillons intégrés d'eau du 0 - 0.5 m le 25.04, 1983.

Masse totale de $\text{Ca}^{2+}$ dans la zone 1, 0 - 0.5 m, meq		
Apports i)		Échantillons "in situ" ii)
Eaux souterraines;	56	
Eaux hypodermiques;	397.1	
Eaux de ruissellement (R12, R13, ET9)*;	-	
Congères de rive;	0.1	
Glacé du lac;	0	
Pluie (infiltration)**.	2.4	
TOTAL	455.6	119.5

\* Contribution comprise dans les eaux hypodermiques;

\*\* En assumant que toute la pluie déposée sur la zone 1 le 24-25.04 (21 mm) s'est infiltrée dans les eaux sous-jacentes à la glace sans apport additionnel dû au lessivage de la glace blanche.

DATE D'ENREGISTREMENT A L'INRS-EAU: <sup>192</sup>  
ANNEE 86 MOIS Mars JOUR 14

NUMERO DE PUBLICATION A L'INRS-EAU:  
SERIE R NUMERO 246

FICHE EXPLICATIVE

AUTEUR(S) Jones, H.G.; Chesette, J.Y.; Leclerc, M.; Nantel, A.;  
Rohrger, J.; Boudreault, P.  
TITRE A cidification épisodique des eaux du lac Laflamme: synthèse  
des données physico-chimiques et hydrologiques des fontés  
SOUS-TITRE printanières 1983-1985.

SUJET/ MOTS-CLES / DESCRIPTEURS / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
/ \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

DATE DE PUBLICATION OU DE SOUMISSION: ANNEE 87 MOIS Dec JOUR \_\_\_\_\_

NATURE DE L'OUVRAGE (COCHER LA CASE APPROPRIÉE) / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

- 1- PUBLICATION DANS UNE REVUE AVEC JURY \_\_\_\_\_
- 2- PUBLICATION DANS UNE REVUE SANS JURY \_\_\_\_\_
- 3- CONFERENCE SANS JURY \_\_\_\_\_ DATE \_\_\_\_\_
- 4- CONFERENCE SUR INVITATION \_\_\_\_\_ DATE \_\_\_\_\_
- 5- CONFERENCE AVEC JURY - PUBLIEE \_\_\_\_\_ DATE \_\_\_\_\_  
- NON-PUBLIEE \_\_\_\_\_ DATE \_\_\_\_\_
- 6- RAPPORT INTERNE \_\_\_\_\_ MOIS \_\_\_\_\_
- 7- RAPPORT SCIENTIFIQUE - COMMANDITE (CONTRAT)  MOIS \_\_\_\_\_  
FINANCE PAR: - SUBVENTION \_\_\_\_\_ MOIS \_\_\_\_\_  
- INSTITUTIONNEL \_\_\_\_\_ MOIS \_\_\_\_\_  
(INRS-EAU  
UNIVERSITE DU QUEBEC)
- 8- COURS \_\_\_\_\_
- 9- DEMANDE DE SUBVENTION \_\_\_\_\_
- 10- COMMANDITE \_\_\_\_\_
- 11- OFFRE DE SERVICE \_\_\_\_\_
- 12- THESE: MOIS D'APPROBATION \_\_\_\_\_
- 13- AUTRE (PRECISER) \_\_\_\_\_

REFERENCE:

- POUR 1 ET 2 : NOM DE LA REVUE
- POUR 3,4,5 : NOM DU SYMPOSIUM OU DE LA CONFERENCE / ENDROIT
- POUR 6 ET 7 : NUMERO DU RAPPORT SCIENTIFIQUE OU INTERNE
- POUR 8 : NUMERO DE L'UNITE ET DE COURS
- POUR 9,10,11 : ORGANISME AUQUEL ON S'ADRESSE

RS 99 ?

PROFESSEUR: JONES SECRETAIRE: SUZANNE

COMPLETER CETTE FORMULE POUR CHAQUE PUBLICATION ET REMETTRE A : GAETAN GODBOUT