

**Record Number:****Author, Monographic:** Jones, H. G.//Sochanska, W.//Charette, J. Y.//Stein, J.**Author Role:****Title, Monographic:** 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**Translated Title:****Reprint Status:****Edition:****Author, Subsidiary:****Author Role:****Place of Publication:** Québec**Publisher Name:** INRS-Eau**Date of Publication:** 1985**Original Publication Date:** Mars 1985**Volume Identification:****Extent of Work:** 105**Packaging Method:** pages**Series Editor:****Series Editor Role:****Series Title:** INRS-Eau, Rapport de recherche**Series Volume ID:** 182**Location/URL:****ISBN:** 2-89146-180-0**Notes:** Rapport annuel 1984-1985**Abstract:** Rapport rédigé pour Environnement Canada  
15.00\$**Call Number:** R000182**Keywords:** rapport/ ok/ dl

INRS-Eau  
C.P. 7500  
Sainte-Foy (Québec)  
G1V 4C7

ASPECT QUALITATIF DU DÉVELOPPEMENT  
AU BASSIN DU LAC LAFLAMME  
D'UN MODÈLE PREDICTIF DE L'IMPACT  
DES PRÉCIPITATIONS ACIDES -  
PHASE DE LA FONTE PRINTANIÈRE DE 1984

par

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

W. SOCHANSKA<sup>1</sup>

Jean-Yves CHARETTE<sup>2</sup>

et

J. STEIN<sup>3</sup>

Rapport scientifique No 182

Mars 1985

<sup>1</sup> INRS-Eau  
<sup>2</sup> Environnement Canada  
<sup>3</sup> Université Laval



## Résumé

Une étude des concentrations des polluants atmosphériques dans la précipitation du couvert de neige et des eaux de fonte a permis le développement d'un modèle qualitatif de la fonte de neige; ceci a été intégré par la suite dans le modèle quantitatif de fonte d'Anderson (SNOW-17, Anderson, 1973) afin de structurer un modèle intégré de la fonte de neige printanière au lac Laflamme, Québec. Le modèle intégré simule l'évolution de la qualité des eaux de fonte, soit sur une base de hauteur de fonte cumulative, soit sur des périodes de temps de 24 hres. De plus, une étude complémentaire des eaux de ruissellement de surface et des eaux souterraines a démontré les influences respectives des eaux de fonte de neige et des eaux souterraines sur la qualité des eaux de ruissellement quand le niveau de la nappe souterraine s'élève pendant la fonte massive.

### Référence à citer:

Jones, H.G., W. Sochanska, J.Y. Charette et J. Stein (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. INRS-Eau, rapport scientifique no 182, 42 p., 12 t., 36 f. (Pour le compte du ministère de l'Environnement, Canada).

## Abstract

A study of atmospheric pollutant concentrations in precipitation, snowcover and meltwaters has permitted the development of a model for snowmelt quality; the model has subsequently been integrated into a quantitative snowmelt model (SNOW-17, Anderson, 1973). The resulting integrated model has been used to simulate meltwater quality evolution during the spring melt at Lac Laflamme, Québec. The simulations are based on either cumulative meltwater discharge from the snowpack or on daily melt periods. In addition, a complementary study on surface water runoff and groundwater quality has shown the influence of both the meltwater and the ground water respectively during the rise of the water table in the massive melt period. The results of the latter study will shortly be integrated into a quantitative model of surface and sub-surface water streamflow for the watershed (HYDFOR)

## TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
RÉSUMÉ	
ABSTRACT	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE LA CAMPAGNE DE 1984 .....	1
2. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE .....	2
2.1 Description du site .....	2
2.2 Installation et opération de l'équipement sur le terrain ....	3
2.3 Analyses de laboratoire .....	4
2.3.1 Préparation des échantillons pour analyse .....	4
2.3.2 pH .....	6
2.3.3 Alcalinité .....	6
2.3.4 Conductivité .....	6
2.3.5 Anions ( $\text{Cl}^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ ) .....	7
2.3.6 Métaux .....	7
2.3.7 Azote ammoniacal .....	7
2.4 Traitement des données .....	8
3. RÉSULTATS .....	9
3.1 Précipitation .....	9
3.2 Couvert de neige .....	9
3.3 Eaux de fonte (lysimètre L2) .....	10
3.4 Eaux de ruissellement hypodermique .....	10
3.5 Eaux souterraines .....	11
4. DISCUSSION .....	12
4.1 Évolution globale de la fonte de 1984: aspects hydrologiques et physico-chimiques .....	12
4.2 Bilans chimiques de la fonte de 1984 .....	14
4.3 Le modèle qualitatif des eaux de fonte .....	15
4.4 Résultats de l'application du modèle à la fonte de 1984 .....	24
4.5 Caractéristiques de l'eau de ruissellement .....	29
4.6 Évolution de l'acidité des eaux de ruissellement .....	30
4.7 Évolution des nitrates .....	33
4.8 Evolution des sulfates .....	34
5. CONCLUSION .....	38
6. RÉFÉRENCES .....	39
TABLEAUX ET FIGURES	

## LISTE DES TABLEAUX

1. Méthodologie d'analyses physico-chimiques des précipitations, de la neige, des eaux de fonte, des eaux de ruissellement et des eaux lacustres, lac Laflamme.
2. Nombre d'échantillons prévus par le contrat entre INRS-Eau et Environnement Canada pour la fonte de neige de 1984 au lac Laflamme et le nombre d'échantillons actuellement prélevés pendant la fonte.
3. Quantité et composition chimique des échantillons de précipitation captés par les collecteurs Sangamo au lac Laflamme, 1984.
4. Quantité et composition chimique de la neige au sol, lac Laflamme, 1984.
5. Quantité et composition chimique des eaux de fonte captées par le lysimètre (L2) au lac Laflamme, 1984.
6. Composition chimique des eaux du ruisseau hypodermique, lac Laflamme, 1984.
7. Composition chimique des eaux souterraines au lac Laflamme, avril-mai 1984.
8. Bilan hydrologique du lysimètre L2 et bilan hydrologique moyen des lysimètres L1, L2 et L3 pour la fonte de 1984 du lac Laflamme.
9. Acidité des eaux atmosphériques et de fonte 1984.
10. Bilan chimique (méq m<sup>-2</sup>; Al et Mn, mg m<sup>-2</sup>) pour la fonte de neige du 28 avril et du 20 mai 1984.
11. Les Valeurs des Co, Ho et K pour la fonte 1983 et 1984.
12. Composition chimique des eaux de fonte au lac Laflamme.

## LISTE DES FIGURES

1. Localisation du bassin du lac Laflamme.
2. Types géomorphologiques du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.
3. Stations d'échantillonnage sur le versant nord du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.
4. Evolution des températures journalières maximales et minimales à la station météorologique du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.
5. Evolution des précipitations journalières (pluie et neige) à la station météorologique du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.
6. Evolution de la décharge du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.
7. Relation entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte, dans les précipitations..
8. Relation entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte, dans la neige au sol.
9. Relation entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte, dans les eaux de fonte.
10. Relation entre les concentrations de la matière organique dissoute et le potassium, dans les eaux de fonte.
11. Relation entre les concentrations de la matière organique dissoute et le manganèse, dans les eaux de fonte.
12. Relation entre la matière organique dissoute et le déficit anionique calculé, dans les eaux de fonte.
13. Evolution de la concentration de  $H^+$  des eaux de fonte du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.
14. Evolution de la concentration de  $SO_4^{2-}$  des eaux de fonte du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.
15. Evolution de la concentration de  $NO_3^-$  des eaux de fonte du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.
16. Influence de la valeur K sur les résultats de simulation des concentrations en  $SO_4$ , dans les eaux de fonte.
17. Simulation de  $SO_4$  dans l'eau de fonte.

18. Simulation du  $\text{NO}_3$  dans l'eau de fonte.
19. Simulation de H dans l'eau de fonte.
20. Simulation des concentrations de  $\text{SO}_4^-$  dans l'eau de fonte calculée à l'aide du modèle SNOW-17 (Anderson 1973)
21. Simulation des concentrations de  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau de fonte calculée à l'aide du modèle SNOW-17 (Anderson 1973)
22. Simulation des concentrations de  $\text{H}^+$  dans l'eau de fonte calculée à l'aide du modèle SNOW-17. (Anderson 1973)
23. Valeurs observées et simulées de l'écoulement cumulé, concentrations de  $\text{SO}_4^-$  dans la neige et dans l'écoulement pendant la période de fonte 1984.
24. Valeurs observées et simulées de l'écoulement cumulé, concentrations de  $\text{NO}_3$  dans la neige et dans l'écoulement pendant la période de fonte 1984.
25. Valeurs observées et simulées de l'écoulement cumulé, concentrations de  $\text{H}^+$  dans la neige et dans l'écoulement pendant la période de fonte 1984.
26. Simulation du  $\text{SO}_4$  dans l'eau de fonte en 1983.
27. Simulation de  $\text{NO}_3$  dans l'eau de fonte en 1983.
28. Simulation de H dans l'eau de fonte en 1983.
29. Concentration moyenne des cations dans l'eau de fonte ( $\text{lys}^2$ ), dans l'eau de ruissellement (hypo) et dans l'eau souterraine (sout) au cours de la fonte de 1984.
30. Moyenne des concentrations des anions dans l'eau de fonte ( $\text{lys}^2$ ), dans l'eau de ruissellement (hypo) et dans l'eau souterraine (sout).
31. Taux d'acidité dans l'eau de fonte ( $\text{lys}$ ), dans l'eau de ruissellement (hypo) et dans l'eau souterraine (sout).
32. Débit, précipitation liquide et précipitation solide pendant la période de fonte de 1984.
33. Niveaux de l'eau dans les puits souterrains A, B et C pendant la période de fonte de 1984.
34. Niveaux de l'eau dans les puits souterrains F, G, H, I et J pendant la période de fonte de 1984.
35. Concentration en nitrate dans l'eau de fonte, dans le ruisseau hypodermique et dans les eaux souterraines.
36. Concentration des sulfates dans l'eau de fonte, dans le ruisseau hypodermique et dans les eaux souterraines.

## 1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE LA CAMPAGNE DE 1984

Plusieurs auteurs (Galloway et al., 1980; Jeffries et al., 1979; Johannessen et al., 1980; Skartveit et Gjessing, 1979) ont suggéré que la libération massive de polluants atmosphériques du couvert de neige durant la fonte printanière était responsable du choc acide printanier. L'étude de Jones et al. (1984) a montré que le choc acide printanier au lac Laflamme correspondait à la période où le débit et le ruissellement de surface sont maximums, mais non à la période où l'acidité de l'eau de fonte est maximale. Jones et al. (1984) ont aussi montré que l'acidité de l'eau de ruissellement était souvent plus élevée que celle de l'eau de fonte.

Suite à ces observations, les travaux de terrain de la campagne sur la fonte de neige au lac Laflamme en 1984 visaient essentiellement deux objectifs:

- 1) développer les bases d'un modèle prédictif de la qualité de l'eau de fonte et mettre en relation l'évolution quantitative du stock de neige et l'évolution de la qualité de l'eau de fonte. Ceci afin d'intégrer les aspects qualitatifs des eaux de fonte dans le modèle quantitatif de fonte d'Anderson (1973);
- 2) établir les relations entre les mesures quantitatives et qualitatives de l'eau de fonte et celles de l'eau de ruissellement hypodermiques. Ceci afin de vérifier l'hypothèse que les polluants atmosphériques accumulés dans le couvert de neige sont responsables du choc acide printanier au lac Laflamme.

## 2. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

### 2.1 Description du site

Le bassin du lac Laflamme (altitude 777 m - 884 m; 46°11'N - 74°57'O) est localisé dans la forêt Montmorency (parc des Laurentides, Québec) à 80 km au nord de la ville de Québec (figure 1). 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, étant seulement de 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, 1975; Plamondon, 1981). Le till et la moraine recouvrent la presque totalité du bassin sauf pour deux zones occupées par des tourbières à chaque extrémité du lac (figure 2).

Le réseau de drainage du lac est peu développé; les nombreux petits ruisseaux qui alimentent la cuvette lacustre ont un régime intermittent sauf pour le ruisseau principal qui semble maintenir un ruissellement 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 (Azzaria et al., 1982). Pendant cette période, les eaux de fonte se déplacent sur les versants du bassin ayant une pente médiane de 8.7% (minimum 0%, maximum 30%).

## 2.2 Installation et opération de l'équipement sur le terrain

Pour la collecte des précipitations, deux collecteurs automatiques de type Sangamo ont été installés dans le sous-bois aux sites SA et SB (figure 3). Le couvert de neige a été échantillonné par la méthode de tranchée à la pelle (Jones et al., 1984) aux stations 6, 9 et 11 et celle de deux lignes de neige (WE et NS), dont la couverture végétale et le sol ont déjà été nettoyés et partiellement nivelés dans le cadre d'un programme régulier de l'INRS-Eau sur les études physico-chimiques de neige. L'équivalence en eau de la hauteur de neige a été calculée à partir des volumes des échantillons de neige recueillis et ceux des échantillons fondus en laboratoire. De plus, la densité de la neige a été mesurée directement sur le terrain par l'utilisation d'un densitomètre suédois (AB Produktionmater Stockholm).

Les eaux de fonte ont été recueillies par un lysimètre (1 m<sup>2</sup>) à la station L2. Le lysimètre, un bac rigide en fibre de verre gris (longueur: 1 m; largeur, 1 m; hauteur: 0.3 m), a été installé afin que le fond repose sur le premier horizon du sol minéral. Le bac a été nivelé et un lit forestier artificiel de terre organique, de branches et d'herbacées fut placé autour de la paroi afin que le ruissellement vertical des eaux de fonte se fasse dans des conditions aussi naturelles que possible. Pour éviter le réchauffement local de la neige par la radiation émise par la paroi du lysimètre pendant les jours ensoleillés, une feuille de mousse de polystyrène a été placée pour protéger la paroi du lysimètre de la radiation directe du

soleil, sans toutefois mettre la neige du lysimètre à l'ombre. Les décharges du lysimètre ont été recueillies dans un récipient en plastique (45 litres) placé plus profondément dans le sol; ce récipient a été protégé des divers dépôts en provenance de l'atmosphère et de la voûte forestière par un couvercle.

Les eaux du ruisseau hypodermique ont été prélevées à la station de jaugeage d'Environnement Canada au ruisseau intermittent situé à 50 m au sud-est de la ligne de neige WE (figure 3). Les eaux souterraines ont été prélevées au moyen d'une pompe péristaltique au piézomètre A proche du lac.

## 2.3 Analyses de laboratoire

### 2.3.1 Préparation des échantillons pour analyse

Les échantillons récoltés sur le terrain (précipitation, neige, eaux des lysimètres, eaux du ruisseau hypodermique) étaient apportés au laboratoire de l'INRS-Eau à Québec aussitôt après leur cueillette ou dans un délai maximal de 24 heures. On laissait fondre à la température ambiante (23°C) les échantillons solides; des béciers en plastique servaient comme contenants pour la fonte. Aussitôt la fonte terminée, on mesurait le volume de liquide obtenu avec un cylindre gradué en plastique.

Toute la vaisselle qui venait en contact avec les échantillons était trempée dans l'acide nitrique 15% (v/v) pendant 24 heures, rincée plusieurs fois à l'eau déminéralisée, trempée pendant 24 heures dans l'eau déminéralisée et rincée à l'eau ultrapure. Les contenants servant à entreposer les sous-échantillons pour le dosage des anions furent rincés à l'eau ultrapure seulement.

Tous les échantillons furent filtrés sur un système en polycarbonate (Sartorius no SM16-510) avec un filtre en polycarbonate (Nucléopore) de 47 mm de diamètre et de 0.4  $\mu\text{m}$  de porosité. Le filtre était posé avec des pinces en plastique et rincé avec 50 ml d'eau ultrapure dont la conductivité était inférieure à 1  $\mu\text{S/cm}$  (système Millipore Milli-Q3R0/Milli-Q2). Après avoir enlevé l'eau de rinçage, on filtrait l'échantillon. Dépendant de la vitesse de filtration, on utilisait un ou plusieurs filtres pour filtrer l'échantillon total dans un délai raisonnable. Un sous-échantillon était placé dans un contenant de polyéthylène linéaire pour le dosage des anions, du pH et de l'alcalinité; on le conservait à 4°C et à l'obscurité. Un autre sous-échantillon, servant aux dosages des métaux, fut mis lui aussi dans un contenant en polyéthylène; on ajoutait de l'acide nitrique (Aristar) pour obtenir une concentration finale de 0.5%. Un troisième sous-échantillon était conservé avec  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Aristar) à une concentration de 0.2% v/v et à 4°C pour le dosage ultérieur de l'azote ammoniacal. Toutes les analyses ont été faites d'après les méthodes reconnues (EPA, 1979) et à l'intérieur des délais de conservation recommandés.

### 2.3.2 pH

La mesure du pH fut faite à l'aide d'un pHmètre (Radiometer PHM26) et d'une électrode combinée. La calibration fut faite à l'aide d'un tampon pH = 7.0 et pH = 4.0 (Fisher Scientifique Ltée) à tous les jours où il y a eu mesure du pH.

### 2.3.3 Alcalinité

On mesure l'alcalinité selon Gran (Kramer, communication personnelle). À 50 ml d'échantillon, on ajoute 0.5 ml de NaCl pour contrôler la force ionique. On fait ensuite des ajouts successifs de 0.1 ml de HCl étalonnés à 0.01 N jusqu'à une valeur de pH de 3.7, tout en notant les valeurs de pH correspondant à chaque ajout d'acide. À partir de ces données, on calcule une régression linéaire qui permet d'obtenir le volume équivalent d'acide, ce qui donne, après calcul, l'alcalinité. Comme contrôle, on dose un blanc et un étalon de 100  $\mu$ M.

### 2.3.4 Conductivité

On mesure la conductivité des échantillons à 25°C à l'aide d'un conductivimètre Radiometer.

### 2.3.5 Anions (Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>=</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Ces quatre anions sont dosés simultanément par le chromatographe ionique Dionex 12S. L'échantillon est injecté à l'entrée de la colonne de séparation par un échantillonneur automatique. L'échantillon passe à travers la colonne, entraîné par l'éluant (NaHCO<sub>3</sub>·0024M, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·0030M). La séparation des différents constituants anioniques s'effectue en moins de 10 minutes. Un suppresseur permet d'abaisser la conductivité de base. Un conductivimètre placé après le suppresseur permet de mesurer en continu la conductivité; on obtient une lecture de conductivité directement proportionnelle à la concentration de chaque anion. On se réfère à une courbe de calibration obtenue à l'aide d'étalons connus.

### 2.3.6 Métaux

Le dosage des métaux se fait par spectrophotométrie à absorption atomique avec flamme (Varian, modèle 575) pour le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium. On se réfère à une courbe de calibration obtenue à l'aide d'étalons connus. Le manganèse et l'aluminium se dosent par la fournaise au graphite (Varian G7A95 avec A.A. Varian 1275) avec injection automatique. On se réfère à une courbe de calibration.

### 2.3.7 Azote ammoniacal

L'analyseur automatique Technicon permet de mesurer par une méthode colorimétrique l'azote ammoniacal. Une courbe d'étalonnage préparée dans la même matrice sert de référence.

Le tableau 1 résume ces méthodes d'analyse, les unités de mesure et le seuil de détection pour chaque paramètre.

#### 2.4 Traitement des données

Les étapes du traitement numérique des résultats des échantillons sont les suivantes:

- entrée des données en formats accessibles à l'ordinateur;
- les données pour certains paramètres ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{=}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ) ont été mesurées en hauteur de pic de chromatographie. En utilisant la méthode d'ajustement des courbes (méthode des moindres carrés), on a calculé la concentration desdits paramètres en  $\mu\text{éq L}^{-1}$ ;
- calcul de la charge totale et de la variation de la charge totale à partir des concentrations moyennes géométriques pour les précipitations, le couvert de neige et les eaux du lysimètre;
- calcul de l'Al inorganique selon le programme de Campbell (communication personnelle). Calcul du pH théorique;
- distribution des paramètres journaliers aux différentes stations d'échantillonnage et leur inter-comparaison (corrélation, régression).

### 3. RÉSULTATS

À compter de la signature du contrat entre Environnement Canada et l'Institut national de la recherche scientifique, le 24 avril, les échantillons ont été prélevés tous les jours (tableau 2). De plus, un pré-échantillonnage effectué le 18 avril nous a permis de recueillir les premières eaux de fonte pendant la fonte massive qui a commencé les 14-15 avril.

#### 3.1 Précipitation

Les mesures physiques et physico-chimiques des échantillons de neige et de pluie recueillis par les deux capteurs Sangamo sont reproduites dans le tableau 3. Quoique le dernier échantillonnage pertinent aux présents travaux ait eu lieu le 13 mai, nous avons inclus pour fin de comparaison les résultats des événements du 23 et du 24 mai. Les précipitations du 15 et du 16 mai ne se déposaient qu'en quantités faibles et par conséquent, elles ont eu très peu d'effets sur la qualité des eaux de fonte.

#### 3.2 Couvert de neige

Cinq échantillons du couvert de neige ont été prélevés le 28 avril. Par la suite, un échantillon intégré du couvert a été prélevé à la ligne de neige NS après les événements de précipitation les 1, 6, 9 et 13 mai; un échantillon supplémentaire a été recueilli le 7 mai afin de mieux suivre l'évolution chimique du couvert comprenant une chute de neige fraîche (6 avril) pendant une journée de fonte sans pluie. Les résultats des ana-

lyses de ces échantillons sont reproduits dans le tableau 4. Pour l'étude de la modélisation de la fonte, un pré-échantillonnage du couvert a été effectué le 18 avril: les résultats de l'analyse de cet échantillon sont reproduits dans la section 4.4.

### 3.3 Eaux de fonte (lysimètre L2)

Selon les conditions météorologiques et le débit de fonte dans le lysimètre, les échantillons de fonte ont été prélevés soit le matin vers 10h, soit l'après-midi vers 15h30. Les résultats de la quantité et de la qualité de ceux-ci sont reproduits dans le tableau 5. Vu la disponibilité des données de deux autres lysimètres (L1 et L3, figure 3) de construction identique au lysimètre L2, nous avons, pour fins de modélisation et calculs des bilans chimiques de la fonte, utilisé toutes les données des lysimètres disponibles.

### 3.4 Eaux de ruissellement hypodermique

Trente échantillons d'eaux de ruissellement ont été prélevés entre le 24 avril et le 23 mai. Pour fins d'analyse plus approfondie sur la qualité de ces eaux au début de la fonte massive et durant la période après-fonte, deux échantillons supplémentaires ont été recueillis le 18 avril et le 24 mai. Les résultats des analyses de ces échantillons sont reproduits dans le tableau 6.

### 3.5 Eaux souterraines

Le tableau 7 reproduit les résultats des analyses physico-chimiques des huit échantillons des eaux souterraines prélevés entre le 24 avril et le 12 mai.

#### 4. DISCUSSION

##### 4.1 Évolution globale de la fonte de 1984: aspects hydrologiques et physico-chimiques

Si on néglige la période de fonte de neige du 12 au 20 février (2.7 cm d'eau) due à la pluie, le couvert de neige au lac Laflamme a connu deux périodes de légères fontes, soit du 20 au 23 mars (2.5 cm d'eau) et les 6 et 7 avril (1.9 cm d'eau). La fonte continue a débuté entre le 11 et le 15 avril (4.7 cm) suite à un réchauffement de l'air (figure 4). Par la suite, la fonte a progressé selon les étapes suivantes: une période de forte pluie les 16 et 17 avril suivie par une fonte sans précipitation (18-30 avril; sauf pour des précipitations traces le 20 avril). Après, la pluie du 1er mai, il y a eu une nouvelle accumulation de neige fraîche (2-6 mai), une fonte sans pluie (7-8 mai) et, finalement, trois événements majeurs de pluie (9, 12 et 13 mai) avant que le couvert ne diminue en bancs de neige durcie et discontinue le 20 mai. À titre d'exemple, les figures 5 et 6 reproduisent respectivement la précipitation et l'écoulement du lysimètre L2 pendant la totalité de la fonte principale dont le débit maximal a été enregistré le 13 mai pendant une fonte avec pluie.

À partir des données quantitatives des lysimètres L1 et L3 et/ou du lysimètre L2, de la précipitation à la station météorologique de la forêt Montmorency à 1 km du bassin versant du lac Laflamme, des deux capteurs Sangamo et de l'équivalence en eau dans le couvert de neige les 18 et 28 avril ainsi que le 20 mai, nous avons calculé le bilan hydrologique de la

fonte à la station L2 pour les périodes du 18 avril (tableau 8) et du 20 mai 1984 et le bilan hydrologique moyen aux stations L1, L2 et L3 pour les périodes du 28 avril et du 20 mai 1984. Le bilan de la première période démontre la précision dans le calcul du bilan à un site (L2) en particulier. Le bilan de la deuxième période est utilisé pour le calcul des bilans chimiques des espèces ioniques. Ce deuxième calcul de bilan est plus représentatif de la couverture forestière du bassin versant étant donné qu'il y a plus de mesures sur la physico-chimie du couvert de neige (5 échantillons, stations 6, 9, 11 WE, NS, le 28 avril 1984) aux stations de divers degrés de couverture que le premier (1 échantillon, station WE, le 18 avril 1984).

Pour plus de représentativité, nous avons donc de plus considéré les valeurs moyennes des trois lysimètres (L1, station demi-couverte; L2, station couverte et L3, station couverte) pour le calcul de ce bilan. Pour la détermination du bilan hydrologique pour la première période, nous avons inclus dans le calcul la quantité de précipitations mesurée à la station météorologique de la forêt Montmorency. Pour la deuxième période, nous avons inclus la quantité réelle de précipitations captée par les collecteurs Sangamo au lac Laflamme car la qualité des échantillons de ceux-ci est utilisée pour le calcul des bilans physico-chimiques. Ceci découle du fait qu'à la station de la forêt Montmorency, aucune mesure qualitative des précipitations n'est faite. Il y a toutefois une régression très significative ( $H_s = H_f + 0.27$ ,  $r^2 = 0.94$ ,  $n = 8$ ) entre les valeurs des précipitations enregistrées à la forêt Montmorency ( $H_f$ ) et celles captées par les appareils Sangamo ( $H_s$ ) au bassin versant du lac Laflamme.

En ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux de précipitation, du couvert de neige et des eaux de fonte, chaque type d'eau démontre une forte corrélation entre l'acidité de ces eaux et les concentrations des anions d'acidité forte (tableau 9; figure 7, précipitation; figure 8, neige au sol; figure 9, eaux de fonte). Toutefois, ces régressions d'acidité démontrent que les eaux de précipitation (figure 7) sont plus acides que les eaux de fonte (figure 8) et celles stockées dans le couvert de neige (figure 9). Nous avons déjà souligné (Jones et al., 1984) un apparent écart entre l'acidité du couvert de neige et celle des eaux de précipitation; nous avons de plus proposé que la matière organique en provenance de la voûte forestière pourrait jouer un rôle non négligeable dans la diminution relative de l'acidité dans la neige au sol par rapport aux précipitations. Quoique nous n'ayons aucune preuve directe de ce phénomène, les corrélations significatives entre les concentrations de matière organique dissoute et les cations  $K^+$  (figure 10) et  $Mn^{++}$  (figure 11) et le déficit anionique calculé (figure 12) dans les eaux de fonte pourraient être indicatives d'une telle influence de la matière organique sur l'acidité des eaux de précipitation une fois déposées sur terre.

#### 4.2 Bilans chimiques de la fonte de 1984

À partir du bilan hydrologique moyen des lysimètres L1, L2 et L3, de la qualité physico-chimique des précipitations (tableau 3), du couvert de neige des 28 avril et 20 mai (tableau 4) et des eaux de fonte (tableau 5 et, comme exemple, le lysimètre L2, figure 13,  $[H^+]$ , figure 14,  $[SO_4^{=}]$ , figure 15,  $[NO_3^-]$ ), nous avons établi les bilans physico-chimiques pour toutes les

espèces ioniques entre le 28 avril et le 20 mai 1984 (tableau 10). Ces bilans sont à considérer dans la mesure où ils démontrent qu'il existe des apports supplémentaires de polluants atmosphériques au couvert de neige autres que ceux apportés par la précipitation humide pendant la période de la fonte (voir discussion section 4.4).

#### 4.3 Le modèle qualitatif des eaux de fonte

Le modèle de base conceptuel pour la qualité des eaux de fonte est dérivé des observations de Johannessen et Henriksen (1978) sur les fontes contrôlées en laboratoire et "in situ". L'évolution de la qualité de ces eaux déchargées progressivement du couvert de neige a été décrite par des expressions mathématiques formulées par Foster (1978). Le modèle fait appel aux processus de lessivage des polluants atmosphériques du stock de neige par les eaux de fonte pendant le ruissellement vertical d'eau libre générés sur la surface du stock de neige par échange thermique entre l'air et le couvert au sol. L'hypothèse veut que chaque lame d'eau produite par ce dernier phénomène contienne la même concentration moyenne du stock de neige au moment de sa production mais que la concentration de la lame augmente par un processus de lessivage pendant son temps de séjour dans le stock de neige selon l'équation (1):

$$\frac{\delta(c\bar{v})}{\delta\bar{v}} = c + k\bar{v} \quad (1)$$

où  $c$  : concentration du polluant sous forme ionique dans la neige

$\bar{v}$  : volume de neige

$k$  : coefficient de lessivage de la neige par les eaux de fonte

Pour les fins de la présente étude sur la qualité des eaux de fonte au lac Laflamme, nous avons dérivé les deux expressions suivantes (équations (2) et (3)) pour la qualité des eaux de fonte.

$$C = C_0 e^{-k(H_0 - H_i)} \times (1 + kH_i) \quad (2)$$

où C : concentration du polluant atmosphérique dans les eaux de fonte  
( $\mu\text{éq L}^{-1}$ )

$C_0$  : concentration du polluant atmosphérique dans le couvert de neige avant la fonte ( $\mu\text{éq L}^{-1}$ )

$H_0$  : hauteur de la lame équivalente en eau du couvert de neige avant la fonte (mm)

$H_i$  : hauteur de la lame équivalente en eau du couvert de neige au moment de la décharge des eaux de fonte de concentration c (mm)

Cette expression est similaire au modèle le plus simple de Foster dont la valeur de k reste constante pendant toute la fonte de neige. Ce modèle génère les valeurs instantanées de la qualité des eaux de fonte pendant la disparition du couvert de neige. Contrairement à l'expression de Foster, nous avons choisi d'exprimer la progression de la qualité de la fonte par la hauteur de la lame équivalente en eau du couvert de neige à chaque étape de la fonte au lieu du volume du couvert trouvé dans l'expression de Foster.

$$[C]_{i \rightarrow i+1} = \frac{C_0}{(H_i - H_{i+1})} [H_i e^{-k(H_0 - H_i)} - H_{i+1} e^{-k(H_0 - H_{i+1})}] \quad (3)$$

où  $[C]_{i \rightarrow i+1}$  : concentration moyenne du polluant atmosphérique de la lame d'eau de fonte issue du stock de neige ( $\mu\text{éq L}^{-1}$ ) pendant l'étape de la fonte de  $i \rightarrow i+1$

$[H_i]$  : hauteur de la lame équivalente en eau du couvert de neige au début de la production de la lame d'eau de fonte de  $i \rightarrow i+1$  (mm)

$[H_{i+1}]$  : hauteur de la lame équivalente en eau du couvert de neige immédiatement après la décharge de la lame d'eau de fonte ( $i \rightarrow i+1$ ) du couvert de neige (mm)

$[H_0]$  : hauteur initiale de la lame équivalente en eau du couvert de neige au tout début du processus de production des eaux de fonte (mm)

$[C_0]$  : concentration initiale du polluant atmosphérique dans le couvert de neige au tout début du processus de production des eaux de fonte ( $\mu\text{éq L}^{-1}$ )

Cette dernière expression est mieux adaptée à notre méthodologie de travail sur la fonte de neige au lac Laflamme. En effet, la collecte des eaux de fonte par les lysimètres sépare la fonte totale en tranches discrètes de fonte. Les analyses physico-chimiques de ces eaux représentent donc la concentration moyenne d'une lame d'eau captée pendant une période bien définie de fonte dont les valeurs de  $[H_i]$  et  $[H_{i+1}]$  sont mesurées sur le terrain ou simulées par le modèle quantitatif de Anderson (1973). L'hypothèse de départ de l'équation (3) est que le ruissellement vertical des

eaux de fonte est de type "piston flow" utilisé dans plusieurs modèles hydrologiques. Il faudrait toutefois porter à l'attention du lecteur qu'en réalité, l'écoulement des eaux de fonte à travers la couverture de neige est souvent de nature très hétérogène (Jones et al., 1984, Marsh et Woo, 1985), ce qui peut provoquer des écarts appréciables entre la qualité de la fonte observée et la qualité simulée par ce modèle analytique et simple.

Les observations originales de Johannessen et Henriksen (1978) ont donné naissance au développement de plusieurs expressions pour décrire la qualité des eaux de fonte. Christophersen et al. (1984) ont dérivé une expression qui englobe la somme de deux équations exponentielles. Ces auteurs, toutefois, ne donnent pas de précisions sur l'expression exacte utilisée. Booty et Kramer (1984) ont utilisé une équation exponentielle dont la valeur de  $k$  a été dérivée directement des observations de Johannessen et Henriksen; l'optimisation de leur modèle par une comparaison entre des mesures de la qualité des eaux de surface (les eaux de fonte n'ont pas été échantillonnées) "in situ" et les valeurs générées par la simulation de leur modèle leur a permis d'ajuster la valeur de  $k$  pour la fonte au site du bassin versant de Batchawana Lake, en Ontario. Chen et al. (1978) se sont servis d'une expression similaire à celle des derniers auteurs pour le modèle ILWAS (Integrated Lake Watershed Acidification Study) appliqué aux lacs des Adirondacks, à New York. Il faudrait noter néanmoins que tous ces modèles ont été appliqués à chaque système en particulier d'une façon théorique; il n'y a eu en aucun cas de mesures de qualité des eaux de fonte captées "in situ" par des lysimètres afin de vérifier si la qualité réelle des eaux de fonte était similaire à celle générée par les modèles respectifs.

Dans l'étude de la fonte de neige au lac Laflamme, nous avons opté de notre côté pour une étude intensive de la qualité des eaux de fonte sur le terrain avec des lysimètres ( $1 \text{ m}^2$ ). Cette approche est justifiée, car une analyse de sensibilité du modèle (équation (3)) démontre que la qualité des eaux de fonte est considérablement influencée par la valeur de  $k$  (figure 16). Nous avons déjà démontré (Jones, communication personnelle) que les valeurs de  $k$  déterminées par des fontes contrôlées des divers échantillons de neige en laboratoire peuvent varier les unes des autres d'une façon appréciable selon l'âge, la structure et le degré de métamorphisme de la neige. La valeur de  $k$  peut changer aussi pendant une fonte en continue; ce phénomène a amené Foster (1978) à proposer trois expressions différentes pour le modèle afin d'accomoder cette variabilité de  $k$ . Nous ne sommes pas présentement en mesure d'évaluer a priori des valeurs de  $k$  pour le couvert de neige, soit pendant la même fonte, soit pour des fontes successives. En effet, de toutes les variables de l'équation (3), elle est la plus difficile à mesurer ou à évaluer sur le terrain. Toutefois, nous poursuivons une voie complémentaire de recherche qui a pour objectif d'établir les relations entre certains paramètres physico-chimiques de la neige au sol facilement mesurés sur le terrain et les valeurs concomitantes de  $k$  pour la fonte.

La mise en marche du modèle dépend des conditions météorologiques; dès que les conditions énergétiques favorisent la production d'une lame de fonte, le modèle génère la concentration moyenne des lames progressives des eaux de fonte déchargées par le couvert de neige. Pour la fonte de 1984, nous avons utilisé le modèle qui simule la qualité de ces eaux par période de 24 h; ceci en effet représente approximativement le temps entre les pré-

lèvements successifs des eaux de fonte captées par les lysimètres. Quand la fonte est arrêtée par le gel, le modèle est mis en attente pour la prochaine fonte. Si, entretemps, il y a accumulation de neige, l'équation (3) est réajustée en fonction des nouvelles valeurs de  $C_0$  et  $H_0$  de la neige au sol pour la fonte suivante.

Pendant les périodes de pluie, le modèle est modifié pour fin de simulation de la qualité des eaux de fonte en tenant compte de la quantité et de la qualité des précipitations telles que mesurées par les capteurs Sangamo (équation (4), tableau 12):

$$C_{i \rightarrow i+1} = \frac{[C_L H_L] - [C_p (H_p - A)]}{H_L - [H_p + A]} \quad (4)$$

où  $C_{i \rightarrow i+1}$  : concentration ionique dans les eaux de fonte en provenance du couvert de neige ( $\mu\text{éq L}^{-1}$ )

$C_L$  : concentration ionique mesurée dans la lame totale d'eau captée par le lysimètre ( $\mu\text{éq L}^{-1}$ )

$H_L$  : lame totale d'eau captée par le lysimètre (mm)

$C_p$  : concentration ionique mesurée dans la lame d'eau captée par le collecteur de précipitation ( $\mu\text{éq L}^{-1}$ )

$H_p$  : lame totale de pluie captée par le collecteur de pluie (mm)

- A : lame de pluie retenue par le couvert de neige =  $FH_N$   
où  $H_N$  : hauteur de la lame équivalente en eau du couvert de  
neige à la fin de la période de fonte
- F : 0.1 pour un couvert de neige de densité  $\approx 0.2$   
0.07 pour un couvert de neige de densité  $\approx 0.3$

Au fur et à mesure que la fonte progresse, le couvert de neige diminue et  $H_L - [H_p + A] \rightarrow 0$ ; l'imprécision du modèle augmente donc de façon significative. Le modèle est aussi imprécis pour les périodes de précipitation mixte (neige, pluie et grésil) car nos capteurs de précipitation au lac Laflamme ne peuvent présentement distinguer les composants hydrologiques de ce type de précipitations en temps réel.

En ce qui concerne l'aspect prédictif du modèle qualitatif intégré au lac Laflamme, les pluies et précipitations mixtes s'avèrent un problème majeur vu la difficulté de prévoir, a priori, la qualité précise des événements de précipitation.

L'intégration de l'équation 4 dans le modèle pour les périodes pluvieuses présuppose que la valeur constante de lessivage  $k$  ne change pas pendant, ou après, les événements. Nous n'avons présentement que très peu d'indices pour affirmer ce fait; il reste donc une autre étape à préciser dans, le développement du modèle qualitatif, c'est-à-dire la variabilité de  $k$  en passant d'une fonte sans pluie à une fonte avec pluie.

À partir de la concentration d'une espèce ionique ( $C_0$ ) mesurée dans le couvert de neige dont la lame équivalente en eau est  $H_0$  et la concentration  $[C_{i \rightarrow i+1}]$  mesurée directement par analyse des échantillons prélevés dans le lysimètre ( $H_{i \rightarrow i+1}$ ) pendant une fonte sans précipitation ou calculée par l'équation (4) pendant une fonte avec précipitations, une valeur optimale de  $k$  est calculée pour le modèle conceptuel (équation (3)) par la méthode des moindres carrés. Par la suite, la qualité des eaux de fonte est générée pour des périodes plus précises ou pour des taux divers de décharge voulus.

La valeur de  $k$  est validée par une comparaison entre le calcul de la décharge physico-chimique totale de fonte (par la sommation des bilans théoriques et individuels des lames de fonte) et la charge totale mesurée dans le couvert de neige au début de la fonte. Cette méthode de validation est néanmoins basée sur l'hypothèse qu'aucun apport autre que celui contenu dans le couvert de neige au début de la fonte contribue à la qualité des premières lames de fonte. Cette hypothèse ignore donc les apports des polluants au couvert de neige par les dépôts secs des particules atmosphériques de petite taille ou les dépôts de poussière minérale et de débris organiques en provenance des sources locales.

Le tableau 10 démontre que pour les espèces ioniques majeures  $H^+$ ,  $NO_3^-$  et  $SO_4^{=}$ , la quantité (charge  $m\acute{e}q\ m^{-2}$ ) captée par les lysimètres est approximativement égale à la charge contenue dans le couvert de neige le 28 avril plus la charge totale apportée par les précipitations pendant cette période particulière de la fonte (28 avril - 20 mai 1984). Il semble donc qu'il y ait eu très peu d'apports supplémentaires pendant cette période, ce qui

renforce la justification d'utiliser le modèle proposé (équation (3)). Toutefois, il faudrait souligner que la période pour laquelle nous disposons d'assez de données pour le calcul des bilans chimiques pour toutes les espèces ioniques ne correspond pas à la période de la simulation de fonte de  $H^+$ ,  $NO_3^-$  et  $SO_4^{2-}$ . De plus, il faudrait souligner que les résultats des bilans chimiques pour 1984 sont en opposition à ceux rapportés sur la fonte de 1983 (Jones et Sochanska, 1984). Dans le cas de 1983, les données disponibles ont permis les calculs de bilan sur une plus longue période (20 mars - 11 mai, 52 jours); dans ce cas, les calculs de bilans ont démontré les apports supplémentaires de toutes les espèces ioniques sauf  $H^+$ . Ces auteurs ont attribué ces apports supplémentaires aux phénomènes de sédimentation par dépôts secs, le lessivage de débris organiques dans le couvert de neige par la pluie et les eaux de fonte et de lessivage de la voûte forestière par la pluie et la neige mouillée pendant des événements de précipitation.

En dépit de ces résultats contradictoires, l'utilisation du modèle (équation (3)) pour la simulation de la qualité des eaux de fonte pendant de courtes périodes de temps (5-10 jours) peut se justifier dans la mesure où la méthodologie d'utilisation prévoit des ajustements périodiques de  $C_0$ ,  $C_i$ ,  $H_0$  et  $H_i$ . Ces courtes périodes sont en effet les plus critiques de décharge des eaux d'acidité élevée du couvert de neige; ceci particulièrement au début de la fonte continue et massive.

#### 4.4 Résultats de l'application du modèle à la fonte de 1984

Pour la période de fonte de 1984, le modèle a été ajusté pour les deux fontes majeures enregistrées par les lysimètres, en occurrence les fontes du 18 avril → 30 avril (sans précipitation) et celle du 6-8 mai (pluie le 8 mai). Les valeurs de  $C_0$  pour  $SO_4^{=}$ ,  $NO_3^-$  et  $H^+$  dans le couvert de neige ont été de 8.95, 10.52 et 13.5 respectivement; la valeur de  $H_0$  a été de 455 mm. La figure 16 démontre les valeurs observées pour les concentrations de  $SO_4^{=}$  dans les diverses lames de fonte (valeurs moyennes pour les trois lysimètres L1, L2 et L3) et celles générées par le modèle (équation (3)) dont la valeur de  $k$  est choisie par la méthode des moindres carrés. La figure 17 reproduit les mêmes valeurs observées que celles de la figure 16, sauf pour la concentration de  $SO_4$  du jour 121, de la première fonte; cette concentration est en effet calculée à partir des données sur la pluie et celles des lysimètres par équation 4 qui tient compte de la rétention (A) d'une quantité de pluie par la neige.

Nous avons choisi de baser la discussion sur les résultats obtenus à partir de l'utilisation de l'équation 4 quoique celle-ci, dans sa forme présente, est sujette à révision. Enfin, et pour les raisons énumérées ci-dessous, la concentration de  $SO_4$  du jour 115 est exclue des données utilisées pour l'ajustement de la valeur de  $k$ , par la méthode des moindres carrés. Les figures 18 et 19 reproduisent les valeurs observées et calculées de concentration et les courbes d'ajustement de  $k$  pour le  $NO_3^-$  et le  $H^+$  respectivement. Le tableau 11 reproduit les valeurs de  $k$  pour  $SO_4^{=}$ ,  $NO_3^-$  et  $H^+$  dans le couvert de neige pendant la fonte de 1984.

On remarque que les valeurs de  $k$  pour  $\text{SO}_4^{=}$  (Figure 17) et  $\text{NO}_3^-$  (Figure 18) dans la première fonte sont très similaires. Toutefois, la valeur de  $k$  pour  $\text{H}^+$  est relativement plus basse que celle de  $\text{SO}_4^{=}$  et celle de  $\text{NO}_3^-$ . Vu l'étroite corrélation entre  $\text{H}^+$  et  $\text{SO}_4^{=} + \text{NO}_3^-$  dans les eaux de précipitation, du couvert de neige et les eaux de fonte, et les valeurs optimisées très similaires pour  $k$  du  $\text{SO}_4^{=}$  et pour  $k$  du  $\text{NO}_3^-$ , il est probable que la valeur apparente et plus basse de  $k$  pour  $\text{H}^+$  reflète des processus de neutralisation de l'acidité des eaux de fonte par une mobilisation accrue de cations de la matière particulaire comprise dans le couvert pendant le mouvement vertical des eaux de fonte.

Il est à remarquer que les valeurs de  $k$  pour la deuxième fonte (tableau 12, figures 17 à 19 et 26 à 28) sont plus élevées pour les espèces ioniques de  $\text{SO}_4^{=}$  et  $\text{H}^+$  que celles de la première fonte. Entre ces deux fontes, on a enregistré des nouvelles chutes de neige qui ont contribué d'une façon significative aux valeurs de  $C_0$  et de  $H_0$  pour la deuxième fonte. Ceci nous laisse croire que les valeurs de  $k$  pour les nouvelles chutes de neige d'un degré de métamorphisme peu avancé sont relativement élevées par rapport aux couches de neige qui ont séjourné plus longtemps dans le couvert de neige. Toutefois, les basses valeurs des concentrations de  $\text{NO}_3^-$  observées et les fluctuations appréciables de celles-ci pendant la deuxième fonte ont donné lieu au calcul d'une valeur de  $k_{\text{NO}_3^-}$  de 0.0007; la simulation de la fonte de

cette espèce ionique est donc beaucoup moins satisfaisante que pour le  $\text{SO}_4^{=}$ . Afin de démontrer que le modèle conceptuel ne peut accommoder d'une façon satisfaisante toutes les fontes observées au lac Laflamme, nous reproduisons dans les figures 23 ( $\text{SO}_4^{=}$ ), 24 ( $\text{NO}_3^-$ ) et 25 ( $\text{H}^+$ ) les valeurs pour les concentrations des eaux de fonte observées "in situ" en 1983 (Jones et al., 1984) et celles générées par l'équation (3) pour les valeurs optimales de k (tableau 11). Quoique ces résultats sont beaucoup plus imprécis que ceux de 1984, il faudrait toutefois signaler qu'en 1983, les eaux de fonte dans le lysimètre utilisé cette année-là étaient contaminées périodiquement par des infiltrations des eaux de surface.

On doit noter que les mesures de la qualité de fonte "in situ" (1984) démontrent que l'évolution de la fonte réelle ne correspond à celle de la simulation de fonte par le modèle qu'après qu'une première partie de la fonte ait été déchargée par le couvert de neige (ex.: figure 17,  $\text{SO}_4^{=}$ ; figure 18,  $\text{NO}_3^-$ ). Pour cette raison, nous excluons les valeurs de qualité des fontes des premiers échantillons d'eaux de fonte pour le calcul de k (équation (3)) par la méthode des moindres carrés. Nous justifions cette démarche par le fait que nos observations confirment celles de Johannessen et Henriksen (1978) qui ont aussi noté des différences entre l'évolution de la qualité des eaux de fonte mesurée pendant des fontes contrôlées en laboratoire avec celle de la qualité des eaux de fonte observée "in situ". En effet, les premières eaux de fonte en milieu naturel possèdent des valeurs plus basses pour les concentrations en ions que les décharges subséquentes qui atteignent des valeurs de concentrations maximales avant de diminuer. Quoique Johannessen et Henriksen (1978) ne se soient pas attardés

à discuter ce phénomène, nous croyons que l'évolution des voies d'écoulement des eaux de fonte dans le couvert de neige peut expliquer en partie les écarts entre la qualité des eaux de fonte générée par le modèle et celle observée "in situ". Marsh et Woo (1985) ont étudié les relations et l'évolution de l'écoulement des lames de fonte dans le couvert de neige et la structure stratigraphique de celui-ci. Ils ont démontré que pendant le ruissellement des premières eaux de fonte dans le couvert de neige sèche, les lentilles de glace et d'autres discontinuités de structure obligent l'eau libre à descendre verticalement d'une façon hétérogène par des "doigts" de fonte (melt fingers). Ces voies préférentielles d'écoulement des eaux ont pour effet de réduire la quantité de neige actuellement en contact avec les eaux de fonte par rapport à celle prévue par le modèle d'un ruissellement vertical et homogène du type d'écoulement D'Arcy (Colbeck, 1973). La valeur apparente de  $k$  est donc réduite par rapport à sa valeur réelle dans les premières eaux de fonte.

Au fur et à mesure que la fonte progresse, les zones d'eau libre s'étendent dans le couvert jusqu'à la saturation de celui-ci par l'eau libre, ce qui favorise un type d'écoulement plus proche à celui du modèle conceptuel que l'écoulement observé au début de la fonte. Le taux de lessivage des cristaux de neige par des eaux dans le couvert saturé est donc plus élevé et plus consistant qu'au début de la fonte. On peut ainsi appliquer la méthode des moindres carrés aux échantillons de ces eaux de fonte pour la détermination de  $k$ .

Suite à l'ajustement de la valeur de  $k$  pour chaque espèce ionique par l'application de la méthode des moindres carrés aux données obtenues des mesures "in situ", nous avons simulé la qualité progressive des eaux de

fonte par l'intégration de l'équation 3 dans le modèle quantitatif d'Anderson (1973). Le couplage de ces deux modèles est une première en ce qui concerne la simulation de la qualité des eaux de fonte du lac Laflamme par un modèle intégré. Les figures 20, 21 et 22 reproduisent respectivement la simulation des concentrations de  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$  et H correspondent bien aux concentrations des eaux prélevées "in situ". La performance du modèle intégré semble donc compatible avec la méthodologie déjà établie pour l'étude de la qualité des eaux de fonte, cette méthodologie ayant été conçue pour la collecte des données de base de l'équation 3. Les figures 23, 24 et 25 reproduisent la fonte cumulative simulée par jour ainsi que les concentrations simulées dans la neige et les eaux de fonte pendant la même période. Nous incluons ces figures car nous prévoyons utiliser le modèle intégré pour les prévisions de la qualité des eaux de fonte par lame de fonte déchargée tous les 24 heures.

Dans ces dernières figures, on peut remarquer un décalage quasi-constant entre les mesures des concentrations et d'écoulement in situ et les courbes simulées; ceci relève du fait que le modèle d'Anderson, tel que modifié, a simulé les valeurs à l'heure 0:00 du jour, tandis que nos mesures in situ représentent les valeurs de ces paramètres intégrés sur une période de 24 heures sur des échantillons pris à 15:00 heures du même jour.

En plus du développement du modèle conceptuel (équation (3)) de la qualité des eaux de fonte au lac Laflamme, nous avons, étudié les régressions de type linéaire entre la hauteur des lames de fonte déchargées par le couvert de neige et la qualité. Nous avons trouvé des régressions très significatives (figures 17 à 19) entre la qualité des eaux de fonte de 1984

et la hauteur totale de la lame de ces eaux déchargées par le couvert de neige. Un modèle de type linéaire est plus difficile à conceptualiser quoique quelques chercheurs ont utilisé des modèles linéaires empiriques pour la décharge des espèces ioniques par le couvert de neige pendant la fonte (Kämäri et al., 1984). Nous examinons présentement des phénomènes autres que le lessivage des cristaux de neige qui pourraient influencer le couvert de neige afin de donner naissance à un écoulement susceptible d'être simulé par un modèle linéaire (Leung et Carmichael, 1984).

#### 4.5 Caractéristiques de l'eau de ruissellement

Les figures 29 et 30 représentent respectivement la concentration moyenne des cations ( $H^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ) et des anions ( $SO_4^{--}$ ,  $NO_3^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $PO_4^{--}$ ,  $Cl^-$ ) majeurs dans l'eau de fonte (lys2), l'eau de ruissellement (hypo) et l'eau souterraine (sout) au cours de la fonte de 1984 (18 avril - 20 mai). On remarque que la concentration des ions majeurs dans l'eau de ruissellement (hypo) est nettement plus importante que dans l'eau de fonte. La concentration moyenne des cations et des anions atteint respectivement 127 et 152  $\mu\text{éq/l}$  dans l'eau de ruissellement, comparativement 40 et 35  $\mu\text{éq/l}$  dans l'eau de fonte.

Les cations dominants dans l'eau de fonte sont l'hydrogène, le calcium et le potassium. Les cations dominants dans l'eau de ruissellement sont le calcium, l'hydrogène, le sodium et le magnésium. Les concentrations moyennes de calcium, de sodium et de magnésium sont significativement plus élevées dans l'eau de ruissellement mais très semblables à celles des eaux souterraines. Cette observation suggère que les eaux du ruisseau hypodermique (eaux de ruissellement) sont fortement influencées par les eaux

souterraines ou encore qu'elles subissent des transformations similaires à celles des eaux de percolation dans leur cheminement vers les eaux souterraines. Quoiqu'il en soit, ces différences avec l'eau de fonte indiquent que le sol ou les eaux souterraines ont une influence considérable sur la qualité de l'eau de ruissellement.

Les anions dominants dans l'eau de fonte et dans l'eau de ruissellement sont les sulfates et les nitrates. On remarque aussi que la concentration moyenne de ces ions dans l'eau de ruissellement est nettement plus élevée que dans l'eau de fonte. La concentration moyenne des sulfates dans l'eau souterraine apparaît plus élevée que celle de l'eau de ruissellement tandis que celle des nitrates apparaît nettement plus faible. Ces résultats pourraient indiquer que ces ions sont, dans l'eau de ruissellement, d'origines différentes. Une partie importante des sulfates pourrait provenir des eaux souterraines tandis que les nitrates pourraient provenir davantage des couches superficielles du sol. La faible concentration des nitrates dans les eaux souterraines pourrait être attribuable à la fixation de cet élément nutritif par la végétation ou à un phénomène d'adsorption dans le sol. Considérant les différences que l'on observe entre l'eau de fonte, l'eau de ruissellement et l'eau souterraine, il semble que les échanges avec le sol ou la contribution des eaux souterraines puissent jouer un rôle considérable dans la qualité des eaux de ruissellement.

#### 4.6 Évolution de l'acidité des eaux de ruissellement

Entre le 18 et le 28 avril, l'acidité dans le ruisseau hypodermique est apparue comparable à celle de l'eau de fonte (figure 31). L'acidité dans le

ruisseau hypodermique a variée entre 21 et 26  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$  (pH 4.67-4.59) comparativement à 23 et 33  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$  (pH 4.64-4.48) pour l'eau de fonte.

Cependant, à partir du 29 avril, cette relation change. L'acidité de l'eau de fonte diminue, passant de 23  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$  (28 avril) à 19  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$  le 30 avril, et à 9  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$  le 2 mai. Pour le reste de la période jusqu'à la disparition du couvert de neige, l'acidité de l'eau de fonte se maintiendra généralement à moins de 15  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$ , sauf pour l'événement pluvieux du 13 mai, où elle atteindra 27  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$ . Contrairement à ce qu'on observe pour l'eau de fonte, l'acidité dans l'eau de ruissellement (ruisseau hypodermique) reste relativement stable. Même l'événement pluvieux du 12 mai semble n'avoir eu que peu d'effet sur l'acidité du ruisseau hypodermique, bien que l'acidité de l'eau de fonte ait considérablement augmentée à la suite de cet événement. On remarque, d'autre part, que l'acidité du ruisseau hypodermique est, à partir du 29 avril, toujours supérieure à celle de l'eau de fonte, sauf pour l'unique événement (pluie) du 12 mai. Ce comportement particulier de l'acidité dans l'eau du ruisseau hypodermique par rapport à celui de l'eau de fonte suggère que l'acidité de l'eau dans le ruisseau hypodermique n'est pas entièrement contrôlée par l'eau de fonte. Puisque l'acidité dans le ruisseau est généralement supérieure à celle de l'eau de fonte, il est probable que le sol puisse agir comme un réservoir d'acidité.

L'évolution de l'acidité dans les eaux souterraines (puit A) appuie cette hypothèse. Entre le 18 et le 24 avril, l'acidité dans l'eau souterraine est inférieure à 2  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$ . À partir du 25 avril, l'acidité augmente

à 16  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$ , puis rapidement jusqu'à 43  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$  le 29 avril. Durant cette période (25-29 avril), aucun événement pluvieux n'est survenu. Cette période correspond cependant au début de la fonte massive (figure 32). Elle correspond aussi à une augmentation du niveau de l'eau dans les puits souterrains (figures 33 et 34). Le 27 avril, l'acidité de l'eau souterraine atteint 25  $\mu\text{éq H}^+/\text{l}$ . Cette concentration est du même ordre de grandeur que celle de l'eau de fonte et de l'eau de ruissellement. Entre le 28 et le 30 avril, l'acidité de l'eau souterraine augmente considérablement (+18  $\mu\text{éq}/\text{l}$ ) au moment où celle de l'eau de fonte diminue d'autant. On observe pourtant alors une légère augmentation de l'acidité dans l'eau de ruissellement.

Entre le 2 et le 4 mai, l'acidité dans les eaux souterraines, qui est beaucoup plus élevée que celle du ruisseau hypodermique, diminue. Malgré une augmentation de l'acidité dans l'eau de fonte, l'acidité de l'eau de ruissellement diminue. Entre le 9 et le 11 mai, la concentration ( $\text{H}^+$ ) augmente dans l'eau souterraine. Elle augmente aussi dans l'eau du ruisseau hypodermique. Le 13 mai, par contre, l'acidité diminue significativement dans l'eau souterraine, date qui correspond à une infiltration massive des eaux de surface moins acides (figures 33 et 34). L'eau souterraine demeure cependant plus acide que l'eau de fonte. L'acidité dans l'eau de ruissellement augmente alors légèrement. L'acidité dans le ruisseau hypodermique paraît donc dépendre de la contribution relative des eaux de fonte et des eaux souterraines mais probablement surtout des eaux souterraines. Considérant la forte acidité des eaux souterraines durant les périodes d'infiltration et l'ensemble de ces observations, il semble peu probable que l'acidité de l'eau de fonte du 18 avril au 20 mai puisse seule

expliquer l'acidité des eaux souterraines et celle de l'eau de ruissellement.

#### 4.7 Évolution des nitrates

Pour toute la période d'échantillonnage (18 avril - 24 mai), en aucun moment la concentration en nitrate dans l'eau de fonte n'a dépassée 25  $\mu\text{éq NO}_3^-/\text{l}$  (figure 35). Dans le ruisseau hypodermique, la concentration en  $\text{NO}_3^-$  a diminué graduellement suivant une courbe exponentielle, passant de 135  $\mu\text{éq/l}$  le 18 avril à 30  $\mu\text{éq/l}$  le 7 mai, pour ensuite atteindre moins de 9  $\mu\text{éq/l}$  le 24 mai. Durant toute cette période, sauf pour l'événement pluvieux du 12 mai, la concentration en nitrate dans l'eau hypodermique fut nettement supérieure à celle de l'eau de fonte (de 4 à 5 fois). Comme le suggère l'étude de la concentration moyenne, la concentration élevée dans le ruisseau hypodermique ne peut être expliquée par la contribution des eaux souterraines. Si les mesures effectuées au puit A sont représentatives de l'ensemble des eaux souterraines (zone saturée), on doit alors envisager l'hypothèse que la couche superficielle du sol est à l'origine des valeurs élevées de nitrates. On ne peut cependant pas préciser pour le moment si ces nitrates sont accumulés durant les premières phases de la fonte, accumulés avant l'hiver ou produits au cours de l'hiver. La réduction graduelle des nitrates pourrait s'expliquer par l'assimilation graduelle de cet élément nutritif par la végétation ou encore par le lessivage progressif de cet ion dont la disponibilité serait limitée.

Entre le 1 et le 6 mai, et entre le 13 et le 18 mai, on observe un redressement des nitrates. Il est intéressant de remarquer que ces périodes correspondent à une réduction de l'écoulement (figure 32). D'autre part, la période du 18 avril au 1 mai correspond à la phase croissante de la fonte massive, période durant laquelle on observe la plus forte réduction de la concentration des nitrates. Bien qu'à une réduction de l'écoulement correspond un redressement de la concentration des nitrates, la concentration semble diminuer au cours de la fonte. La stabilisation de la concentration des nitrates, lorsque le débit diminue, laisse supposer que la réduction des nitrates dans le ruisseau hypodermique au cours de la fonte serait davantage associée à un phénomène de lessivage qu'à l'assimilation par le couvert forestier.

#### 4.8 Évolution des sulfates

La concentration des sulfates dans l'eau de fonte a varié entre 6 et 32  $\mu\text{eq SO}_4/\text{l}$  (figure 36). Les valeurs les plus élevées sont mesurées au début de la fonte et à la suite de l'événement pluvieux du 12 mai. Généralement, la concentration diminue graduellement, mais augmente à nouveau à la suite de nouvelles précipitations (pluie ou neige). Le comportement des eaux de ruissellement apparaît très différent. Le 18 avril, la concentration des sulfates est de 99  $\mu\text{eq SO}_4/\text{l}$ , soit trois fois plus élevée que celle de l'eau de fonte à cette même date. Cette concentration, plus faible le 24 avril (90  $\mu\text{eq SO}_4/\text{l}$ ), augmente graduellement du 24 au 30 avril alors qu'elle diminue durant cette même période dans l'eau de fonte. La concentration augmente dans l'eau de fonte à la suite de la pluie du 1 mai

alors qu'elle diminue dans le ruisseau hypodermique. À la suite des pluies des 11 et 12 mai, la concentration augmente dans l'eau de fonte alors qu'elle diminue dans le ruisseau hypodermique. Du 13 au 15 mai, la concentration des sulfates diminue dans l'eau de fonte alors qu'elle augmente dans le ruisseau hypodermique. D'autre part, la concentration des sulfates dans l'eau de ruissellement a toujours été supérieure à  $89 \mu\text{éq SO}_4/\text{l}$ , alors que même à la suite de l'événement pluvieux du 12 mai, celle de l'eau de fonte n'a pas dépassé  $48 \mu\text{éq SO}_4/\text{l}$ . En conséquence, il est peu probable que seule l'eau de fonte contrôle la concentration en sulfates de l'eau de ruissellement durant la période étudiée. Le comportement des sulfates dans l'eau souterraine ne peut non plus expliquer seul les variations que l'on observe au ruisseau hypodermique. On remarque cependant qu'à partir du 29 avril, date d'infiltration massive (augmentation significative du niveau des puits souterrains), la concentration des sulfates dans le ruisseau hypodermique est du même ordre de grandeur que celle des eaux souterraines. Ceci suggère, tout comme l'étude des valeurs moyennes, que la concentration des sulfates dans le ruisseau hypodermique pourrait, au moins à partir de cette période, être grandement influencée par les eaux souterraines. Il semble dans ce cas aussi que le sol puisse agir comme un réservoir très important de sulfates, directement ou par l'intermédiaire des eaux souterraines. Il n'est pas clair, cependant, que cet excès de sulfate provienne des eaux souterraines de la zone saturée ou de la couche superficielle du sol.

Cette étude de l'évolution temporelle des contaminants ( $\text{H}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ), de même que la comparaison des valeurs moyennes suggèrent que la qualité des eaux de fonte ne peut expliquer seule les concentrations élevées en contaminant que l'on observe dans les eaux de ruissellement. Nous suggérons que le

sol lui-même agit comme un réservoir pour ces ions. L'existence d'un tel réservoir a déjà été suggérée par Johnson et Henderson (1979). En utilisant des traceurs ( $^{35}\text{SO}_4$ ), Dahl et al. (1980) ont d'ailleurs pu vérifier que les sulfates dans l'eau de ruissellement provenaient principalement du sol durant la dernière partie de la fonte. Le mécanisme par lequel l'eau de ruissellement est enrichie en nitrates et en sulfates n'est pas connu. L'hypothèse que ces contaminants proviennent des fontes intermittentes qui précèdent la fonte massive ne peut être rejetée. Il faut cependant aussi envisager l'hypothèse qu'une partie importante de ces contaminants puisse être accumulée avant l'hiver, produit au cours de l'hiver et libérée durant la fonte massive. Il est aussi possible que l'excès de ces ions (par rapport à l'eau de fonte) soit le résultat d'un lessivage des horizons minéraux ou de l'horizon organique au cours de la fonte. L'absorption temporaire ou permanente des sulfates dans les horizons minéraux du sol est apparemment un phénomène courant dans les sols forestiers (Johnson et Cole, 1977; Singh, 1980).

Nos résultats suggèrent cependant que les sulfates et les nitrates en excès ont des sites d'origine différente. Il semble que la couche superficielle du sol (incluant les horizons minéraux supérieurs) soit le site d'origine des nitrates (v. section 4.3.3), alors que l'acidité et les sulfates pourraient, au moment de la fonte, provenir davantage des couches plus profondes du sol. Cette hypothèse concorde avec les études de Farrelle et al. (1980). Ces auteurs ont observé dans un sol sablonneux que 75% des sulfates ajoutés lors d'arrosages étaient emmagasinés dans le sol minéral (62% dans l'horizon B) et seulement 24% dans la couche organique. D'autre

part, Braekke (Overrein et al., 1980) a montré que les nitrates disparaissent presque entièrement lorsque l'eau des précipitations entre en contact avec la couche organique. Ces travaux suggèrent que la couche organique est le site privilégié d'accumulation de nitrates et possiblement de leur lessivage tandis que l'horizon minéral (surtout l'horizon B) serait le site privilégié de l'accumulation et possiblement du lessivage des sulfates. Un calcul rétrospectif de la charge au ruisseau hypodermique et celle du lysimètre (eau de fonte) devrait permettre de vérifier si l'excès de ces contaminants au ruisseau hypodermique provient essentiellement des polluants atmosphériques déposés au cours de l'hiver et des pluies printanières ou s'il provient d'une autre source. Une étude de fractionnement isotopique sur les échantillons d'eau du ruisseau hypodermique et à différents niveaux du sol devrait permettre de vérifier le site d'origine de chacun de ces ions

## 5. CONCLUSION

Les conclusions majeures des travaux d'étude de la fonte au lac Laflamme en 1984 sont:

- i) que la simulation de la qualité des eaux de fonte par un modèle conceptuel de lessivage progressif du couvert de neige concorde bien avec la qualité des eaux de fonte mesurées en 1984 pour les anions d'acidité forte ( $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) tandis que la concordance entre la simulation de l'acidité ( $\text{H}^+$ ) de fonte et l'acidité réelle observée "in situ" est moins satisfaisante;
- ii) que le couplage subséquent du modèle optimisé de la qualité des eaux de fonte avec le modèle quantitatif d'Anderson génère des valeurs pour l'évolution de la qualité de fonte ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ) similaires à celles observées "in situ";
- iii) que la qualité des eaux de ruissellement hypodermique semble être influencée d'une façon plus significative par les eaux souterraines que par les eaux de fonte directement. La qualité des eaux souterraines, à leur tour, est modifiée par l'interaction entre le sol et l'infiltration des eaux de fonte et/ou pluie pendant la période de fonte et après la fonte. Des indices suggèrent présentement que le sol est une source de  $\text{SO}_4^-$  pendant ces périodes de l'année.

6. RÉFÉRENCES

BOOTY, W.G. et KRAMER, J.R. (1984). Sensitivity analysis of a watershed acidification model. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B305, 441-449.

CHEN, C.W., GHERINI, S.A. et 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., RUSTAD, S. et SEIP, H.M. (1984). Modelling streamwater chemistry with snowmelt. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B305, 427-439.

COLBECK, S.C. et DAVIDSON, G. (1973). Water percolation through homogeneous snow. AISH Publ. 107, 242-257.

DAHL, J.B., QVENILD, C., TOLLAN, O., CHRISTOPHERSEN, N. et SEIP, H.M. (1980) Use of radioactive tracers to study runoff and soil-water interactions in natural mini-catchments. Dans: Ecological impact of acid precipitation. Proceeding of an international conference. Sandefjord, Norway, March 11-14, p. 160-161.

FARRELL, E.P., NILSSON, I., TAMM, C.O. et WILKLANDER, G. (1980). Effects of artificial acidification with sulphuric acid on soil chemistry in a Scots pine forest. Dans: Ecological impact of acid precipitation. Proceeding of an international conference. Sandefjord, Norway, March 11-14, p. 186-187.

FOSTER, P. (1978). The modelling of pollutant concentrations during snowmelt. Central Electricity Research Laboratories, Surrey, United Kingdom. Note No RD-L-N-46-78.

GALLOWAY, J.N., SCHOFIELD, C.L., HENDREY, G.R., PETERS, N.E. et JOHANNES, A.H. (1980). Sources of acidity in three lakes acidified during snowmelt. Dans: Ecological impact of acid precipitation. Proceedings of an International Conference, Sandefjord, Norway, March 11-14, p. 264-265.

JEFFRIES, D.S., COX, C.M. et DILLON, P.J. (1979). Depression of pH in lakes and streams in Central Ontario during snowmelt. Journal of Fisheries Board of Canada, 36(6): 640-646.

JOHANNESSEN, M. et HENRIKSEN, A. (1978). Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. Water Resources Research, 14: 615-619.

- JOHANNESSEN, M., SKARTVEIT, A. et WRIGHT, R.F. (1980). Stream water chemistry before, during and after snowmelt. Dans: Ecological impact of acid precipitation. Proceedings of an International Conference, Sandefjord, Norway, March 11-14, p. 224-225.
- JOHNSON, D.W. et COLE, D.W. (1977). Sulfate mobility in an outwash soil in western Washington. *Water Air Soil Pollut*, 7: 489-495.
- JOHNSON, D.W. et HENDERSON, G.S. (1979). Sulfate adsorption and sulfur fractions in a highly weathered soil under a mixed deciduous forest. *Soil Sci.* 128: 34-40.
- 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-Eau, rapport scientifique no 165, 145 p., 7 annexes. (Pour Environnement Canada).
- KÄMÄRI, J., POSCH, M. et KAUPPI, L. (1984). Development of a model analysing surface water acidification on a regional scale; application to individual basins in Southern Finland.
- LEUNG, W.S. et CARMICHAL G.R. (1984), Solute redistribution during normal freezing. *Water Air and Soil Pollut*, 21: 141-150.

MARSH, P. et WOO, M.K. (1984). Wetting front advance and freezing of meltwater within a snow cover. I. Observations in the Canadian Arctic. Water Resources Research, 20: 1853-1864.

OVERREIN, L.N., SEIP, H.M. et TOLLAN A. (1980). Acid precipitation effects on forest and fish. Final report of the SNSF-project 1972-1980. Oslo, December 1980. p. 62.

SKARTVEIT, A. et GJESSING, T.Y. (1979). Chemical budgets and chemical quality of snow and runoff during spring snowmelt. Nordic Hydrology, 10(2/3): 141-154.

TABLEAU 1. Méthodologie d'analyses physico-chimiques de la neige, des eaux de fonte, des eaux de ruissellement et des eaux lacustres, lac Laflamme.

PARAMÈTRE	MÉTHODE	SEUIL DE DÉTECTION
pH	potentiométrie	
conductivité	pont de Wheatstone	1.0 $\mu$ S/cm
alcalinité	titrage	2.0 $\mu$ eq/L
chlorures	chromatographie ionique	0.1 mg Cl/L
sulfates	chromatographie ionique	0.1 mg SO <sub>4</sub> /L
phosphates	chromatographie ionique	0.1 mg PO <sub>4</sub> /L
nitrates	chromatographie ionique	0.1 mg NO <sub>3</sub> /L
calcium	absorption atomique	0.01 mg Ca/L
magnésium	absorption atomique	0.01 mg Mg/L
sodium	absorption atomique	0.01 mg Na/L
potassium	absorption atomique	0.01 mg K/L
azote ammoniacal	colorimétrie	0.01 mg N/L
aluminium	absorption atomique (fournaise)	1.0 $\mu$ g AL/L
manganèse	absorption atomique (fournaise)	1.0 $\mu$ g Mn/L
couleur	standard platine-cobalt	2 unités Hazen
carbone organique dissous	combustion	0.5 mg C/L

TABLEAU 2 Nombre d'échantillons prévus par le contrat entre INRS-Eau et Environnement Canada pour la fonte de neige de 1984 au lac Laflamme et le nombre d'échantillons actuellement prélevés pendant la fonte.

TYPE D'ÉCHANTILLON	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS PRÉVUS PAR LE LE CONTRAT	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS PENDANT LA FONTE
Précipitation	10	10*
Neige au sol	15**	10***
Eaux de fonte (lysimètre L2)	22	59****
Eaux de ruissellement	30	30
Eaux souterraines	8	8
TOTAL	85	117

\* 5 événements, deux capteurs;

\*\* 5 échantillons au début de l'étude, 1 après chaque événement de précipitations (4) plus un échantillon supplémentaire;

\*\*\* fin de l'échantillonnage du couvert de neige le 13 mai après événement de précipitation; fin du couvert de neige le 20 mai;

\*\*\*\* en plus des 22 échantillons du lysimètre L2, nous avons recueilli 37 échantillons des eaux de fonte aux lysimètres L1 et L3; les données de tous les lysimètres sont donc utilisées pour le calcul des bilans chimiques des diverses espèces ioniques (section 4.2) et pour l'optimisation du modèle de fonte (section 4.4).

TABLEAU 3. Quantité et composition chimique des échantillons de précipitation captés par les collecteurs Sangamo au lac Laflamme, 1984.

-1. = VALEUR NON DETECTABLE

-2. = MANQUE DES MESURES

RESULTATS D'ANALYSE 2 SANGAMOS - LAC LAFLAMME - 1984

STAT	AN	MO	JR	PH	E.EA CCM	ALC UE/L	COLO HAG.	C.DR PPM	PH	COND US	CL= PPM	PO4= PPM	NO3= PPM	SO4= PPM	HCO3= PPM	NH4+ PPM	CA++ PPM	MG++ PPM	K+ PPM	NA+ PPM	AL+ PPH	MN+ PPH	C.IN PPM
1	SANA	84-	4-18	23.6	-9	-1.0	5.0	-9.0	4.87	7.0	.24	-1.00	.19	.64	-1.0	17.00	.02	.02	.08	.03	3.5	11.2	-9.0
2	SANA	84-	5- 1	11.6	-9	-1.0	-9.0	5.3	4.47	25.0	.50	-1.00	1.27	2.52	-1.0	353.00	.60	.07	.29	.32	26.0	22.2	-1.0
3	SANA	84-	5- 6	13.3	-9	-1.0	-9.0	1.8	4.91	7.5	.08	-1.00	.33	.55	-1.0	-1.00	.13	.02	.07	.05	7.5	5.2	-1.0
4	SANA	84-	5- 9	22.2	-9	-1.0	3.0	2.7	4.60	18.0	.12	-1.00	.54	1.37	-1.0	64.00	.12	.02	.09	.06	9.5	9.3	-1.0
5	SANA	84-	5-13	31.2	-9	-1.0	5.0	2.9	4.31	32.0	.17	-1.00	1.55	3.15	-1.0	268.00	.14	.02	.09	.08	9.5	5.2	-1.0
6	SANA	84-	5-23	30.7	-9	-1.0	5.0	3.8	4.14	46.0	.22	-1.00	1.75	4.53	-1.0	218.00	.24	.04	.08	.10	24.0	9.9	-1.0
7	SANA	84-	5-24	15.5	-9	-1.0	5.0	2.3	4.58	16.0	.09	-1.00	.63	1.52	-1.0	105.00	.16	.02	.05	.05	8.5	7.1	-1.0
8	SANB	84-	4-18	23.6	-9	-1.0	5.0	-9.0	4.96	6.3	.11	-1.00	.19	.47	-1.0	15.00	.09	.01	.10	.06	-9.0	-9.0	-9.0
9	SANB	84-	5- 1	11.6	-9	-1.0	-9.0	2.9	4.59	22.0	.26	-1.00	1.24	2.34	-1.0	335.00	.58	.07	.11	.14	21.5	21.2	-1.0
10	SANB	84-	5- 6	13.3	-9	-1.0	-9.0	1.6	5.10	6.7	.09	-1.00	.30	.55	-1.0	-1.00	.12	.02	.07	.05	8.5	5.0	-1.0
11	SANB	84-	5- 9	22.2	-9	-1.0	3.0	3.5	4.59	17.0	.23	-1.00	.57	1.62	-1.0	47.00	.17	.03	.23	.11	17.0	16.8	-1.0
12	SANB	84-	5-13	31.2	-9	-1.0	5.0	3.0	4.31	32.0	.12	-1.00	1.61	3.13	-1.0	309.00	.14	.02	.03	.04	12.5	4.9	-1.0
13	SANB	84-	5-23	30.7	-9	-1.0	5.0	3.0	4.13	45.0	.20	-1.00	1.78	4.14	-1.0	330.00	.19	.03	.07	.08	16.0	6.8	-1.0
14	SANB	84-	5-24	15.5	-9	-1.0	2.5	1.6	4.52	18.0	.08	-1.00	.73	1.72	-1.0	163.00	.07	.01	.02	.04	6.5	3.0	-1.0
15	SANAB	84-	5-15	.8	-9	-9.0	-9.0	-9.0	-9.00	-9.0	-9.00	-1.00	1.05	3.22	-9.0	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.0	-9.0	-9.0
16	SANAB	84-	5-16	.3	-9	-9.0	-9.0	-9.0	-9.00	-9.0	1.39	-1.00	.27	1.14	-9.0	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.0	-9.0	-9.0
17	SANAB	84-	5-20	4.4	-9	-1.0	-9.0	4.0	4.65	20.0	.49	-1.00	.45	.92	-1.0	153.00	.36	.04	.77	.58	18.0	8.8	-1.0

CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES

4.4 3.0 4.58 21.2 .27 0.00 .85 1.97 0.0 158. .21 .03 .14 .12 13. 10. 0.0

TABLEAU 3 (suite)

0.0 = MANQUE DES MESURES  
-1.0 = VALEUR NON DETECTABLE

CONCENTRATION (UF/L) DES SUBSTANCES AUX STATIONS 2 SANGAMOS LAC LAFLAMME - 1984

DATE	CL-	PO43-	NO3-	SO4=	HCO3-	H+	CA++	NH4+	MG++	K+	NA+	ANION	EXPERIMENTAL				THEORIQUE					
													CATIO	DEFIC	C/A	ALT3+	MN+	ANIOI	CATIO	DEFIT	C/A	PHT
1 109 418	6.67	-1.00	3.06	13.28	-1.	13.40	1.0	.94	1.67	2.05	1.30	23.0	20.5	-2.6	.89	.3	.4	23.0	21.1	-1.9	.92	4.81
2 122 5 1	13.89	-1.00	20.48	52.28	-1.	33.88	30.0	19.61	5.83	7.42	13.91	86.7	110.7	24.0	1.28	2.4	.8	86.7	113.9	27.2	1.31	0.00
3 127 5 6	2.22	-1.00	5.32	11.41	-1.	12.30	6.5	-1.00	1.67	1.79	2.17	19.0	24.4	5.5	1.29	.5	.2	19.0	25.1	6.2	1.33	0.00
4 130 5 9	3.33	-1.00	8.71	28.42	-1.	25.12	6.0	3.56	1.67	2.30	2.61	40.5	41.3	.8	1.02	.8	.3	40.5	42.4	2.0	1.05	0.00
5 134 5 13	4.72	-1.00	25.00	65.35	-1.	48.98	7.0	14.89	1.67	2.30	3.48	95.1	78.3	-16.8	.82	.9	.2	95.1	79.4	-15.6	.84	4.19
6 144 5 23	6.11	-1.00	28.23	93.98	-1.	72.44	12.0	12.11	3.33	2.05	4.35	128.3	106.3	-22.0	.83	2.5	.4	128.3	109.1	-19.2	.85	4.04
7 145 5 24	2.50	-1.00	10.16	31.54	-1.	26.30	8.0	5.83	1.67	1.28	2.17	44.2	45.3	1.1	1.02	.8	.3	44.2	46.3	2.1	1.05	0.00
8 109 418	3.06	-1.00	3.06	9.75	-1.	10.96	4.5	.83	.83	2.56	2.61	15.9	22.3	6.4	1.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
9 122 5 1	7.22	-1.00	20.00	48.55	-1.	25.70	29.0	18.61	5.83	2.81	6.09	75.8	88.0	12.3	1.16	1.9	.8	75.8	90.7	14.9	1.20	0.00
10 127 5 6	2.50	-1.00	4.84	11.41	-1.	7.94	6.0	-1.00	1.67	1.79	2.17	18.7	19.6	.8	1.04	.5	.2	18.7	20.2	1.5	1.08	0.00
11 130 5 9	6.39	-1.00	9.19	33.61	-1.	25.70	8.5	2.61	2.50	5.88	4.78	49.2	50.0	.8	1.02	1.5	.6	49.2	52.1	2.9	1.06	0.00
12 134 5 13	3.33	-1.00	25.97	64.94	-1.	48.98	7.0	17.17	1.67	.77	1.74	94.2	77.3	-16.9	.82	1.2	.2	94.2	78.7	-15.5	.84	4.19
13 144 5 23	5.56	-1.00	28.71	85.89	-1.	74.13	9.5	18.33	2.50	1.79	3.48	120.2	109.7	-10.4	.91	1.6	.2	120.2	111.6	-8.5	.93	4.08
14 145 5 24	2.22	-1.00	11.77	35.68	-1.	30.20	3.5	9.06	.83	.51	1.74	49.7	45.8	-3.8	.92	.6	.1	49.7	46.5	-3.1	.94	4.48
15 136 5 15	0.00	-1.00	16.94	66.80	0.	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
16 137 5 16	38.61	-1.00	4.35	23.65	0.	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
17 141 5 20	13.61	-1.00	7.26	19.09	-1.	22.39	18.0	8.50	3.33	19.69	25.22	40.0	97.1	57.2	2.43	1.5	.3	40.0	99.0	59.0	2.48	0.00

CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES (UFQ/L)  
7.62 0.00 13.71 40.92 0. 31.90 10.4 8.80 2.44 3.67 5.19 60.0 62.4 12.1 1.12 1.2 .4 52.0 66.9 14.5 1.13 4.30

TABLEAU 3 (suite)

0.0 = MANQUE DES MESURES  
-1.0 = VALEUR NON DETECTABLE

## MOYENNE CONCENTRATIONS (UF/L) DES 2 SANGAMOS AU LAC LAFIAMME - 1984

NO JOUR JULIEN	HEAU MH	PH	CL-	PO4=	NO3-	SO4+	HCO3-	H+	CA++	NH4+	MG++	K+	NA+	ALM+	ALT+	MN+	ANION	CATION	
1	109	23.60	4.92	4.87	0.00	3.06	11.52	0.00	12.23	2.75	.89	1.25	2.31	1.96	3.50	.25	.41	19.44	21.38
2	122	11.60	4.53	10.56	0.00	20.24	50.42	0.00	29.79	29.50	19.11	5.83	5.12	10.00	23.75	2.16	.79	81.21	99.36
3	127	13.30	5.01	2.36	0.00	5.08	11.41	0.00	10.12	6.25	0.00	1.67	1.79	2.17	8.00	.50	.19	18.86	22.00
4	130	22.20	4.60	4.86	0.00	8.95	31.02	0.00	25.41	7.25	3.09	2.09	4.09	3.70	13.25	1.17	.48	44.83	45.62
5	134	31.20	4.31	4.03	0.00	25.49	65.15	0.00	48.98	7.00	16.03	1.67	1.54	2.61	11.00	1.09	.19	94.66	77.82
6	136	.80	0.00	0.00	0.00	16.94	66.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	137	.30	0.00	38.61	0.00	4.35	23.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	141	4.40	4.65	13.61	0.00	7.26	19.09	0.00	22.39	18.00	8.50	3.33	19.69	25.22	18.00	1.53	.32	39.96	97.13
9	144	30.70	4.14	5.84	0.00	28.47	89.94	0.00	73.29	10.75	15.22	2.92	1.92	3.92	20.00	2.05	.31	124.24	108.01
10	145	15.50	4.55	2.36	0.00	10.97	33.61	0.00	28.25	5.75	7.45	1.25	.90	1.96	7.50	.67	.19	46.94	45.55
SOMME 120-141				74.02	0.00	88.30	267.53	0.00	136.69	68.00	46.73	14.59	32.22	43.70	74.00	6.43	1.96	279.51	341.92

TABLEAU 4. Quantité et composition chimique de la neige au sol, lac Laflamme, 1984.

-1. = VALEUR NON DETECTABLE  
 -9. = MANQUE DES MESURES

RESULTATS D'ANALYSE NEIGE - LAC LAFLAMME - 1984

STAT	AN	MO	JR	EQE MM	E.EA CCH	ALC UE/L	COLO HAG.	C.OR PPM	PH	COND US	CL- PPM	PO4== PPM	NO3= PPM	SO4= PPM	HCO3= PPM	NH4+ PPH	CA++ PPM	MG++ PPM	K+ PPM	NA+ PPH	AL+ PPB	MN+ PPR	C.IN PPH
1	STRAT	84	4-18	444.0	101	-9.0	-9.0	-9.0	4.87	-9.0	-9.00	-9.00	.65	.43	-9.0	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.0	-9.0	-9.0
2	06 I	84	4-28	170.0	67	-1.0	7.5	9.3	5.13	7.5	.13	.17	.34	.38	-1.0	36.00	.07	.02	.52	.03	10.0	21.4	-1.0
3	09 I	84	4-28	350.0	67	-1.0	12.5	1.8	5.07	5.3	.19	-1.00	.56	.45	-1.0	35.00	.09	.02	.16	.07	7.5	15.7	-1.0
4	11 I	84	4-28	340.0	-9	-1.0	5.0	3.8	5.04	6.7	.10	-1.00	.58	.25	-1.0	73.00	.04	.01	.03	.04	6.0	4.1	-1.0
5	WE IN	84	4-28	330.0	-9	-1.0	10.0	5.6	5.08	7.5	.12	.13	.58	.38	-1.0	44.00	.10	.02	.30	.06	15.5	10.6	-1.0
6	NS IN	84	4-28	190.0	-9	-1.0	5.0	4.2	5.12	6.5	.19	.13	.48	.25	-1.0	36.00	.06	.01	.46	.11	13.5	7.4	-1.0
7	NS IN	84	5- 1	190.0	-9	-1.0	15.0	3.0	5.16	5.0	.06	-1.00	.29	.29	-1.0	13.00	.08	.02	.09	.02	10.5	15.9	-1.0
8	NS IN	84	5- 6	160.0	-9	-1.0	15.0	7.4	5.17	5.7	.08	.15	.26	.23	-1.0	18.00	.09	.02	.35	.02	14.0	21.8	-1.0
9	NS IN	84	5- 9	190.0	-9	-1.0	15.0	6.8	5.27	5.5	.11	.15	.19	.18	-1.0	-1.00	.07	.02	.47	.04	20.0	15.0	-1.0
10	NS IN	84	5-13	140.0	-9	-1.0	15.0	6.4	5.37	5.5	.11	.15	.21	.25	-1.0	17.00	.06	.02	.37	.06	12.5	16.5	-1.0
11	WE IN	84	5- 7	130.0	-9	-1.0	10.0	5.9	5.28	5.0	.13	.08	.14	.20	-1.0	18.00	.06	.02	.37	.06	12.5	16.5	-1.0

CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES

11.0 5.4 5.14 6.0 .12 .10 .39 .30 0.0 29. .07 .02 .31 .05 12. 14. 0.0

TABLEAU 4 (suite)

0.0 - MANQUE DES MESURES  
 -1.0 - VALEUR NON DETECTABLE

CONCENTRATION (UF/L) DES SUBSTANCES AUX STATIONS NFGE LAC LAFLAMME - 1984

DATE	EXPERIMENTAL											THEORIQUE										
	CL-	PO43-	NO3-	SO4=	HCO3-	H+	CA++	NH4+	MG++	K+	NA+	ANION	CATIO	DEFID	C/A	AL3+	MN+	ANIQT	CATIO	DEFIT	C/A	PHT
1 109 41A	0.00	0.00	10.4A	8.92	0.	13.49	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
2 119 42A	3.61	5.11	5.4A	7.8A	-1.	7.41	3.5	2.00	1.67	13.30	1.30	22.1	29.2	7.1	1.32	.5	.8	22.1	30.5	8.4	1.3A	0.00
3 119 42A	5.2A	-1.00	9.03	9.34	-1.	8.51	4.5	1.94	1.67	4.09	3.04	23.6	23.8	.1	1.00	.4	.6	23.6	24.8	1.1	1.05	0.00
4 119 42B	2.7A	-1.00	9.35	5.19	-1.	9.12	2.0	4.06	.83	.77	1.74	17.3	18.5	1.2	1.07	.4	.1	17.3	19.0	1.7	1.10	0.00
5 119 42A	3.33	3.90	9.35	7.8A	-1.	8.32	5.0	2.44	1.67	7.67	2.61	24.5	27.7	3.2	1.13	.9	.4	24.5	29.0	4.5	1.1A	0.00
6 119 42B	5.2A	3.90	7.74	5.19	-1.	7.59	3.0	2.00	.83	11.76	4.7A	22.1	30.0	7.9	1.36	.7	.3	22.1	31.0	8.9	1.40	0.00
7 122 5 1	1.67	-1.00	4.6A	6.02	-1.	6.92	4.0	.72	1.67	2.30	.87	12.4	16.5	4.1	1.33	.5	.6	12.4	17.6	5.2	1.42	0.00
8 127 5 6	2.22	4.50	4.19	4.77	-1.	6.76	4.5	1.00	1.67	8.95	.87	15.7	23.7	8.1	1.51	.7	.8	15.7	25.3	9.6	1.61	0.00
9 130 5 9	3.06	4.50	3.06	3.73	-1.	5.37	3.5	-1.00	1.67	12.02	1.74	14.4	24.3	9.9	1.69	.9	.5	14.4	25.7	11.4	1.79	0.00
10 134 513	3.06	4.50	3.39	5.19	-1.	4.27	3.0	.94	1.67	9.46	2.61	16.1	21.9	5.8	1.36	.5	.6	16.1	23.0	6.9	1.43	0.00
11 12A 5 7	3.61	2.40	2.26	4.15	-1.	5.25	0.0	1.00	0.00	0.00	0.00	12.4	0.0	0.0	0.00	.3	.3	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES (UF/L)																						
	3.39	2.8A	6.27	6.21	0.	7.55	3.7	1.61	1.4A	7.81	2.17	18.1	24.0	5.3	1.31	.6	.5	15.3	25.1	6.4	1.37	1



TABLEAU 5. Quantité et composition chimique des eaux de fonte captées par le lysimètre (L2) au lac Laflamme, 1984.

-1. = VALEUR NON DETECTABLE

-9. = MANQUE DES MESURES

RESULTATS D'ANALYSE LYSIMETRE 2 - LAC LAFLAMME - 1984

STAT	AN	MO	JR	ENF MM	E.EA CM	AlC UE/L	COLO MAG.	T.DP PPH	PH	COND US	CL= PPM	PO4= PPH	NO3= PPM	SO4= PPH	HCO3= PPM	NH4+ PPM	CA++ PPM	MG++ PPM	K+ PPM	NA+ PPM	AI+ PPH	MN+ PPH	C.IN PPM			
1	LY82	84-	4-18	108.0	12600	-1.0	5.0	-9.0	4.48	22.0	.18	.10	1.48	1.54	-1.0	64.00	.24	.05	.37	.08	11.0	49.0	-9.0			
2	LY82	84-	4-24	88.0	62400	-1.0	5.0	6.0	4.57	16.0	.10	-1.00	1.16	.97	-1.0	19.00	.24	.04	.32	.06	13.5	38.3	-1.0			
3	LY82	84-	4-25	86.0	25000	-1.0	5.0	4.0	4.56	15.0	.15	-1.00	1.40	.90	-1.0	67.00	.17	.03	.16	.04	8.0	28.3	.5			
4	LY82	84-	4-26	80.0	11500	-1.0	5.0	4.0	4.63	16.0	.14	-1.00	1.40	.90	-1.0	31.00	.18	.03	.17	.04	8.5	31.8	-1.0			
5	LY82	84-	4-27	82.0	25000	-1.0	5.0	3.5	4.54	16.0	.15	-1.00	1.50	.90	-1.0	50.00	.15	.03	.13	.04	8.5	27.0	-1.0			
6	LY82	84-	4-28	75.0	22000	-1.0	10.0	3.8	4.64	15.0	.18	-1.00	1.34	.81	-1.0	26.00	.14	.02	.13	.03	8.0	23.6	-1.0			
7	LY82	84-	4-29	65.0	31500	-1.0	0.0	2.3	4.73	16.0	.09	-1.00	.96	.56	-1.0	33.00	.11	.02	.12	.03	6.0	19.0	-1.0			
8	LY82	84-	5- 2	60.0	4500	-1.0	2.5	5.3	4.89	13.0	.16	-1.00	.76	1.37	-1.0	99.00	.42	.06	.36	.11	14.0	63.0	-1.0			
9	LY82	84-	5- 4	55.0	6000	-1.0	5.0	7.2	4.80	12.0	.15	.15	.50	1.13	-1.0	107.00	.30	.05	.40	.06	21.0	48.9	-1.0			
10	LY82	84-	5- 6	55.0	3500	-1.0	10.0	8.6	4.85	11.0	.09	.20	.47	1.00	-1.0	-1.00	.33	.05	.39	.04	42.0	45.5	-1.0			
11	LY82	84-	5- 7	55.0	7000	-1.0	5.0	7.6	4.84	10.0	.08	.20	.13	.55	-1.0	-1.00	.24	.04	.46	.06	18.2	38.0	-1.0			
12	LY82	84-	5- 8	55.0	20500	-1.0	5.0	5.6	4.98	7.5	.10	.10	.42	.58	-1.0	-1.00	.15	.03	.30	.02	15.0	25.0	-1.0			
13	LY82	84-	5- 9	55.0	32500	-1.0	5.0	4.6	4.89	9.2	.05	.10	.38	.82	-1.0	-1.00	.18	.03	.22	.01	15.0	28.0	-1.0			
14	LY82	84-	5-10	53.0	14500	-1.0	10.0	4.1	4.96	8.5	.06	-1.00	.32	.76	-1.0	-1.00	.16	.03	.29	.03	14.5	26.5	-1.0			
15	LY82	84-	5-11	51.0	11000	-1.0	5.0	4.6	4.87	9.5	.09	-1.00	.45	.71	-1.0	-1.00	.16	.03	.27	.01	13.5	25.3	-1.0			
16	LY82	84-	5-12	35.0	40000	-1.0	5.0	4.6	4.96	7.3	.06	-1.00	.47	.50	-1.0	-1.00	.13	.02	.21	.01	13.0	19.7	-1.0			
17	LY82	84-	5-13	17.0	22500	-1.0	10.0	-9.0	4.57	20.0	.09	-1.00	1.12	2.30	-1.0	217.00	.24	.04	.23	.04	21.0	34.6	-1.0			
18	LY82	84-	5-14	35.0	12500	-1.0	5.0	3.6	4.82	11.0	.08	-1.00	.76	1.48	-1.0	47.00	.21	.03	.29	.03	21.0	28.0	-1.0			
19	LY82	84-	5-15	-9.0	9000	-1.0	10.0	4.4	4.97	7.2	.06	-1.00	.40	.72	-1.0	-1.00	.12	.06	.24	-1.00	17.0	20.7	-1.0			
20	LY82	84-	5-16	25.0	6500	-1.0	10.0	5.2	5.05	7.0	.10	-1.00	.22	.47	-1.0	-1.00	.13	.02	.31	.03	18.0	20.8	-1.0			
21	LY82	84-	5-20	15.0	13500	-1.0	10.0	-9.0	5.21	4.5	.07	.15	.11	.27	-1.0	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00			
				CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES																						
				6.3 4.9 4.80 12.1 .11 .05 .75 .92 0.0 38. .20 .04 .27 -.01 15. 32. .0																						

TABLEAU 5 (suite)

0.0 = MANQUE DES MESURES  
-1.0 = VALEUR NON DETECTABLE

CONCENTRATION (UF/L) DES SUBSTANCES AUX STATIONS LYSIMETRE 2 LAC LAFLAMME - 1984

DATE	EXPERIMENTAL											THEORIQUE										
	CL	PO43-	NO3-	SO4=	HCO3-	H+	CA++	NH4+	MG++	K+	NA+	ANION	CATIO	DEFIC	C/A	ALTS+	MN+	ANIOT	CATIO	DEFIT	C/A	PHT
1 109 418	5.00	3.00	23.87	31.95	-1.	33.11	12.0	3.56	4.17	9.46	3.48	63.8	65.8	2.0	1.03	1.0	1.8	63.8	68.6	4.8	1.07	0.00
2 115 424	2.78	-1.00	18.71	20.12	-1.	26.92	12.0	1.06	3.33	8.18	2.61	41.6	54.1	12.5	1.30	1.2	1.4	41.6	56.7	15.1	1.36	0.00
3 116 425	4.17	-1.00	22.58	18.67	-1.	27.54	8.5	3.72	2.50	4.09	1.74	45.4	48.1	2.7	1.06	.7	1.0	45.4	49.8	4.4	1.10	0.00
4 117 426	3.89	-1.00	22.58	18.67	-1.	23.44	9.0	1.72	2.50	4.35	1.74	45.1	42.8	-2.4	.95	.7	1.2	45.1	44.6	-.5	.99	4.62
5 118 427	4.17	-1.00	24.19	18.67	-1.	28.84	7.5	2.78	2.50	3.32	1.74	47.0	46.7	-.4	.99	.8	1.0	47.0	48.4	1.4	1.03	0.00
6 119 428	5.00	-1.00	21.61	16.80	-1.	22.91	7.0	1.44	1.67	3.32	1.30	43.4	37.6	-5.8	.87	.7	.9	43.4	39.2	-4.2	.90	4.57
7 120 429	2.50	-1.00	15.48	11.62	-1.	18.62	5.5	1.83	1.67	3.07	1.30	29.6	32.0	2.4	1.08	.5	.7	29.6	33.2	3.6	1.12	0.00
8 123 5 2	4.44	-1.00	12.26	28.42	-1.	12.88	21.0	5.50	5.00	9.21	4.78	45.1	58.4	13.2	1.29	1.0	2.3	45.1	61.6	16.5	1.37	0.00
9 125 5 4	4.17	4.50	8.06	23.44	-1.	15.85	15.0	5.94	4.17	10.23	2.61	40.2	53.8	13.6	1.34	1.6	1.8	40.2	57.2	17.0	1.42	0.00
10 127 5 6	2.50	6.01	7.58	20.75	-1.	14.13	16.5	-1.00	4.17	9.97	1.74	36.8	46.5	9.7	1.26	3.1	1.7	36.8	51.2	14.4	1.39	0.00
11 128 5 7	2.22	6.01	2.10	11.41	-1.	14.48	12.0	-1.00	3.33	11.74	2.61	21.7	44.2	22.4	2.03	1.3	1.4	21.7	46.9	25.1	2.16	0.00
12 129 5 8	2.78	3.00	6.77	12.03	-1.	10.47	7.5	-1.00	2.50	7.67	.87	24.6	29.0	4.4	1.18	1.0	.9	24.6	30.9	6.3	1.26	0.00
13 130 5 9	1.39	3.00	6.13	17.01	-1.	12.88	9.0	-1.00	2.50	5.63	.43	27.5	30.4	2.9	1.11	1.1	1.0	27.5	32.5	5.0	1.18	0.00
14 131 510	1.67	-1.00	5.16	15.77	-1.	10.96	8.0	-1.00	2.50	7.42	1.30	22.6	30.2	7.6	1.34	1.0	1.0	22.6	32.1	9.5	1.42	0.00
15 132 511	2.50	-1.00	7.26	14.73	-1.	13.40	8.0	-1.00	2.50	6.91	.43	24.5	31.3	6.8	1.28	1.0	.9	24.5	33.2	8.7	1.36	0.00
16 133 512	1.67	-1.00	7.58	10.37	-1.	10.96	6.5	-1.00	1.67	5.37	.43	19.6	24.9	5.3	1.27	.9	.7	19.6	26.5	6.9	1.35	0.00
17 134 513	2.50	-1.00	18.06	47.72	-1.	26.92	12.0	12.06	3.33	5.88	1.74	68.3	61.9	-6.4	.91	1.9	1.3	68.3	65.0	-3.2	.95	4.52
18 135 514	2.22	-1.00	12.26	30.71	-1.	15.14	10.5	2.61	2.50	7.42	1.30	45.2	39.5	-5.7	.87	1.6	1.0	45.2	42.1	-3.1	.93	4.74
19 136 515	1.67	-1.00	6.45	14.94	-1.	10.72	6.0	-1.00	5.00	6.14	-1.00	23.1	27.9	4.8	1.21	1.1	.8	23.1	29.7	6.7	1.29	0.00
20 137 516	2.78	-1.00	3.55	9.75	-1.	8.91	6.5	-1.00	1.67	7.93	1.30	16.1	26.3	10.2	1.64	1.1	.8	16.1	28.1	12.1	1.75	0.00
21 141 520	1.94	4.50	1.77	5.60	-1.	6.17	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	13.8	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00

CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES (UF/L)  
2.95 1.43 12.10 19.01 0. 17.40 10.0 2.11 2.96 6.87 1.67 35.5 41.6 8.0 1.20 1.2 1.2 34.8 43.9 9.8 1.27 4.61

TABLEAU 5 (suite)

0.0 = MANQUE DES MESURES  
-1.0 = VALEUR NON DETECTABLE

MOYENNE CONCENTRATIONS DES 3 LYSIMETRES AU LAC LAFLANNE - 1984 (UF/L)

NO JULIEN	JOUR	MNEG	FOITE	PH	CL-	PO4=	NO3-	SO4+	HCO3-	H+	CA++	NH4+	MG++	K+	NA+	ALM+	ALT+	MN+	ANION	CATION
		CUM																		
1	109	101.	12.9	4.63	7.04	3.00	16.61	30.57	0.00	24.19	15.67	2.78	4.44	8.87	4.35	11.67	1.00	1.81	55.22	59.37
2	115	82.	55.0	4.64	4.08	0.00	21.88	20.68	0.00	23.20	14.17	2.17	4.72	8.95	2.17	10.33	.89	1.35	46.63	55.31
3	116	79.	21.8	4.64	4.26	0.00	21.50	18.67	0.00	23.32	10.83	2.70	3.06	3.92	1.74	7.00	.60	.97	44.44	45.5
4	117	74.	12.2	4.68	4.17	0.00	18.82	17.29	0.00	21.22	9.00	2.31	2.78	4.01	2.46	7.67	.63	1.00	40.27	41.01
5	118	72.	19.3	4.72	3.80	0.00	15.59	13.14	0.00	20.32	6.83	1.82	2.22	2.39	1.74	5.83	.48	.76	32.53	35.31
6	119	67.	21.0	4.89	4.63	0.00	13.17	11.55	0.00	14.06	5.67	3.89	1.39	2.13	1.16	6.00	.43	.61	29.30	28.31
7	120	58.	23.5	4.93	2.09	0.00	10.24	8.30	0.00	13.02	4.75	1.83	1.25	2.56	.87	5.50	.38	.49	20.63	23.34
8	121	48.	37.0	5.12	1.39	0.00	6.29	6.85	0.00	7.59	6.50	0.00	1.67	2.05	0.00	5.50	.30	.45	14.53	17.81
9	122	37.	31.5	4.83	4.72	0.00	24.68	21.16	0.00	14.79	14.50	2.50	3.33	7.42	2.17	12.50	.93	1.27	50.56	44.72
10	123	59.	5.3	4.94	5.28	0.00	10.65	26.76	0.00	11.68	21.25	3.67	5.42	8.96	3.48	29.50	1.94	1.98	42.69	54.44
11	125	55.	6.0	4.80	4.17	4.50	8.06	23.44	0.00	15.85	15.00	5.94	4.17	10.23	2.61	21.00	1.60	1.78	40.18	53.81
12	127	60.	8.0	4.78	3.75	6.01	6.86	28.63	0.00	17.04	22.00	0.00	5.42	12.79	2.18	30.50	2.32	1.99	42.24	59.41
13	128	55.	7.0	4.84	2.22	6.01	2.10	11.41	0.00	14.45	12.00	0.00	3.33	11.76	2.61	18.20	1.34	1.38	21.74	44.16
14	129	45.	20.2	5.06	2.41	3.00	5.75	8.92	0.00	8.85	6.33	0.00	1.95	4.94	.72	12.83	.76	.72	18.08	22.79
15	130	45.	36.7	4.83	2.41	3.00	5.32	21.85	0.00	14.75	12.33	0.00	3.33	7.59	.58	15.67	1.16	1.35	30.58	38.51
16	131	44.	14.5	4.94	1.85	0.00	3.87	17.29	0.00	11.41	9.83	0.00	2.78	8.02	1.16	15.83	1.06	1.13	23.01	33.21
17	132	42.	10.3	4.94	2.59	0.00	6.62	14.94	0.00	11.58	9.33	0.00	2.50	6.91	1.01	12.83	.86	1.00	24.14	31.33
18	133	29.	41.8	4.95	2.04	0.00	6.61	12.65	0.00	11.22	8.33	.83	1.95	5.28	.43	12.33	.82	.87	21.31	27.51
19	134	23.	31.0	4.57	2.31	0.00	14.46	48.62	0.00	27.09	15.00	8.65	3.89	9.21	1.30	19.33	1.73	1.60	65.39	65.11
20	135	24.	12.5	4.93	1.85	0.00	8.33	24.07	0.00	12.15	9.67	2.95	2.50	6.05	1.16	20.50	1.36	.92	34.25	33.44
21	136	-9.	8.5	5.08	1.94	0.00	5.43	12.45	0.00	8.59	7.50	0.00	2.78	4.35	.43	16.00	.90	.72	19.82	23.50
22	137	17.	6.5	5.22	4.07	4.51	2.96	8.99	0.00	6.29	9.00	0.00	2.22	5.97	2.03	22.33	1.03	.85	19.02	25.51
23	141	14.	26.3	5.26	1.76	4.50	1.67	5.81	0.00	5.58	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	10.73	-9.00

TABLEAU 6. Composition chimique des eaux du ruisseau hypodermique, lac Laflamme, 1984.

-1. = VALEUR NON DETECTABLE  
 -9. = MANQUE DES MESURES

RESULTATS D'ANALYSE HYPODERMIQUE - LAC LAFLAMME - 1984

STAT	AN	MO	JR	FWF MM	E.EA CCM	AlC UE/L	COLO MAG.	COR PPM	PH	COND US	CL- PPM	PO4=- PPM	NO3= PPM	SO4= PPM	HCO3= PPM	NH4+ PPM	CA++ PPM	MG++ PPM	K+ PPM	NA+ PPM	Al+ PPB	MN+ PPB	C.IN PPM
1	HYPO	84-	4-18	-9.0	-9	-1.0	10.0	-9.0	4.64	35.0	.42	-1.00	8.34	4.78	-1.0	-1.00	1.95	.21	.26	.58	850.0	61.0	-9.0
2	HYPO	84-	4-24	-9.0	-9	-1.0	5.0	5.6	4.60	33.0	.33	-1.00	5.18	4.33	-1.0	-1.00	1.70	.18	.28	.52	795.0	56.0	-1.0
3	HYPO	84-	4-25	-9.0	-9	-1.0	10.0	4.6	4.59	33.0	.33	-1.00	4.20	4.50	-1.0	-1.00	1.66	.19	.51	.22	790.0	54.0	1.2
4	HYPO	84-	4-26	-9.0	-9	-1.0	5.0	5.2	4.63	33.0	.33	-1.00	4.30	4.60	-1.0	-1.00	1.55	.18	.19	.51	812.0	49.8	-1.0
5	HYPO	84-	4-27	-9.0	-9	-1.0	10.0	4.7	4.64	31.0	.32	-1.00	3.70	4.50	-1.0	-1.00	1.46	.18	.17	.50	776.0	47.5	1.0
6	HYPO	84-	4-28	-9.0	-9	-1.0	15.0	6.2	4.67	29.0	.33	-1.00	3.56	4.75	-1.0	-1.00	1.44	.17	.18	.49	775.0	44.0	-1.0
7	HYPO	84-	4-29	-9.0	-9	-1.0	15.0	6.1	4.62	32.0	.30	-1.00	2.92	4.82	-1.0	-1.00	1.31	.16	.20	.43	740.0	48.8	-1.0
8	HYPO	84-	4-30	-9.0	-9	-1.0	15.0	6.1	4.61	32.0	.28	-1.00	2.71	4.91	-1.0	-1.00	1.39	.16	.19	.42	730.0	47.0	-1.0
9	HYPO	84-	5- 1	-9.0	-9	-1.0	15.0	6.3	4.66	26.0	.24	-1.00	1.99	4.51	-1.0	-1.00	1.24	.15	.19	.40	720.0	45.5	-1.0
10	HYPO	84-	5- 2	-9.0	-9	-1.0	20.0	5.4	4.62	30.0	.28	-1.00	2.34	4.77	-1.0	-1.00	1.29	.15	.16	.43	745.0	44.0	-1.0
11	HYPO	84-	5- 3	-9.0	-9	-1.0	10.0	5.4	4.69	28.0	.29	-1.00	2.38	4.90	-1.0	-1.00	1.30	.15	.20	.43	725.0	43.5	.5
12	HYPO	84-	5- 4	-9.0	-9	-1.0	10.0	5.8	4.70	27.0	.31	-1.00	2.29	5.03	-1.0	-1.00	1.35	.15	.15	.45	710.0	44.0	.5
13	HYPO	84-	5- 5	-9.0	-9	-1.0	5.0	6.0	4.69	28.0	.31	-1.00	2.50	4.92	-1.0	-1.00	1.26	.15	.20	.44	700.0	46.5	-1.0
14	HYPO	84-	5- 6	-9.0	-9	-1.0	10.0	5.5	4.66	28.0	.33	-1.00	2.49	4.95	-1.0	-1.00	1.37	.16	.20	.48	665.0	43.8	.5
15	HYPO	84-	5- 7	-9.0	-9	-1.0	10.0	4.6	4.72	27.0	.21	-1.00	1.90	3.44	-1.0	-1.00	1.50	.15	.17	.47	705.0	43.3	1.1
16	HYPO	84-	5- 8	-9.0	-9	-1.0	10.0	5.3	4.69	28.0	.27	-1.00	2.18	5.16	-1.0	-1.00	1.35	.14	.16	.44	710.0	38.8	.9
17	HYPO	84-	5- 9	-9.0	-9	-1.0	17.0	6.3	4.76	26.0	.26	-1.00	1.60	5.17	-1.0	-1.00	1.30	.14	.17	.41	695.0	40.0	-1.0
18	HYPO	84-	5-10	-9.0	-9	-1.0	30.0	6.0	4.74	24.0	.25	-1.00	1.62	5.45	-1.0	-1.00	1.32	.14	.14	.42	710.0	38.8	-1.0
19	HYPO	84-	5-11	-9.0	-9	-1.0	10.0	6.2	4.70	25.0	.29	-1.00	1.83	6.04	-1.0	-1.00	1.32	.14	.21	.46	700.0	38.8	-1.0
20	HYPO	84-	5-12	-9.0	-9	-1.0	20.0	6.9	4.69	26.0	.22	-1.00	1.32	5.00	-1.0	-1.00	1.27	.14	.19	.39	668.0	37.0	-1.0
21	HYPO	84-	5-13	-9.0	-9	-1.0	15.0	-9.0	4.67	25.0	.27	-1.00	1.12	5.31	-1.0	-1.00	1.23	.14	.19	.38	650.0	36.5	-1.0
22	HYPO	84-	5-14	-9.0	-9	-1.0	15.0	6.1	4.73	7.5	.30	-1.00	1.31	5.44	-1.0	-1.00	1.23	.14	.20	.43	660.0	37.5	-1.0
23	HYPO	84-	5-15	-9.0	-9	-1.0	25.0	5.8	4.72	24.0	.29	-1.00	1.31	5.84	-1.0	-1.00	1.17	.13	.13	.41	690.0	38.5	-1.0
24	HYPO	84-	5-16	-9.0	-9	-1.0	15.0	5.6	4.75	25.0	.23	-1.00	1.17	5.32	-1.0	-1.00	1.20	.13	.16	.42	668.0	39.3	-1.0
25	HYPO	84-	5-17	-9.0	-9	-1.0	12.5	5.4	4.76	23.0	.18	-1.00	1.20	5.14	-1.0	-1.00	1.18	.14	.12	.42	655.0	39.5	.5
26	HYPO	84-	5-18	-9.0	-9	-1.0	15.0	5.6	4.78	23.0	.18	-1.00	1.36	5.38	-1.0	-1.00	1.17	.13	.13	.41	660.0	38.3	-1.0
27	HYPO	84-	5-19	-9.0	-9	-1.0	15.0	5.9	4.78	28.0	.20	-1.00	1.05	5.10	-1.0	-1.00	1.20	.13	.14	.43	675.0	39.5	-1.0
28	HYPO	84-	5-20	-9.0	-9	-1.0	15.0	5.5	4.76	21.0	.18	-1.00	1.05	5.15	-1.0	-1.00	1.21	.13	.14	.44	670.0	39.3	.5
29	HYPO	84-	5-21	-9.0	-9	-1.0	15.0	5.5	4.74	23.0	.16	-1.00	.90	5.05	-1.0	-1.00	1.16	.13	.14	.42	700.0	38.3	-1.0
30	HYPO	84-	5-22	-9.0	-9	-1.0	15.0	6.5	4.76	24.0	.18	-1.00	.79	4.52	-1.0	-1.00	1.12	.13	.17	.46	675.0	38.9	-1.0
31	HYPO	84-	5-23	-9.0	-9	-1.0	20.0	6.5	4.71	24.0	.18	-1.00	.60	4.35	-1.0	-1.00	1.16	.13	.16	.41	615.0	39.3	-1.0
32	HYPO	84-	5-24	-9.0	-9	-1.0	20.0	6.5	4.68	24.0	.16	-1.00	.52	4.29	-1.0	-1.00	1.11	.13	.18	.37	630.0	35.3	.5
CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES																							
							14.0	5.8	4.69	26.6	.26	0.00	2.24	4.92	0.0	16.	1.33	.15	.19	.43	708.	43.	.2

TABLEAU 6 (suite)

0.0 = MANQUE DES MESURES  
-1.0 = VALEUR NON DETECTABLE

CONCENTRATION (UF/L) DES SUBSTANCES AUX STATIONS HYPODERMIQUE LAC LAFLAMME - 1984

DATE	EXPERIMENTAL										THEORIQUE													
	CL-	PO43-	NO3-	SO4=	HCO3-	H+	CA++	NH4+	MG++	K+	NA+	ANION	CATIO	DEFIC	C/A	ALT3+	MN+	ANIOT	CATTI	DEFIT	C/A	PHT		
1	109	418	11.67	-1.00	134.52	99.17	-1.	22.91	97.5	-1.00	17.50	6.65	25.22	245.4	169.8	-75.6	.69	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
2	115	424	9.17	-1.00	83.55	89.83	-1.	25.12	85.0	-1.00	15.00	7.16	22.61	182.5	154.9	-27.7	.85	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
3	116	425	9.17	-1.00	67.74	93.36	-1.	25.70	83.0	-1.00	15.83	13.04	9.57	170.3	147.1	-23.1	.86	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
4	117	426	9.17	-1.00	69.35	95.44	-1.	23.44	77.5	-1.00	15.00	4.86	22.17	174.0	143.0	-31.0	.82	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
5	118	427	8.89	-1.00	59.68	93.36	-1.	22.91	73.0	-1.00	15.00	4.35	21.74	161.9	137.0	-24.9	.85	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	119	428	9.17	-1.00	57.42	98.55	-1.	21.38	72.0	-1.00	14.44	4.60	21.30	165.1	147.9	-17.2	.90	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
7	120	429	8.33	-1.00	47.10	100.00	-1.	23.99	65.5	-1.00	13.33	5.12	18.70	155.4	126.6	-28.8	.81	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
8	121	430	7.78	-1.00	43.71	101.87	-1.	24.55	69.5	-1.00	13.33	4.86	18.26	153.4	130.5	-22.9	.85	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
9	122	5 1	6.67	-1.00	32.10	93.57	-1.	21.88	62.0	-1.00	12.50	4.86	17.39	132.3	118.6	-13.7	.90	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
10	123	5 2	7.78	-1.00	37.74	98.96	-1.	23.99	64.5	-1.00	12.50	4.09	18.70	144.5	123.8	-20.7	.86	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
11	124	5 3	8.06	-1.00	38.39	101.66	-1.	20.42	65.0	-1.00	12.50	5.12	18.70	148.1	121.7	-26.4	.82	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
12	125	5 4	8.61	-1.00	36.94	104.36	-1.	19.95	67.5	-1.00	12.50	3.84	19.57	149.9	123.4	-26.5	.82	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
13	126	5 5	8.61	-1.00	40.32	102.07	-1.	20.42	63.0	-1.00	12.50	5.12	19.13	151.0	120.2	-30.8	.80	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
14	127	5 6	9.17	-1.00	40.16	102.70	-1.	21.88	68.5	-1.00	13.33	5.12	20.87	152.0	129.7	-22.3	.85	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
15	128	5 7	5.83	-1.00	30.65	71.37	-1.	19.05	75.0	-1.00	15.22	4.35	20.43	107.8	146.6	38.7	1.36	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
16	129	5 8	7.50	-1.00	35.16	107.05	-1.	20.42	67.5	-1.00	11.67	4.09	19.13	149.7	122.8	-26.9	.82	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
17	130	5 9	7.22	-1.00	25.81	107.26	-1.	17.38	65.0	-1.00	11.67	4.35	17.83	140.3	116.2	-24.1	.83	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
18	131	510	6.94	-1.00	26.13	113.07	-1.	18.20	66.0	-1.00	11.67	3.58	18.26	146.1	117.7	-28.4	.81	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
19	132	511	8.06	-1.00	29.52	125.31	-1.	19.95	66.0	-1.00	11.67	5.37	20.00	162.9	123.0	-39.9	.76	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
20	133	512	6.11	-1.00	21.29	103.73	-1.	20.42	63.5	-1.00	11.67	4.86	16.96	131.1	117.4	-13.7	.90	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
21	134	513	7.50	-1.00	18.06	110.17	-1.	21.38	61.5	-1.00	11.67	4.86	16.52	135.7	115.9	-19.8	.85	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
22	135	514	8.33	-1.00	21.13	112.86	-1.	18.62	61.5	-1.00	11.67	5.12	18.70	142.3	115.6	-26.7	.81	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
23	136	515	8.06	-1.00	21.13	121.16	-1.	19.05	58.5	-1.00	10.83	3.32	17.83	150.3	109.5	-40.8	.73	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
24	137	516	6.39	-1.00	18.87	110.37	-1.	17.78	60.0	-1.00	10.83	4.09	18.26	135.6	111.0	-24.7	.82	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
25	138	517	5.00	-1.00	19.35	106.64	-1.	17.38	59.0	-1.00	11.67	3.07	18.26	131.0	109.4	-21.6	.83	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
26	139	518	5.00	-1.00	21.94	111.62	-1.	16.60	58.5	-1.00	10.83	3.32	17.83	138.6	107.1	-31.5	.77	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
27	140	519	5.56	-1.00	16.94	105.81	-1.	16.60	60.0	-1.00	10.83	3.58	18.70	128.3	109.7	-18.6	.86	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
28	141	520	5.00	-1.00	16.94	106.85	-1.	17.38	60.5	-1.00	10.83	3.58	19.13	128.8	111.4	-17.4	.87	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
29	142	521	4.44	-1.00	14.52	104.77	-1.	18.20	58.0	-1.00	10.83	3.58	18.26	123.7	108.9	-14.9	.88	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
30	143	522	5.00	-1.00	12.74	93.78	-1.	17.38	56.0	-1.00	10.83	4.35	20.00	111.5	108.6	-3.0	.97	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
31	144	523	5.00	-1.00	9.68	90.25	-1.	19.50	58.0	-1.00	10.83	4.09	17.83	104.9	110.2	5.3	1.05	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
32	145	524	4.44	-1.00	8.39	89.00	-1.	20.89	55.5	-1.00	10.83	4.60	16.09	101.8	107.9	6.1	1.06	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00

CONCENTRATION MOYENNE ARITHMETIQUE DES PARAMETRES (UFQ/L)

7.30 0.00 36.16 102.06 0. 20.46 66.4 .93 12.45 4.78 18.87 145.5 123.8 16.7 .86 I 1.6 0.0 I I I I I

TABLEAU 7. Composition chimique des eaux souterraines au lac Laflamme, avril-mai 1984.

Date	Couleur (Hazen)	C <sub>org</sub> mg C L <sup>-1</sup>	pH	Cond. μS cm <sup>-1</sup>	Cl mg L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> mg L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg L <sup>-1</sup>	C <sub>in</sub> mg L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> μg L <sup>-1</sup>	Ca <sup>++</sup> mg L <sup>-1</sup>	Mg <sup>++</sup> mg L <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> mg L <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> mg L <sup>-1</sup>	Al <sup>+</sup> μg L <sup>-1</sup>	Mn μg L <sup>-1</sup>
24-04	15	6.4	5.96	29.5	0.66	-	0.09	7.84	<0.5	<10	2.15	0.24	0.33	0.85	675	36
30-04	40	10.43	4.36	38.0	0.39	-	0.96	4.86	<0.5	<10	1.13	0.15	0.17	0.61	755	20
02-05	40	8.39	4.32	38.5	0.27	-	0.96	5.58	<0.5	<10	1.01	0.12	0.10	0.52	640	16
04-05	30	8.1	4.39	34.5	0.32	-	0.69	6.26	1.6	<10	0.94	0.13	0.13	0.51	500	17
06-05	30	7.5	4.45	32.5	0.29	-	0.49	6.66	0.8	<10	1.03	0.14	0.14	0.54	438	20
08-05	25	4.6	4.48	33.5	0.31	-	0.66	6.16	1.0	<10	1.07	0.14	0.09	0.51	440	18
10-05	17.5	8.9	4.41	32.0	0.26	-	0.72	6.29	<0.5	<10	0.99	0.12	0.09	0.49	625	17
12-05	40	9.4	4.39	34.0	0.28	-	0.57	6.32	<0.5	<10	0.98	0.12	0.13	0.46	615	16

TABLEAU 8. Bilan hydrologique du lysimètre L2 et bilan hydrologique moyen des lysimètres L1, L2 et L3 pour la fonte de 1984 du lac Laflamme.

18 avril - 20 mai 1984

Équivalence en eau (cm) du couvert de neige (station L2) le 18 avril 1984	=	48.6	
Équivalence en eau (cm) du couvert de neige (station L2) le 20 mai 1984	=	6.45	
			41.15
Écoulement total (cm) du lysimètre L2 (19 avril-20 mai)	=	49.9	
Précipitation (cm, forêt Montmorency, 19 avril-20 mai)	=	9.97	
			39.93
	Δ (-)		1.22

28 avril - 20 mai 1984

Équivalence en eau (cm) du couvert de neige (valeur moyenne des stations 6, 9, 11, WE, NS) le 28 avril	=	27.6	
Équivalence en eau (cm) du couvert de neige (valeur moyenne des stations 6, 9, 11, WE, NS) le 20 mai	=	6.2	
			21.4
Écoulement total (valeur moyenne des lysimètres L1, L2 et L3)	=	32.6	
Précipitation totale (valeur moyenne, cm) des collecteurs de précipitation	=	8.38	
			24.22
	Δ (+)		2.82

TABLEAU 9. Acidité des eaux atmosphériques et de fonte 1984.

EAUX	CORRÉLATION D'ACIDITÉ (concentrations $\mu\text{éq L}^{-1}$ )	$r^2$	S	N
précipitation	$\text{H}^+ = 0,54 (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) + 2,34$	0,93	0,00001	15
neige au sol	$\text{H}^+ = 0,33 (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) + 3,11$	0,75	0,0005	10
fonte (lys)	$\text{H}^+ = 0,42 (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) + 2,89$	0,76	0,00001	59*

\* moyenne de trois lysimètres (L1, L2, L3)

TABLEAU 10 Bilan chimique (meq m<sup>-2</sup>; Al et Mn, mg m<sup>-2</sup>) pour la fonte de neige du 28 avril et du 20 mai 1984.

	H <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	Al	Mn	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	déficit anionique
charge totale dans la neige au 28-04-84*	2.31	0.72	0.73	1.74	0.37	1.01	2.81	3.30	1.10	2.37	1.99	0.97	(-)0.84
apport de la charge totale par précipitation à partir du 28-04-84	2.67	0.83	0.42	0.31	0.20	0.88	1.10	0.83	0.46	1.34	3.60	0.00	(-)0.01
sommes des charges	4.98	1.55	1.15	2.05	0.57	1.89	3.91	4.13	1.56	3.71	5.59	0.97	(-)0.85
charge moyenne totale observée aux lysimètres L1, L2 et L3 (29 avril - 20 mai 1984)	4.25	0.52	0.31	1.02	0.83	3.20	4.18	9.63	0.82	2.83	5.84	0.34	(-)1.14
Δ, perte (-) ou gain (+) des espèces ioniques par les eaux de fonte par rapport à la somme de la charge totale (28 avril) et les eaux de précipitation	-0.73	-1.03	-0.84	-0.13	0.26	1.31	0.27	5.50	-0.73	-0.88	0.25	-0.63	(-)0.29

\* la charge totale restant sur le sol pour chaque espèce ionique à la fin de l'étude (20 mai, hauteur de neige: 6 cm) n'est pas considérée dans le calcul du bilan

Tableau 11. Les valeurs des  $C_0$ ,  $H_0$  et  $k$  pour la fonte 1983 et 1984.

	Paramètre	$C_0$ ( $\mu\text{eq/l}$ )	$H_0$ (mm)	$k$	
1983	$\text{SO}_4^{=}$	20.51	195	0.0193	1) 12 au 18 avril
		21.78	166	0.0115	2) 24 au 29 avril
	$\text{NO}_3^-$	21.75	195	0.0002	
		19.92	166	0.0002	
	$\text{H}^+$	17.74	195	0.0029	
		28.58	166	0.0045	
1984	$\text{SO}_4^{=}$	8.95	455	0.0049	1) 24 au 30 avril
		4.77	258	0.0147	2) 6 au 8 mai
	$\text{NO}_3^-$	10.52	455	0.0043	
		4.19	258	0.0007	
	$\text{H}^+$	13.5	455	0.0022	
		6.76	258	0.0049	



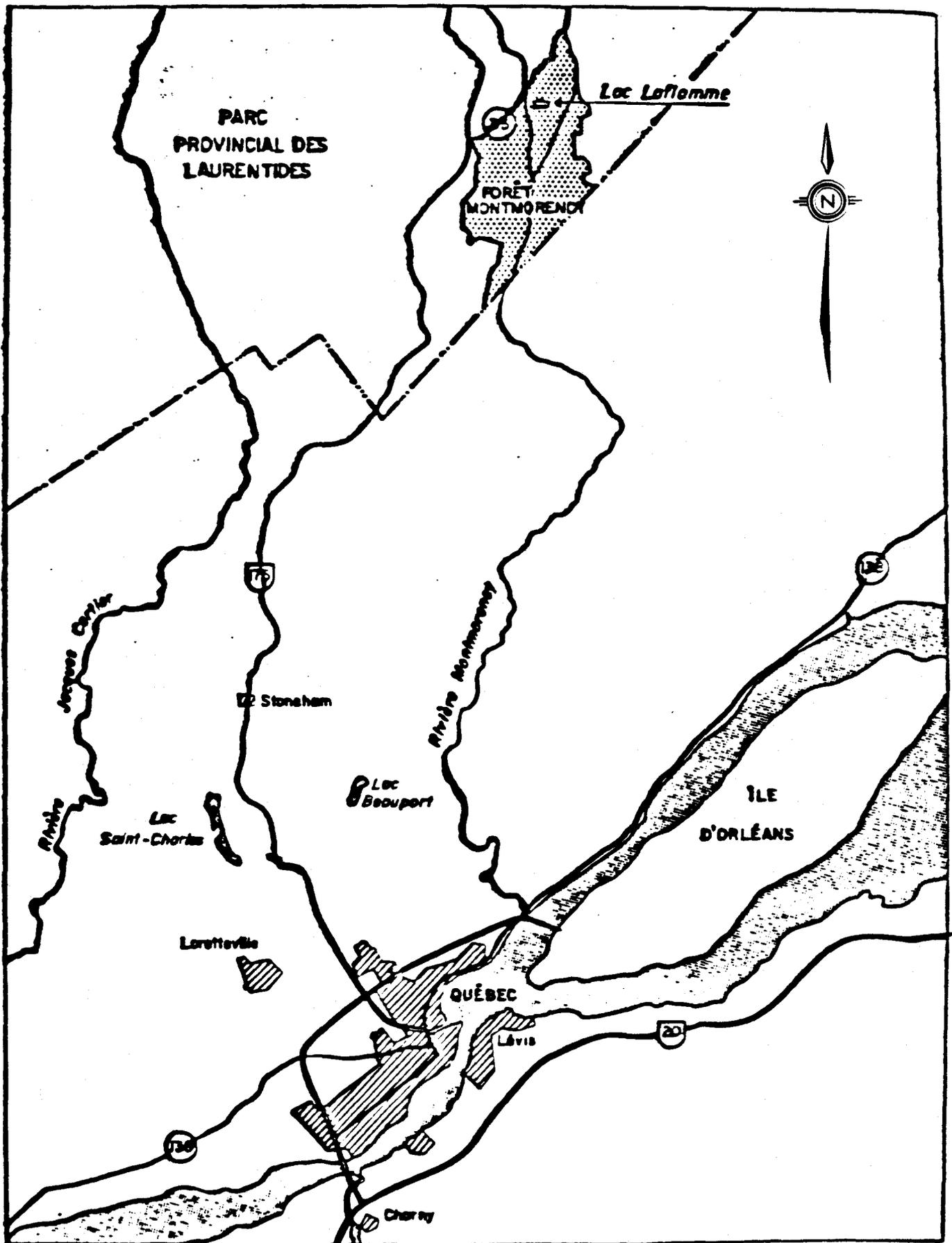


FIGURE 1. Localisation du bassin du lac Laflamme.

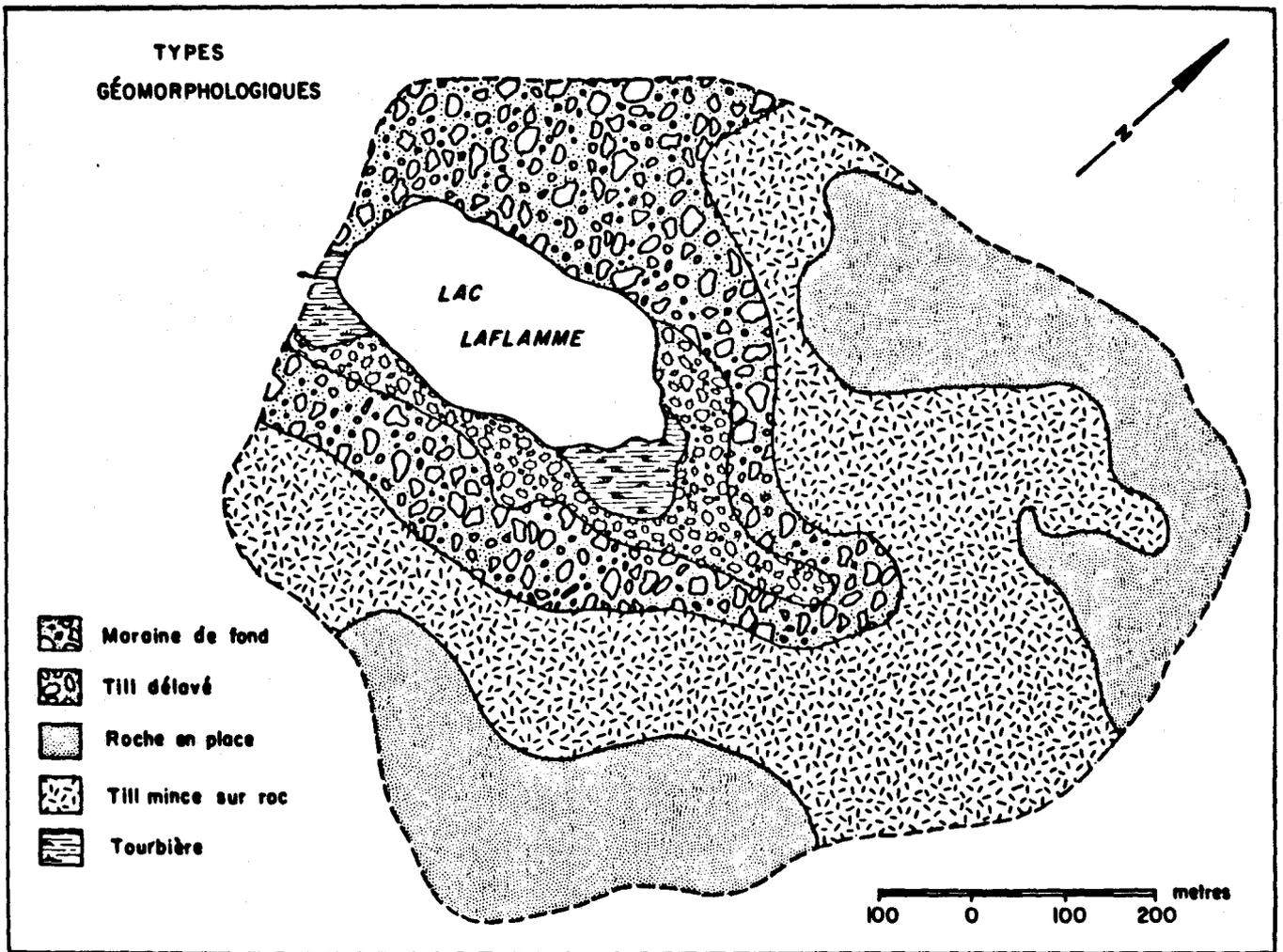


FIGURE 2. Types géomorphologiques du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.

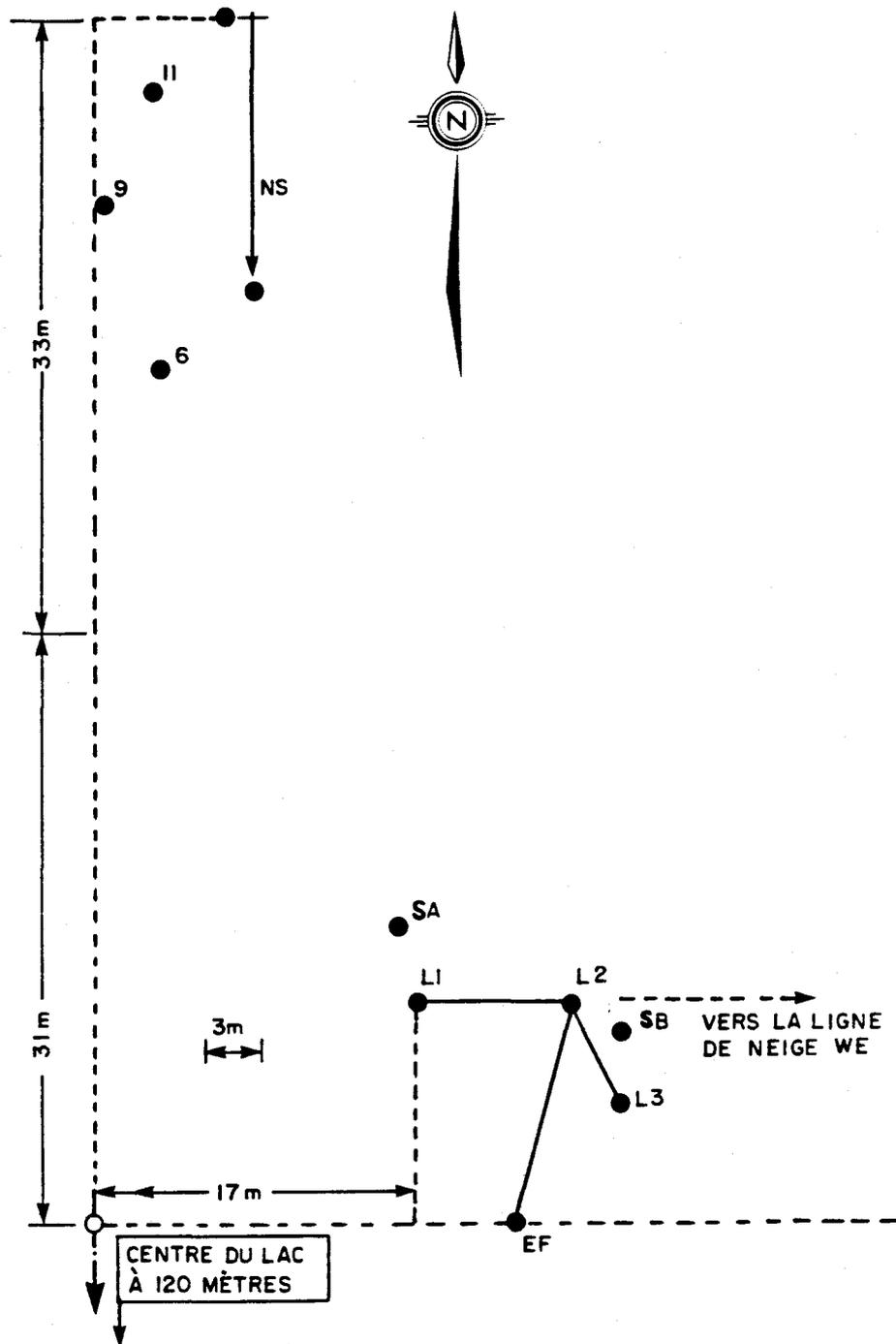


Figure 3. Stations d'échantillonnage sur le versant nord du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.

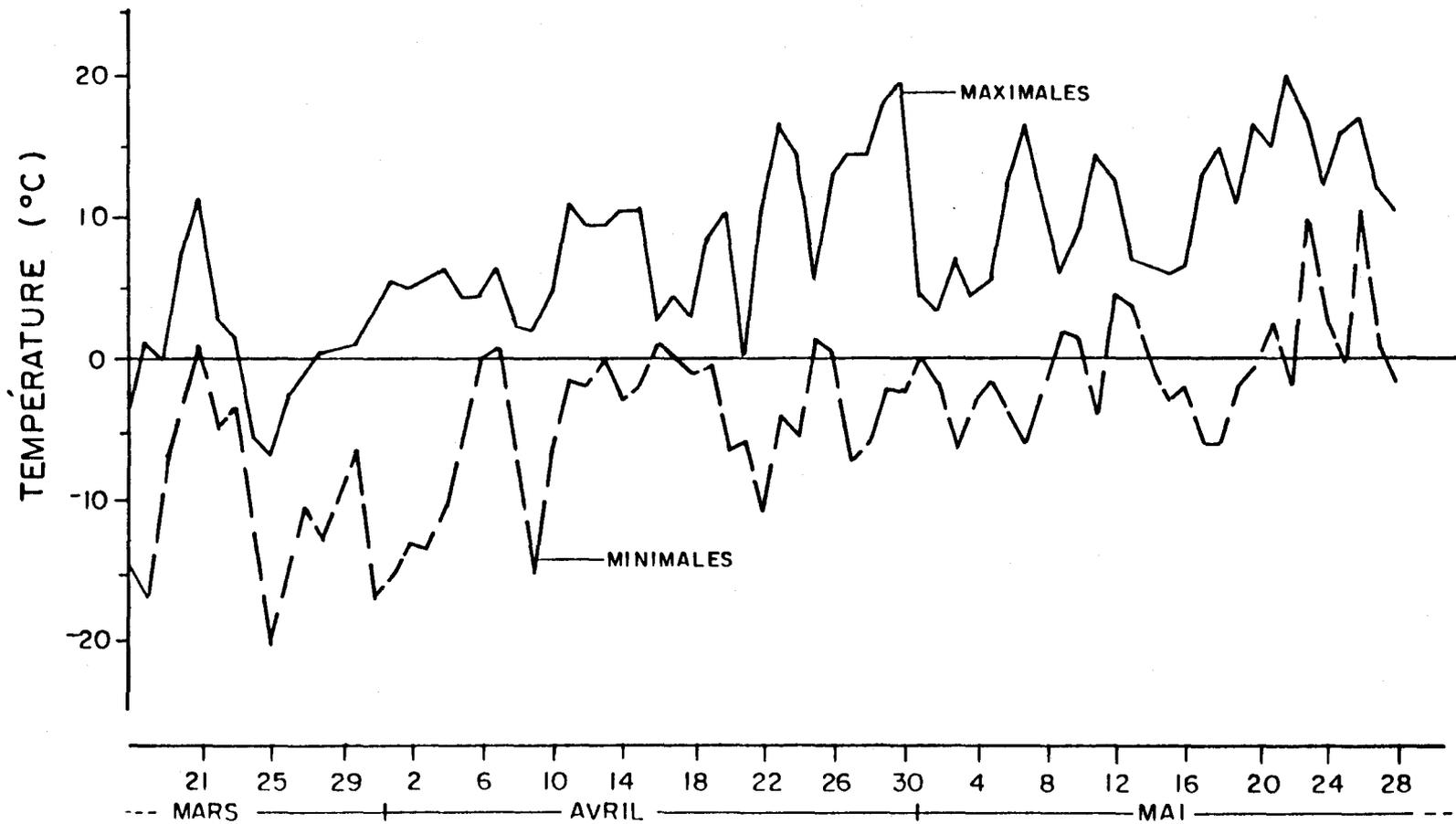


Figure 4 Evolution des températures journalières maximales et minimales à la station météorologique du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.

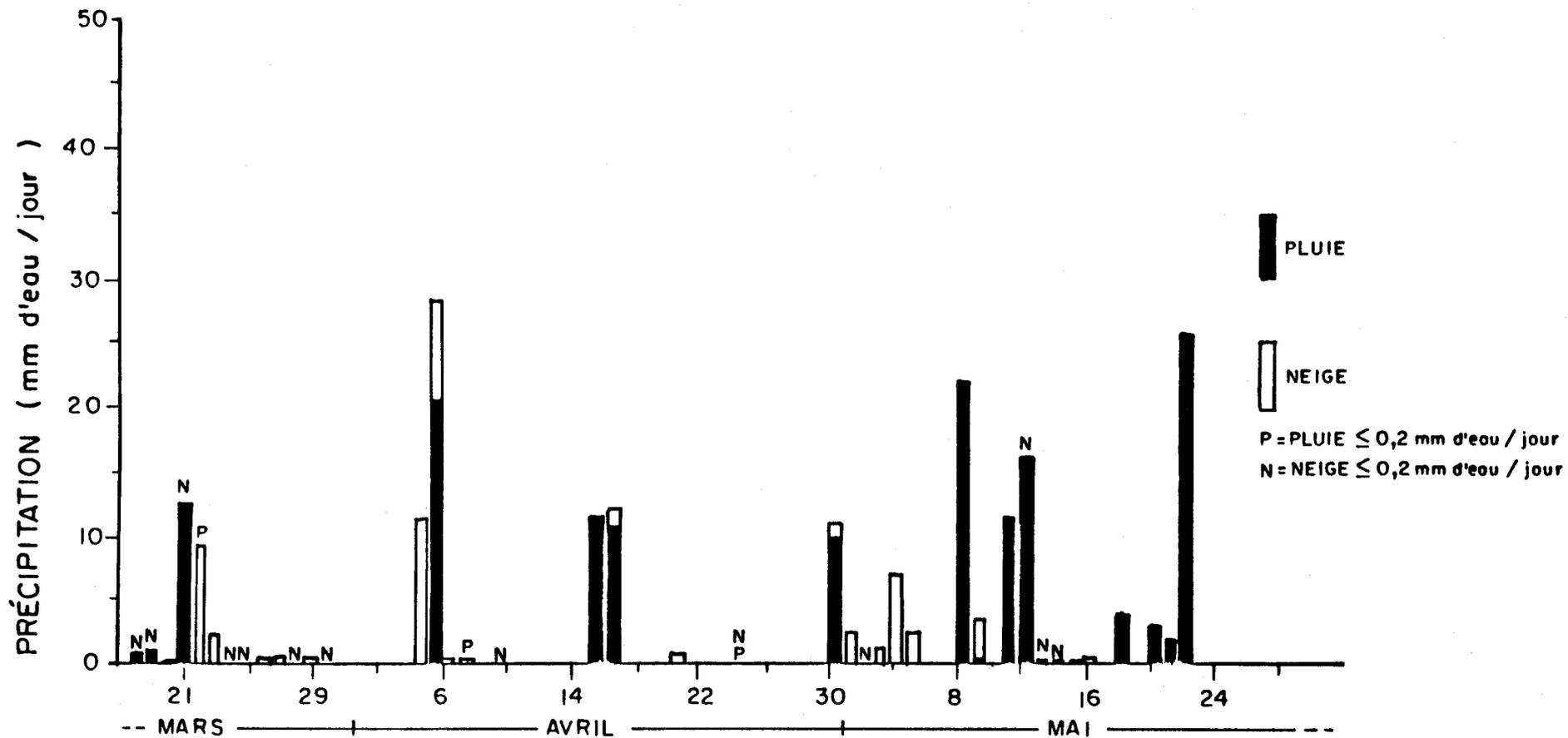


Figure 5 Evolution des précipitations journalières (pluie et neige) à la station météorologique du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.

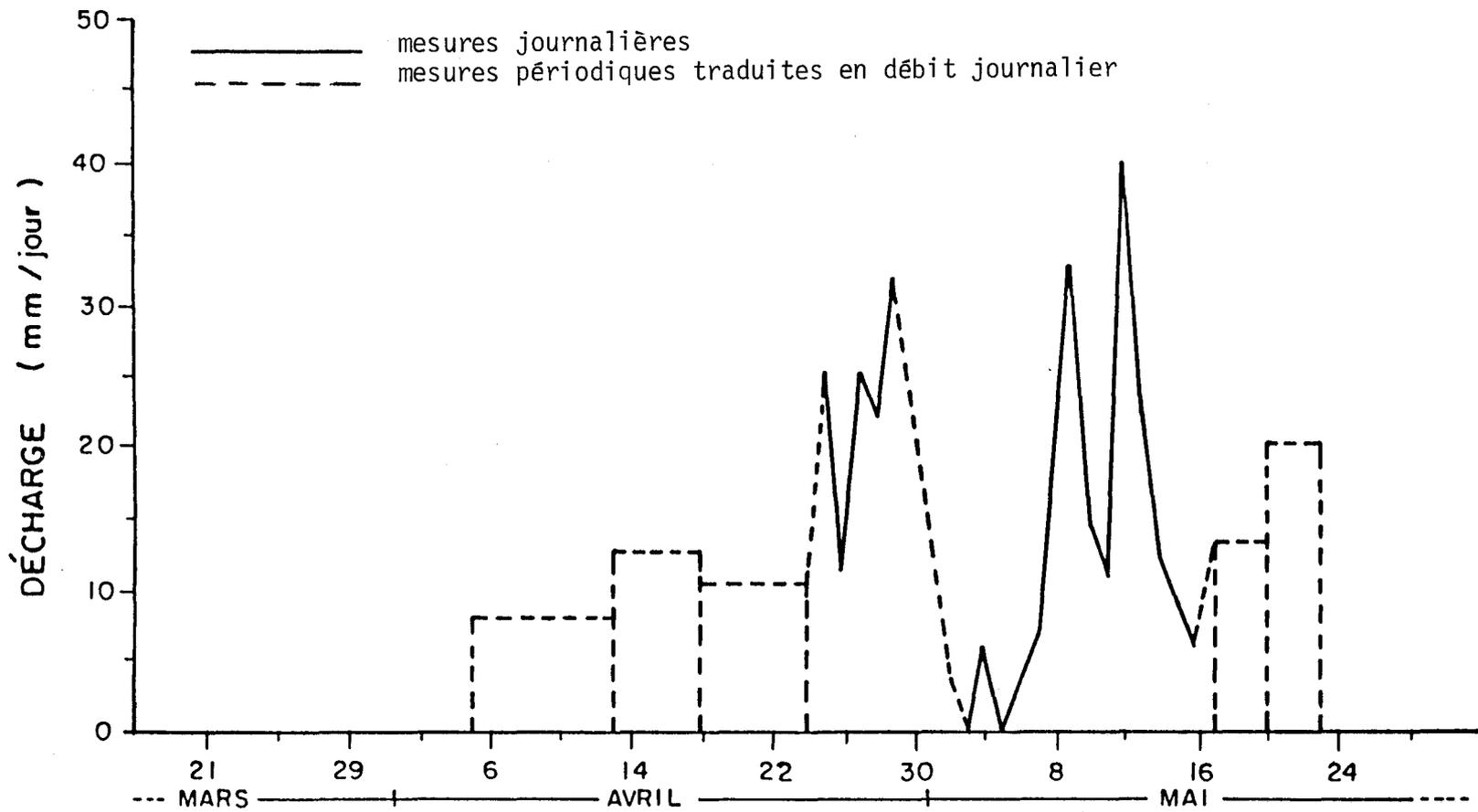


Figure 6 Evolution de la décharge du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

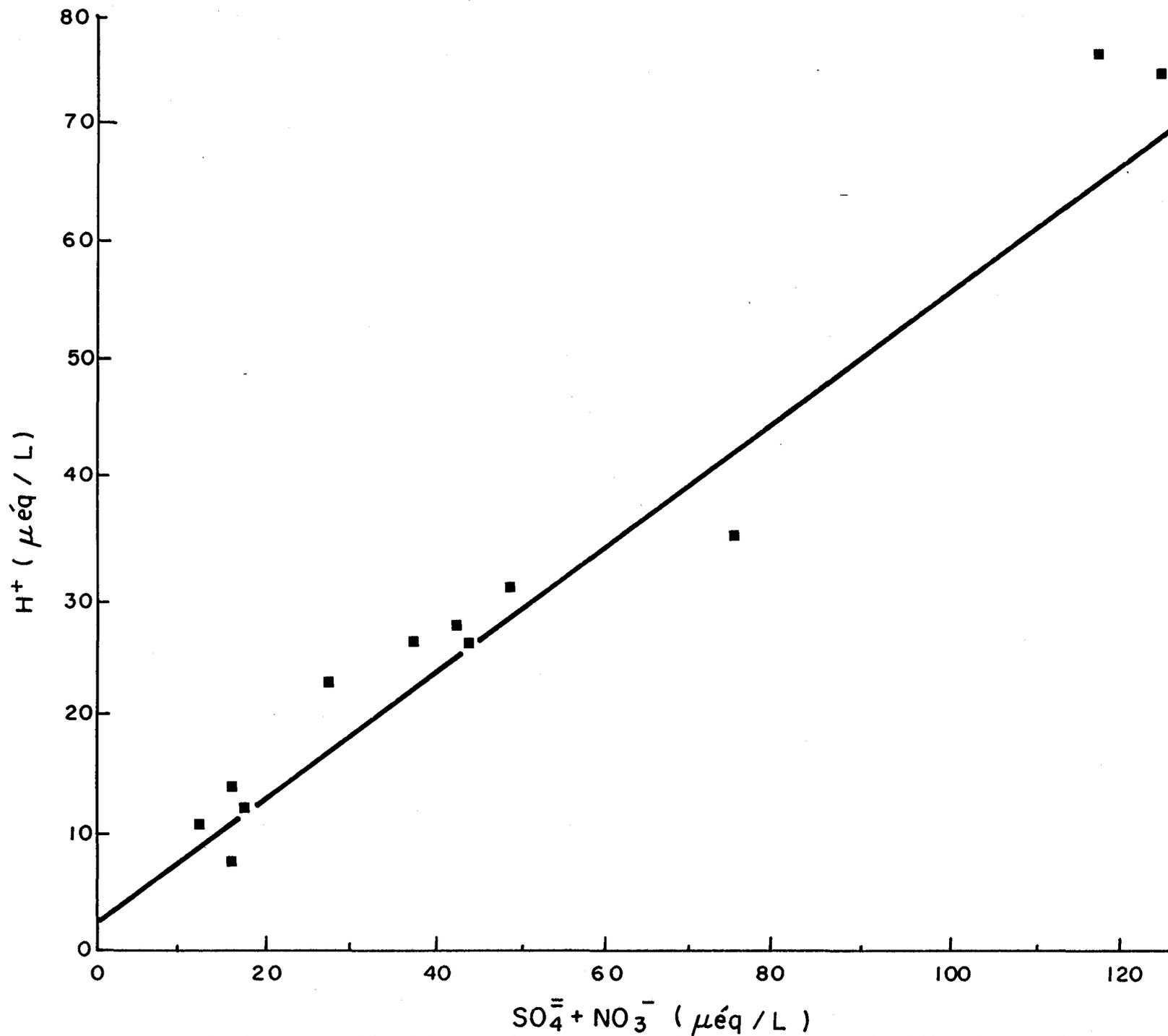


Figure 7 Relation entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte, dans les précipitations.

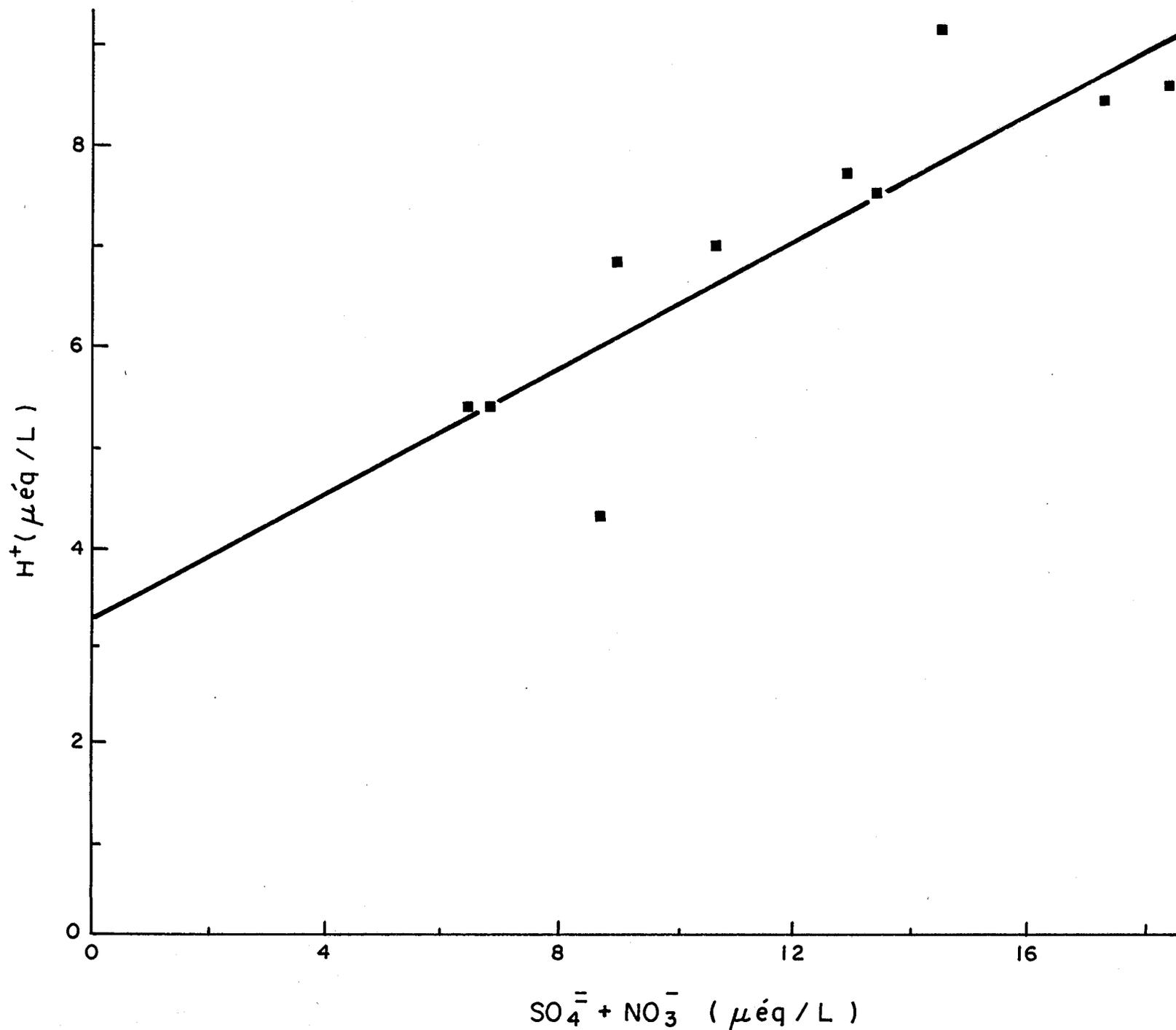


Figure 8 Relation entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte, dans la neige au sol.

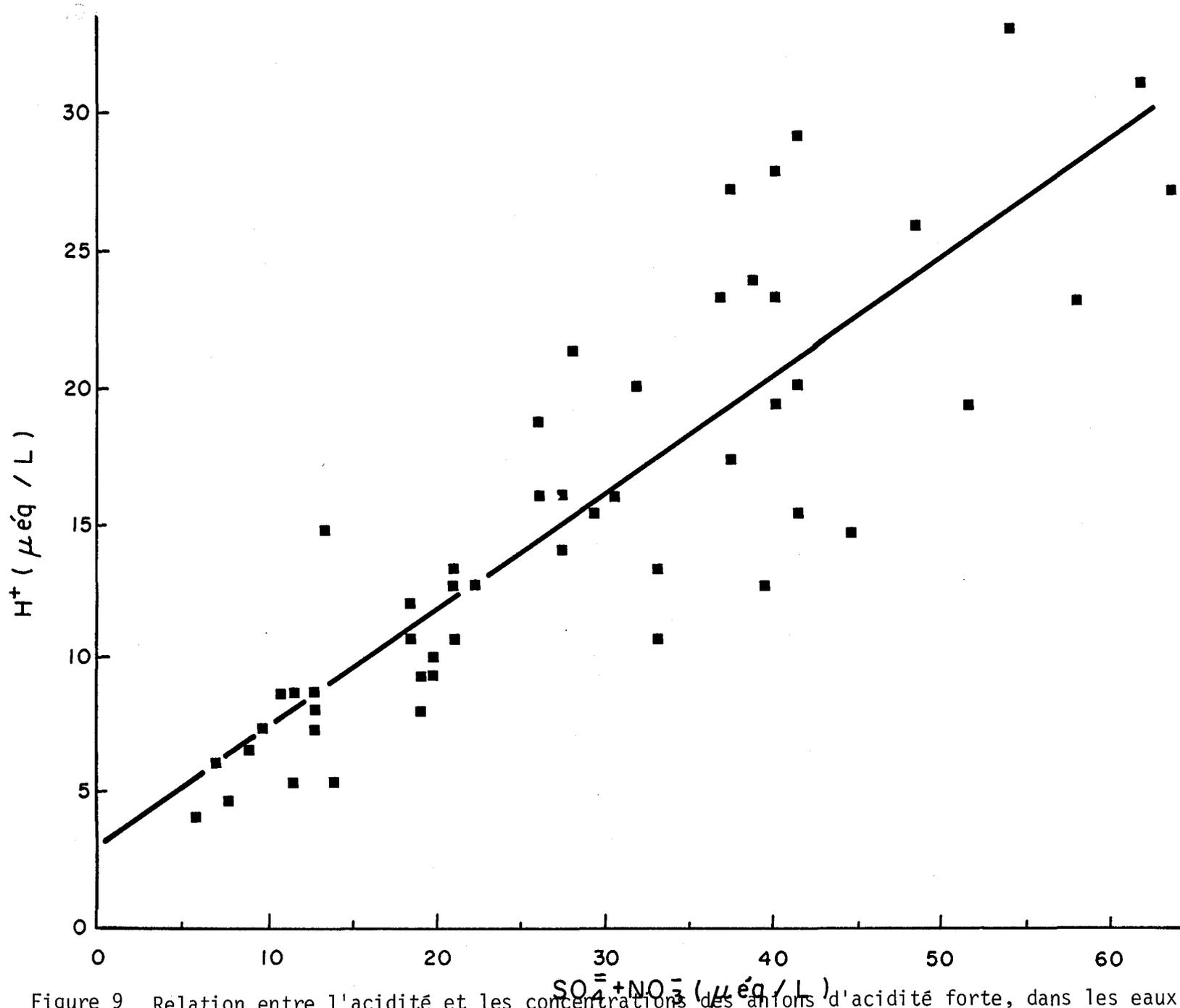


Figure 9 Relation entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte, dans les eaux de fonte.

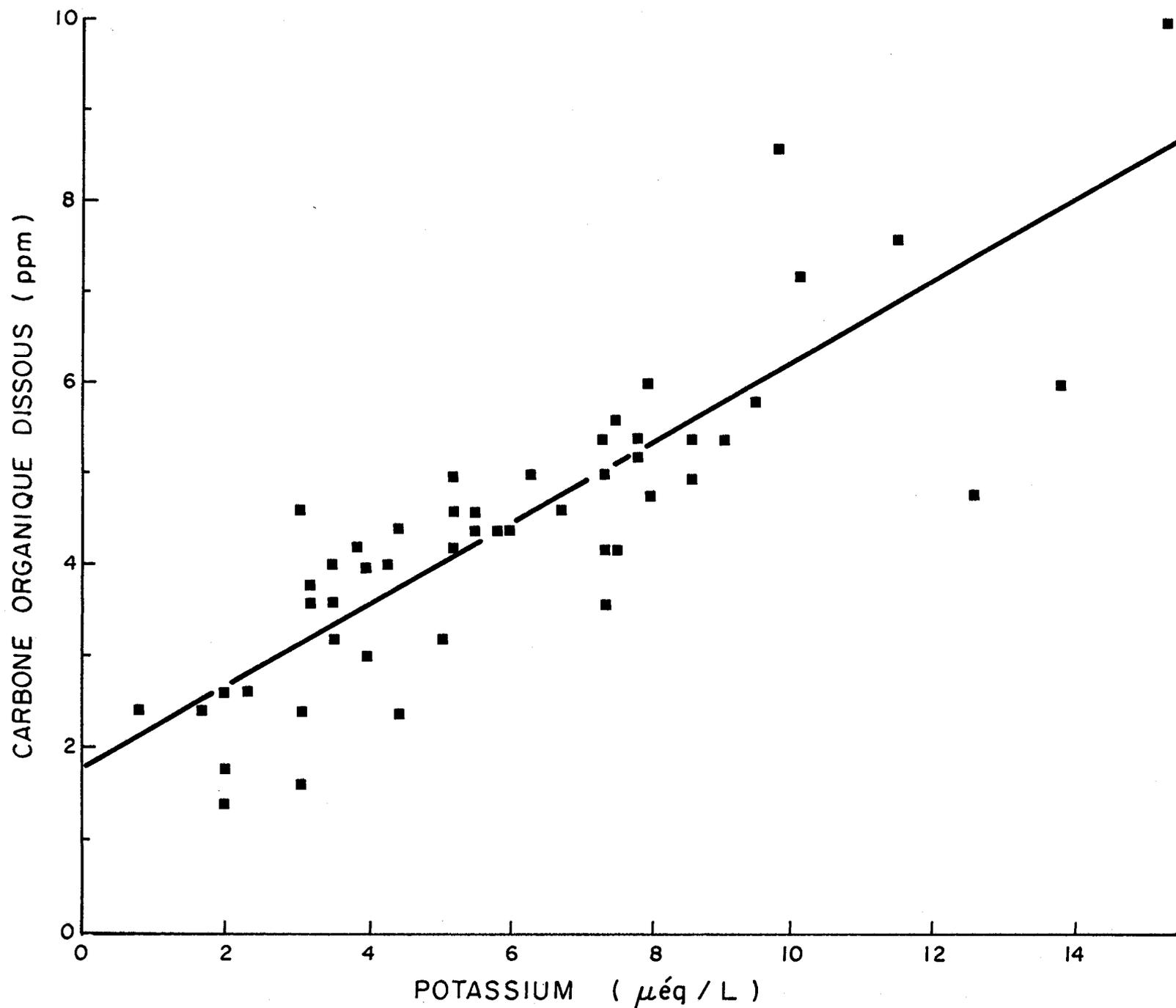


Figure 10

Relation entre les concentrations de la matière organique dissoute et le potassium, dans les eaux de fonte.

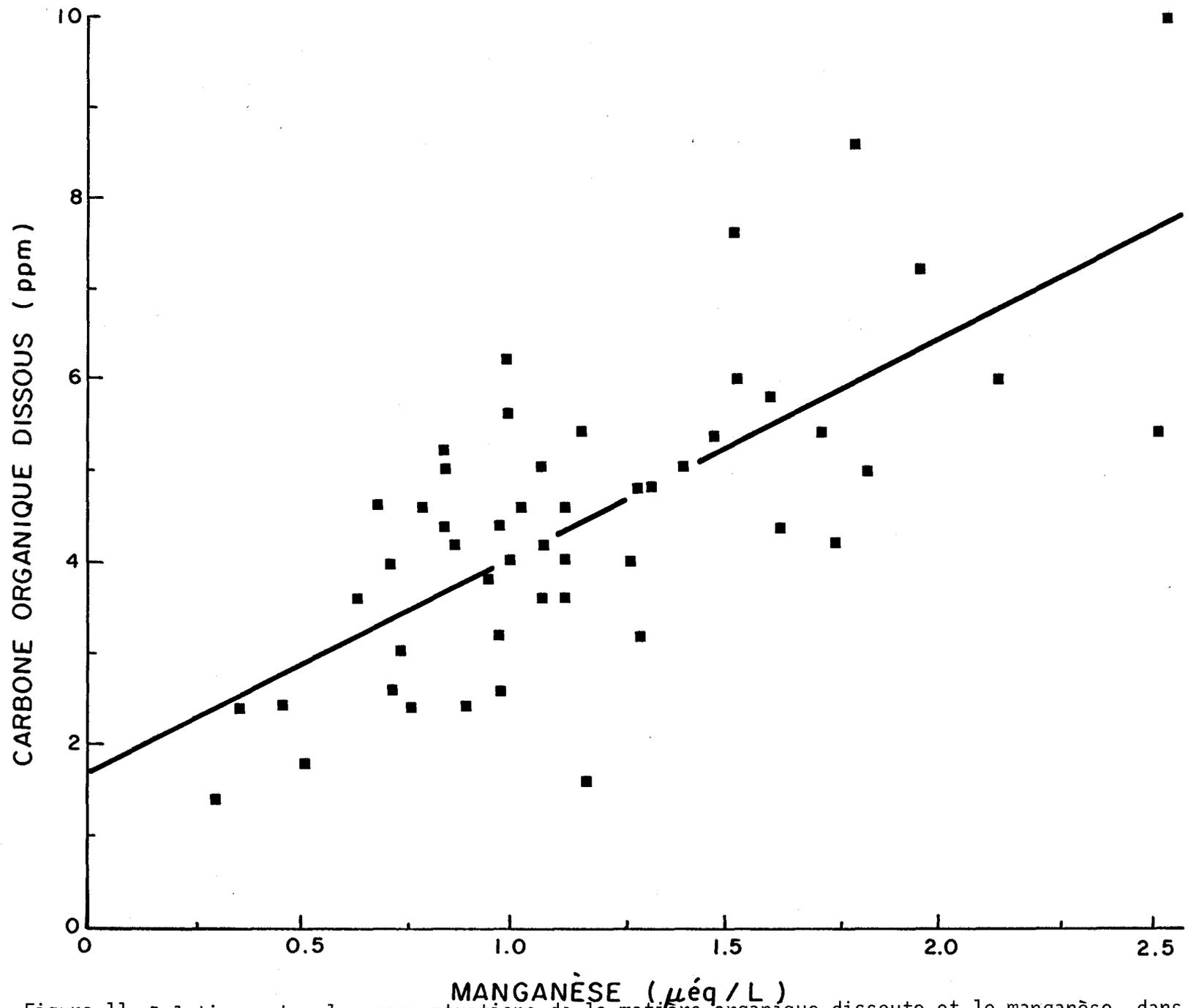


Figure 11 Relation entre les concentrations de la matière organique dissoute et le manganèse, dans les eaux de fonte.

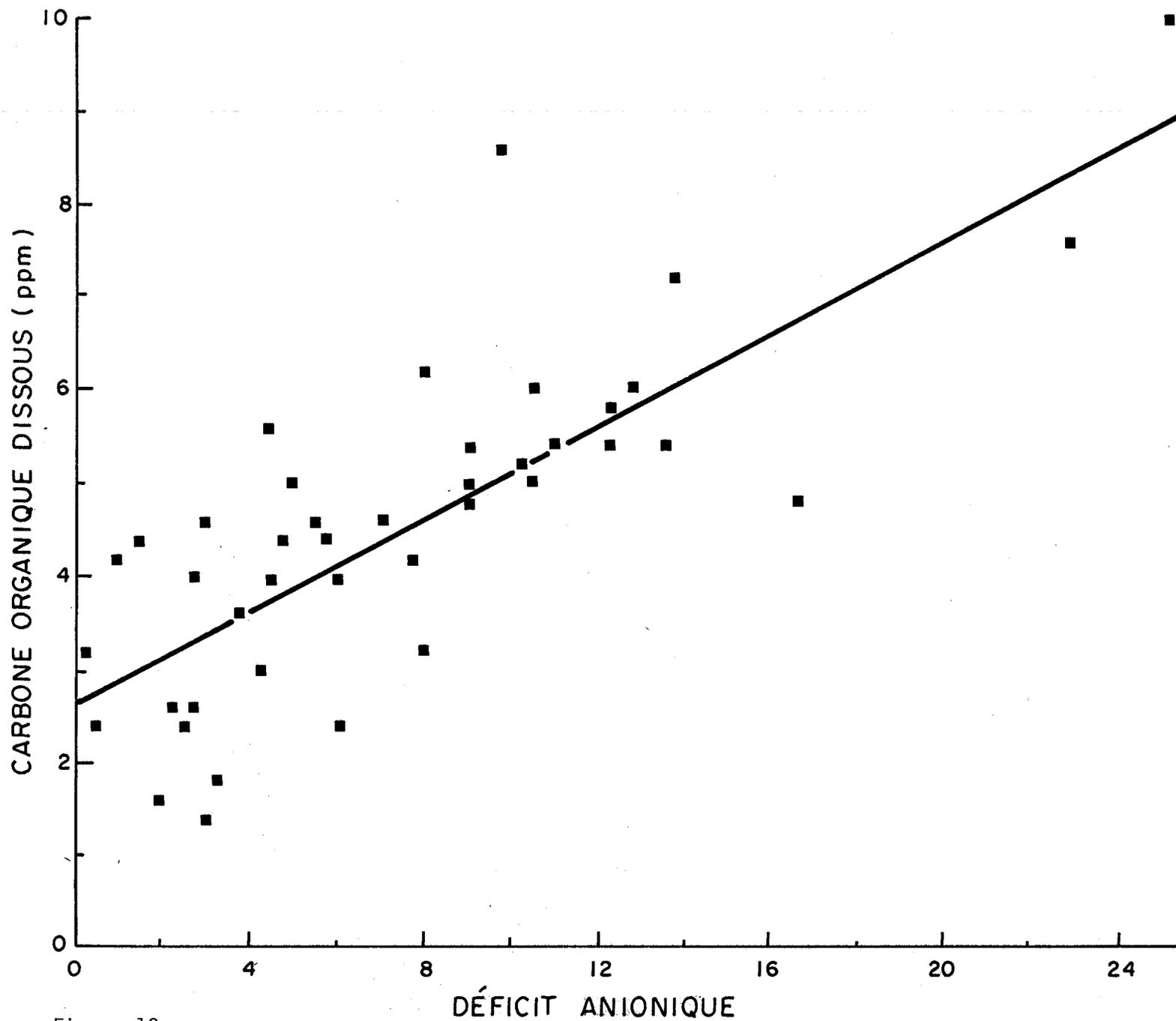


Figure 12 Relation entre la matière organique dissoute et le déficit anionique calculé, dans les eaux de fonte-

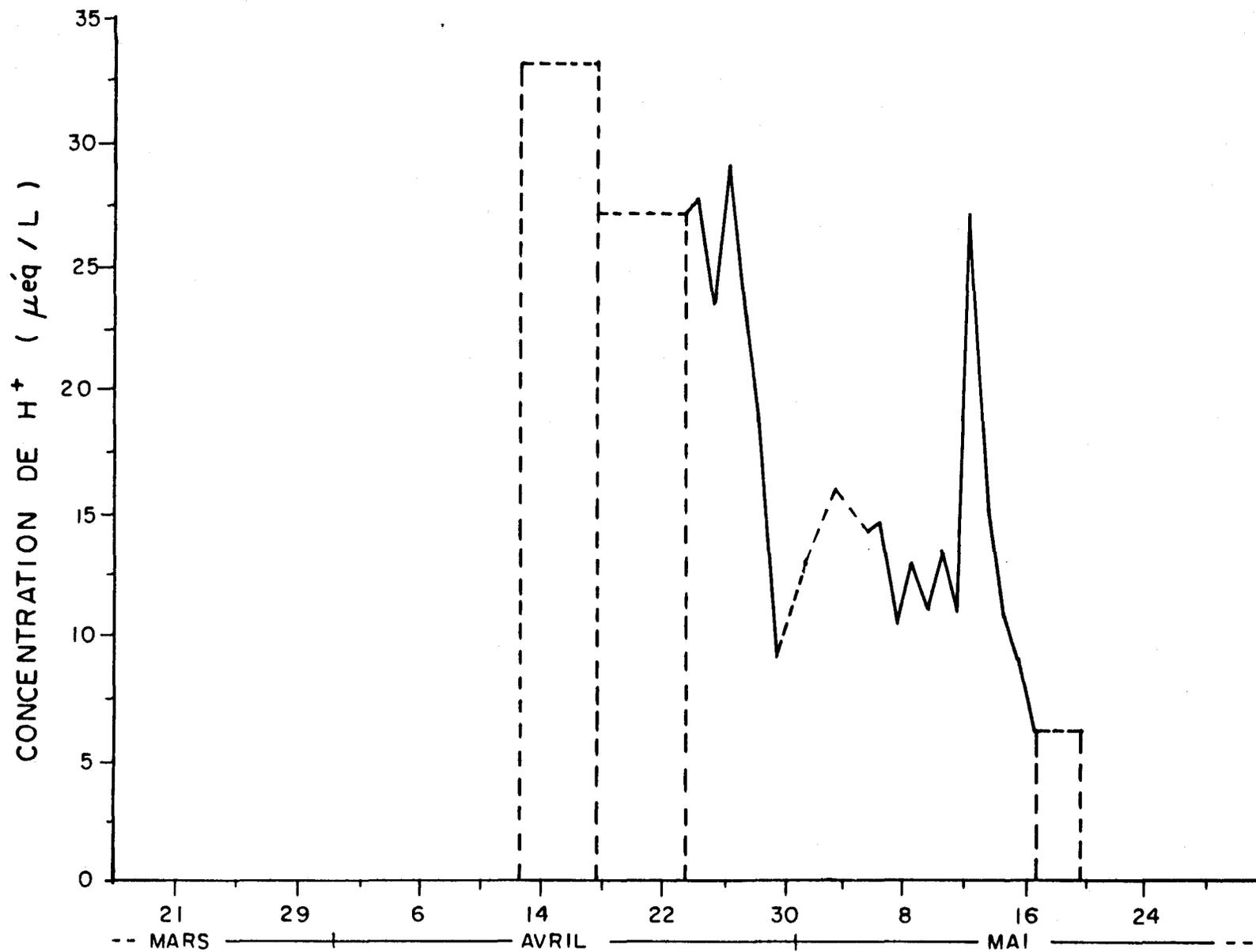


Figure 13 Evolution de la concentration de  $H^+$  des eaux de fonte du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

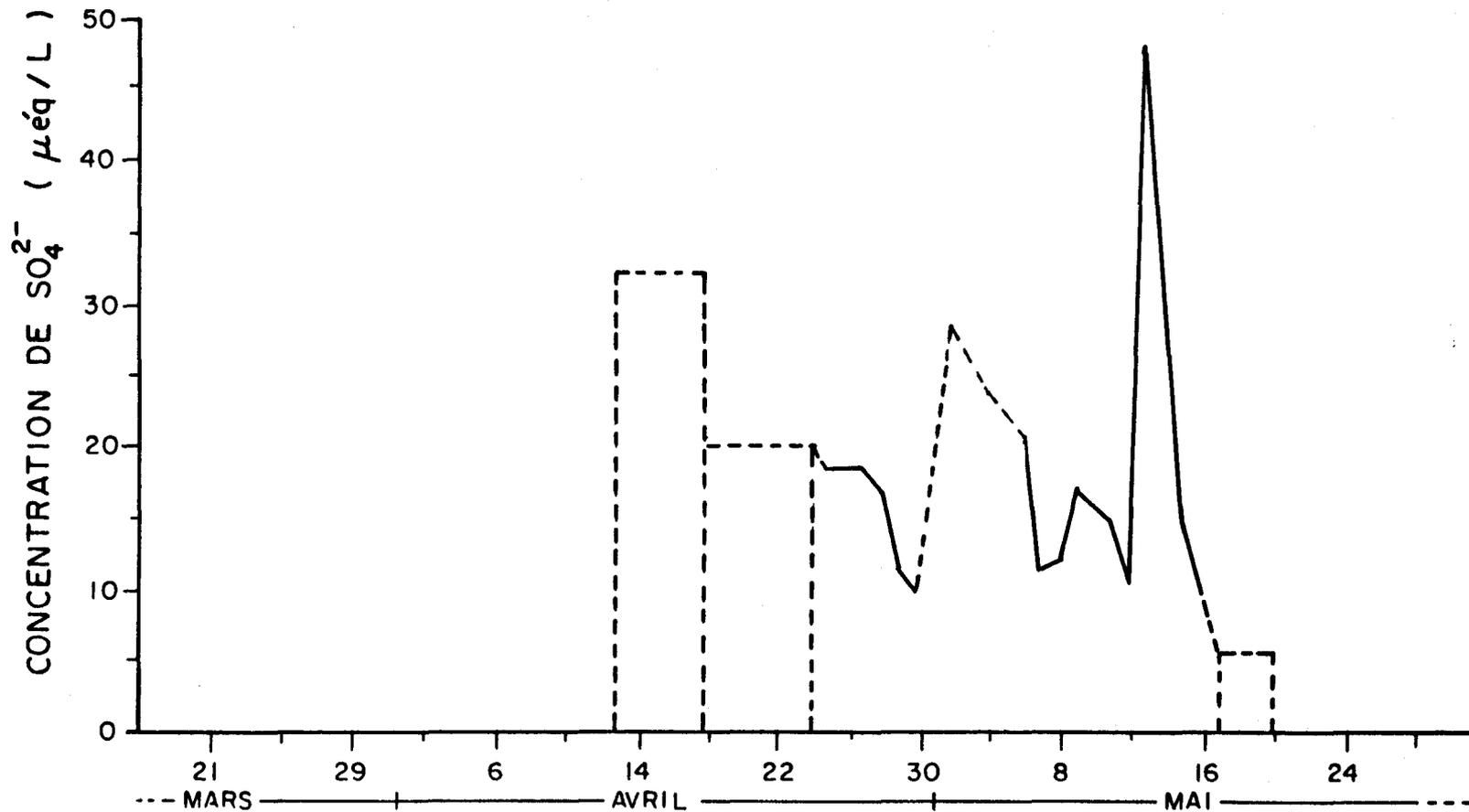


Figure 14 Evolution de la concentration de  $SO_4^{2-}$  des eaux de fonte du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

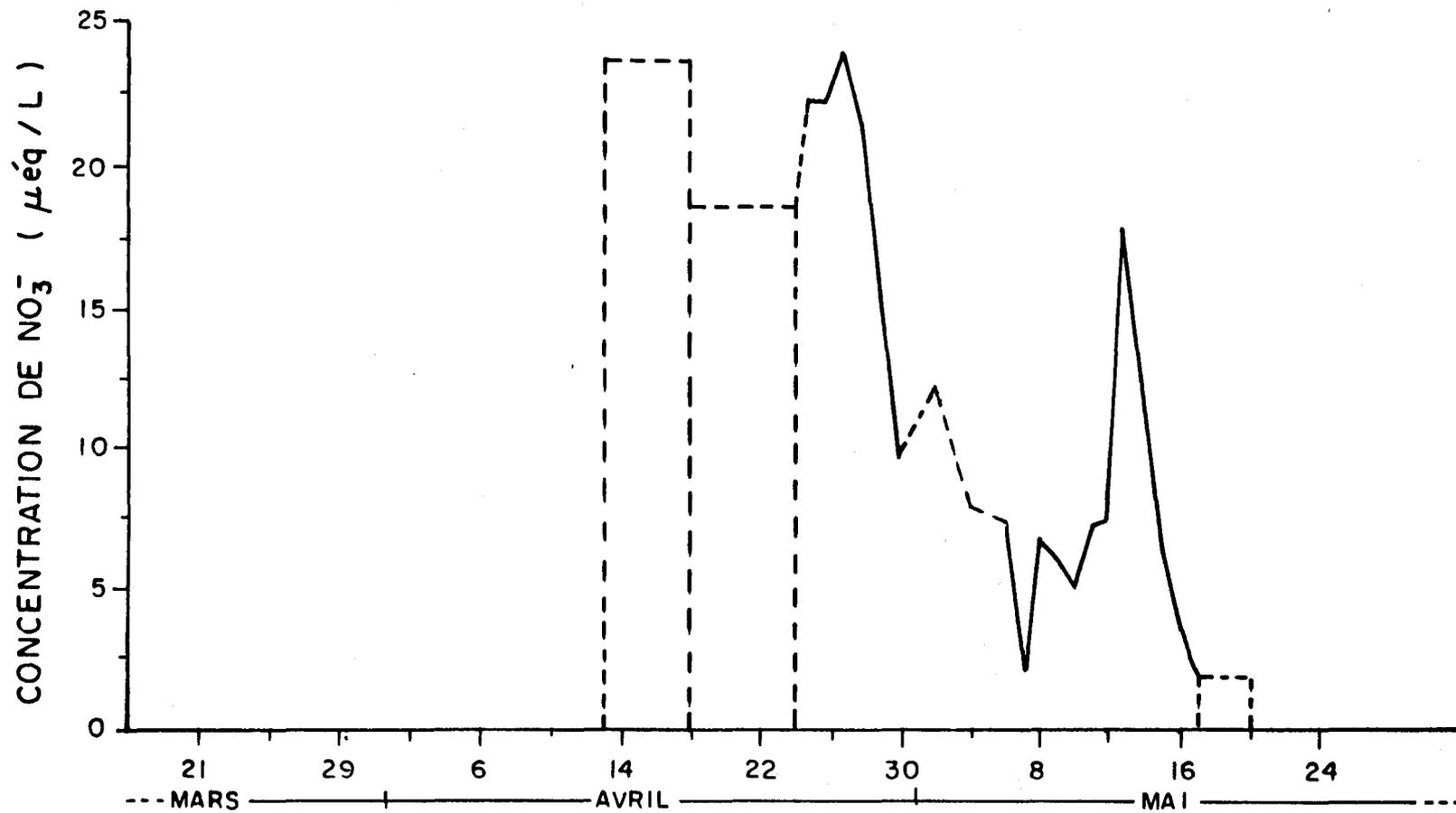


Figure 15 Evolution de la concentration de  $\text{NO}_3^-$  des eaux de fonte du lysimètre L2, bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

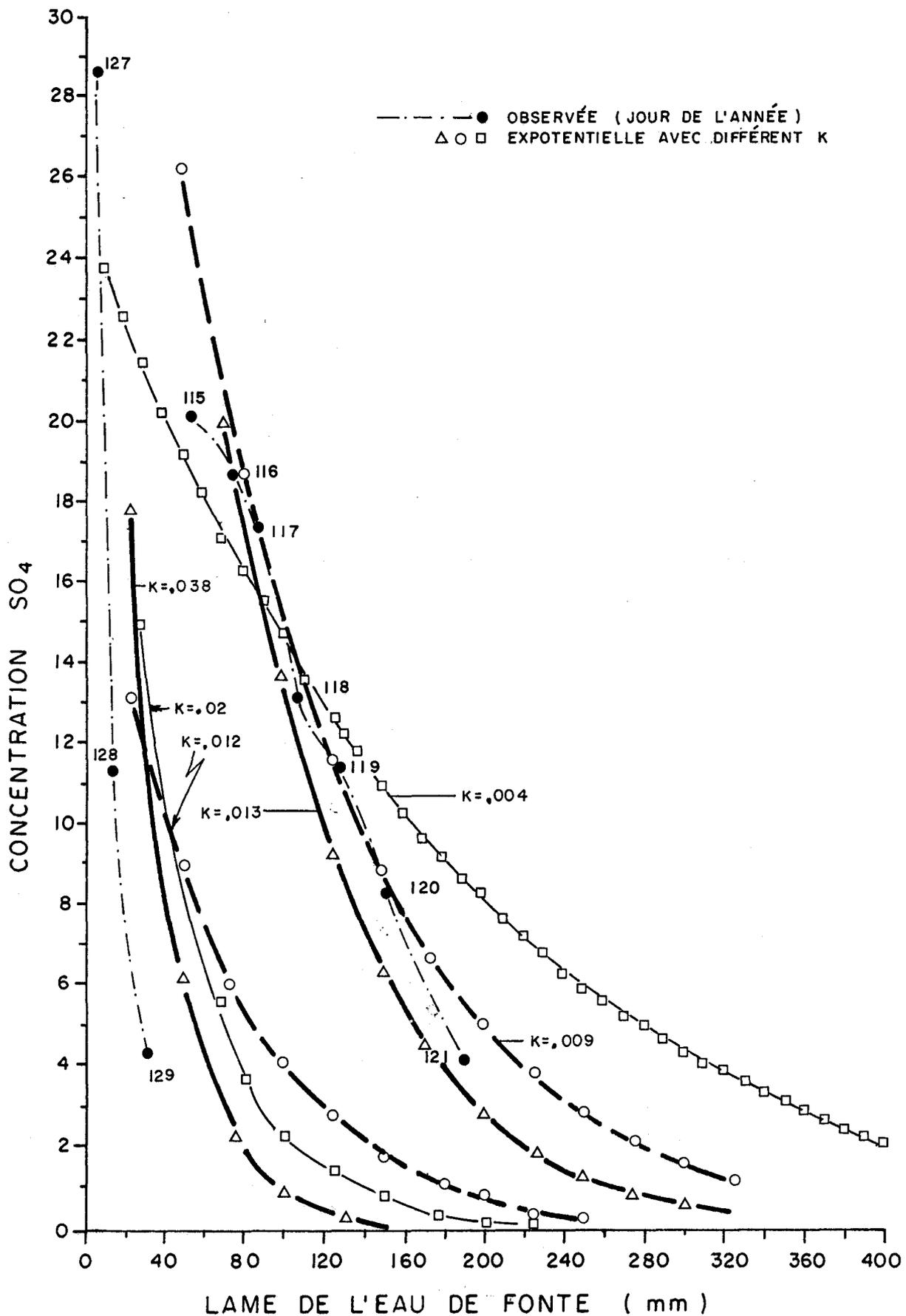


Figure 16 Influence de la valeur K sur les résultats de simulation des concentrations en  $SO_4$ , dans les eaux de fonte.







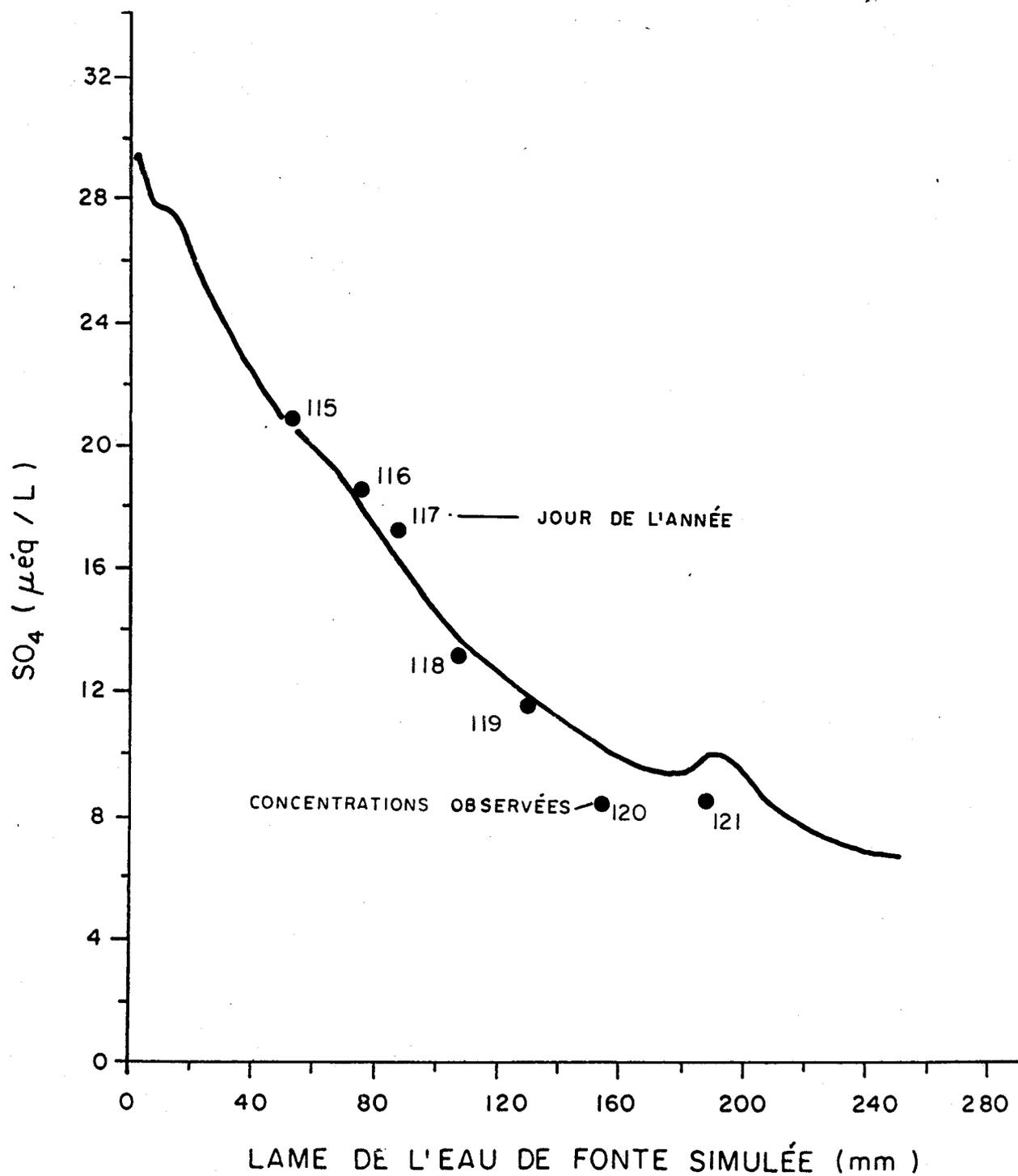


Figure 20. Simulation des concentrations de  $SO_4^{=}$  dans l'eau de fonte calculée à l'aide du modèle SNOW-17 (Anderson 1973).

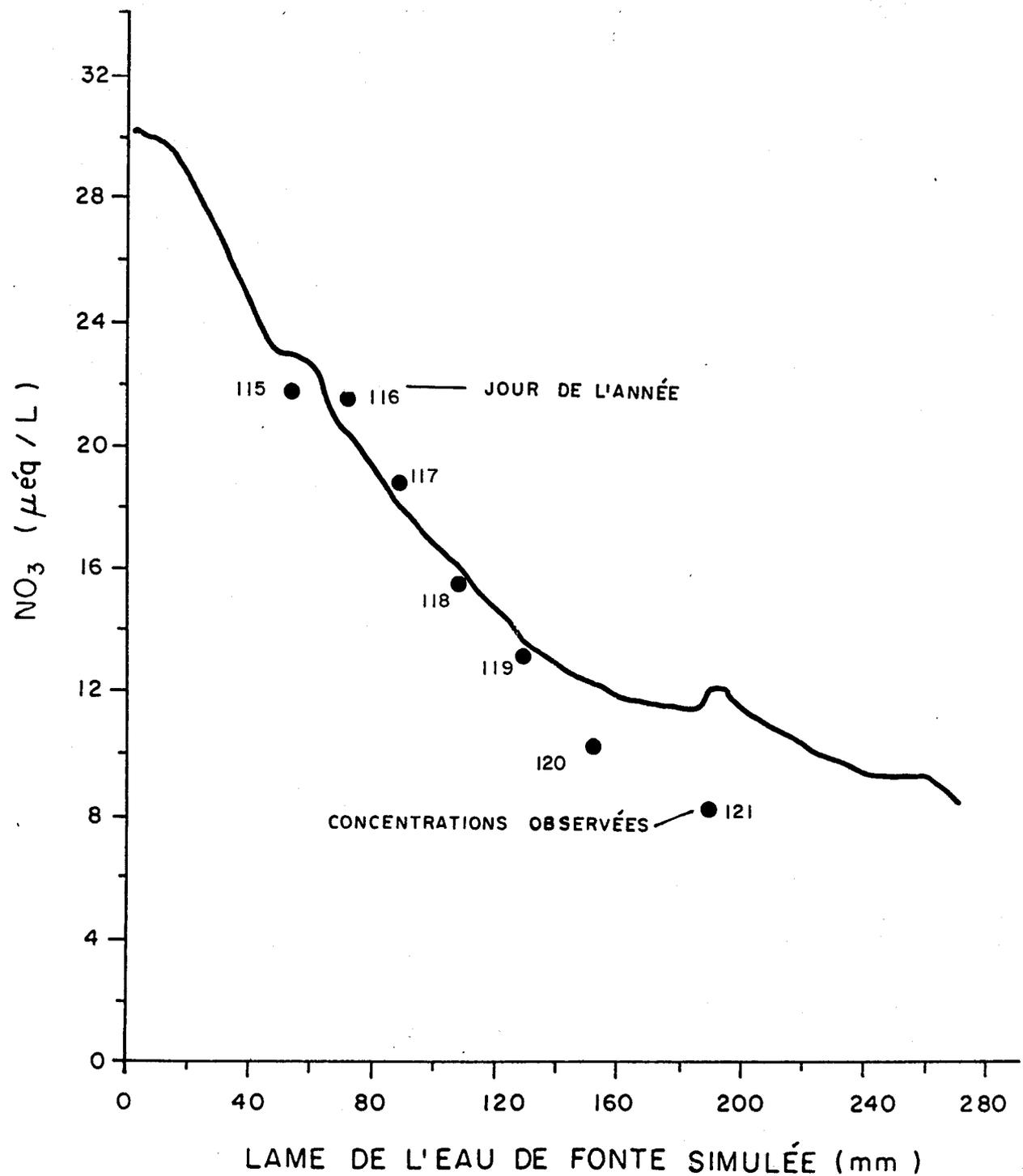


Figure 21. Simulation des concentrations de  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau de fonte calculée à l'aide du modèle SNOW-17 (Anderson 1973).

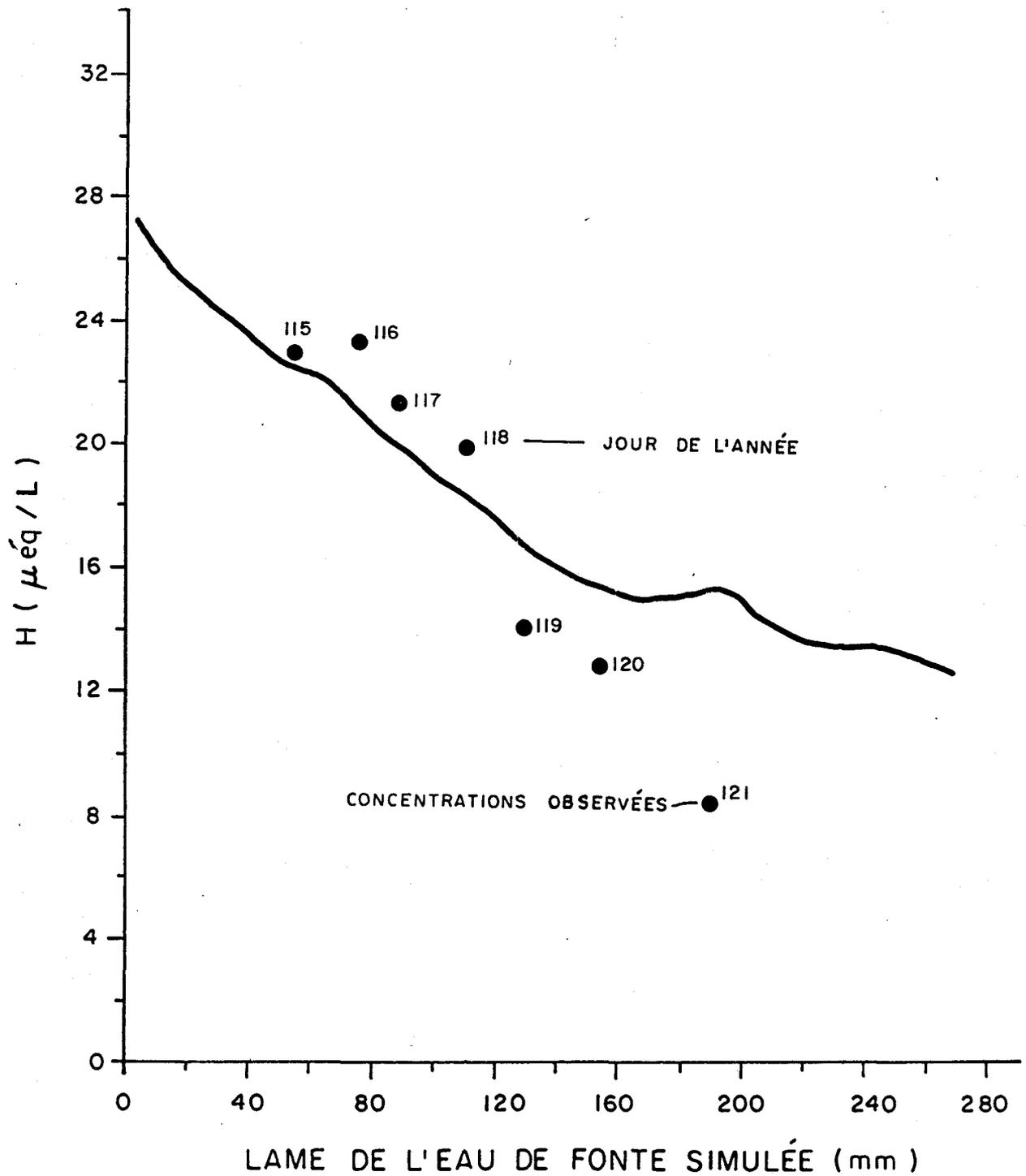


Figure 22. Simulation des concentrations de  $H^+$  dans l'eau de fonte calculée à l'aide du modèle SNOW-17 (Anderson 1973)

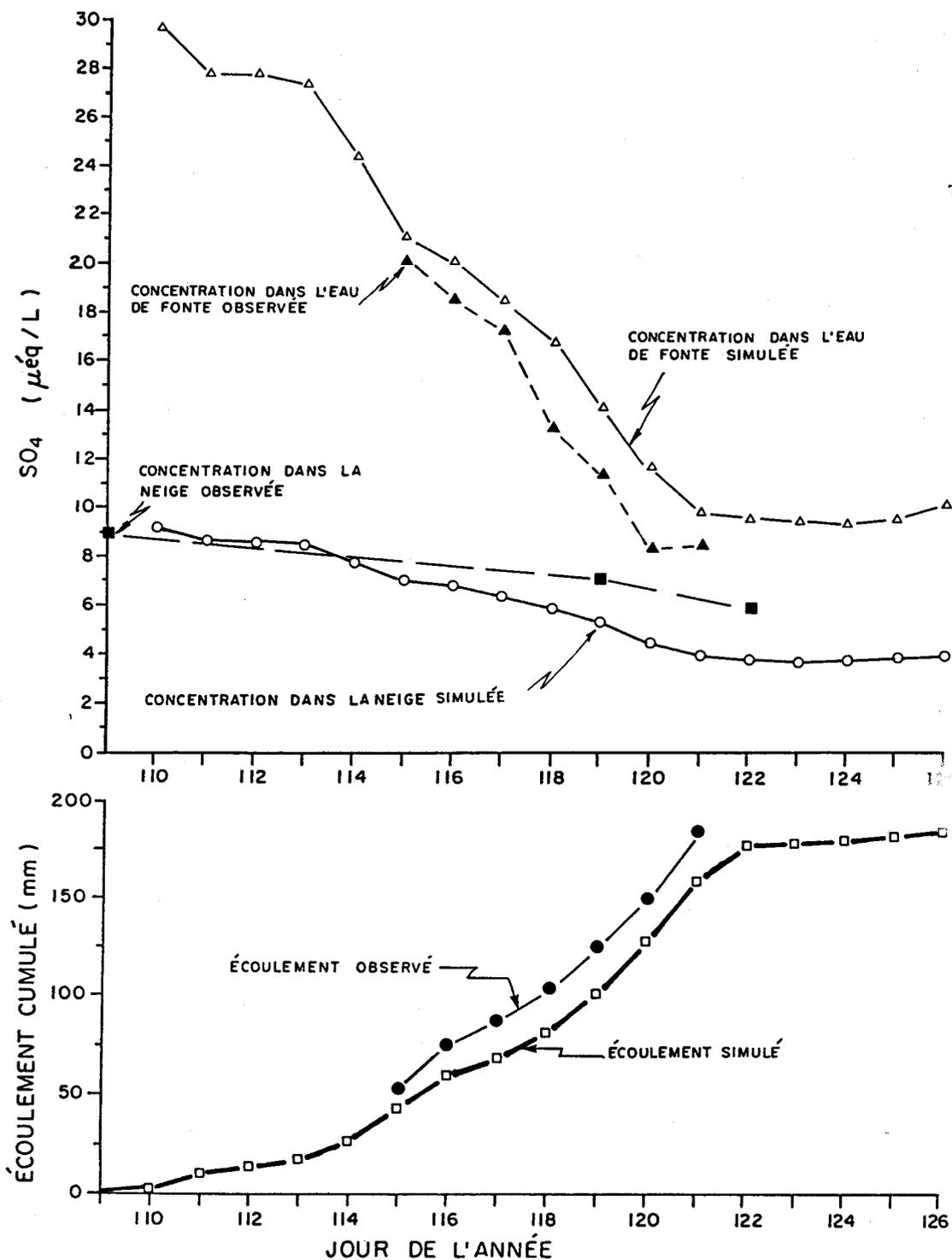


Figure 23. Valeurs observées et simulées de l'écoulement cumulé, concentrations de  $\text{SO}_4$  dans la neige et dans l'écoulement pendant la période de fonte 1984.

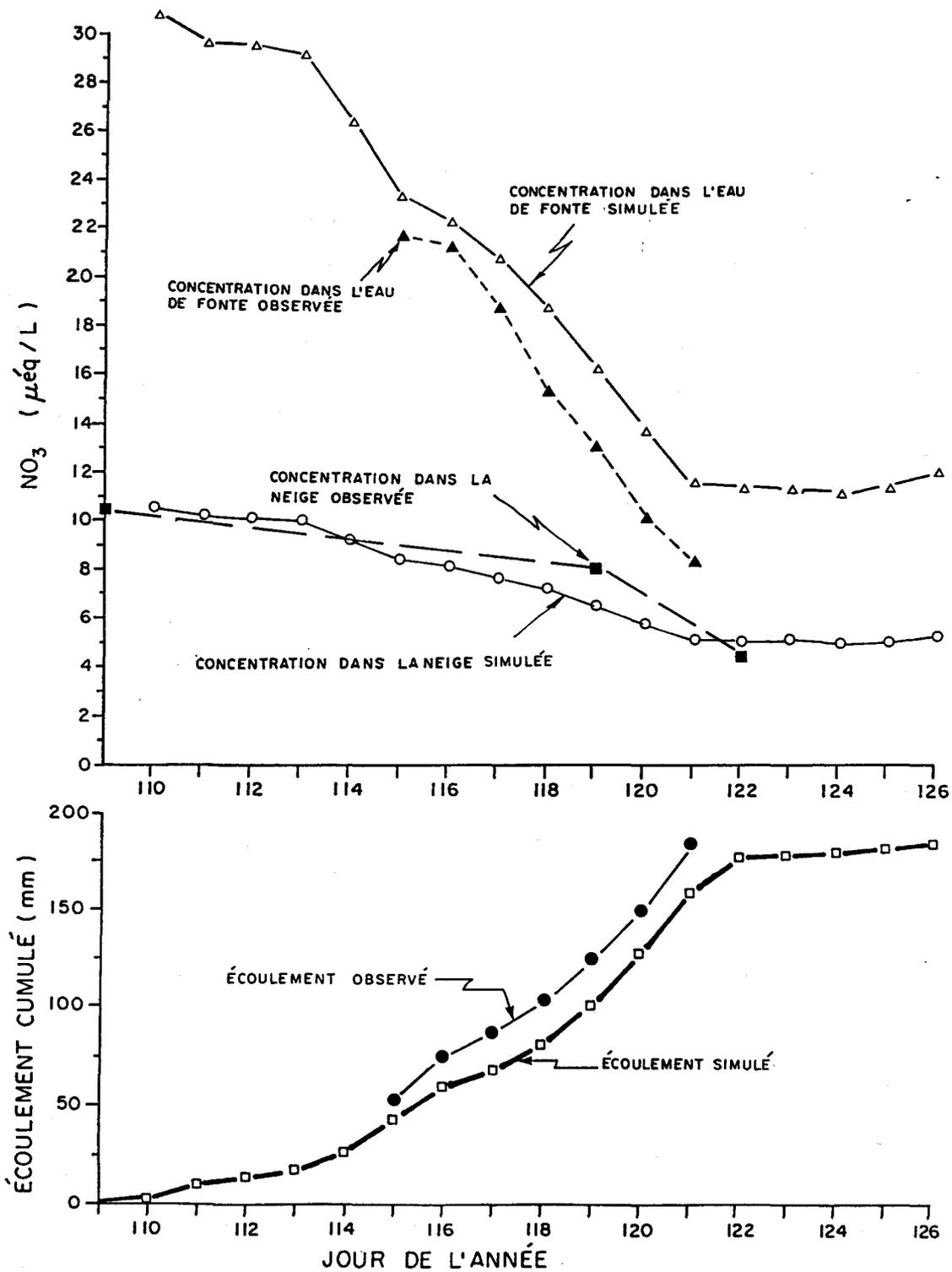


Figure 24. Valeurs observées et simulées de l'écoulement cumulé, concentrations de NO<sub>3</sub> dans la neige et dans l'écoulement pendant la période de fonte 1984.

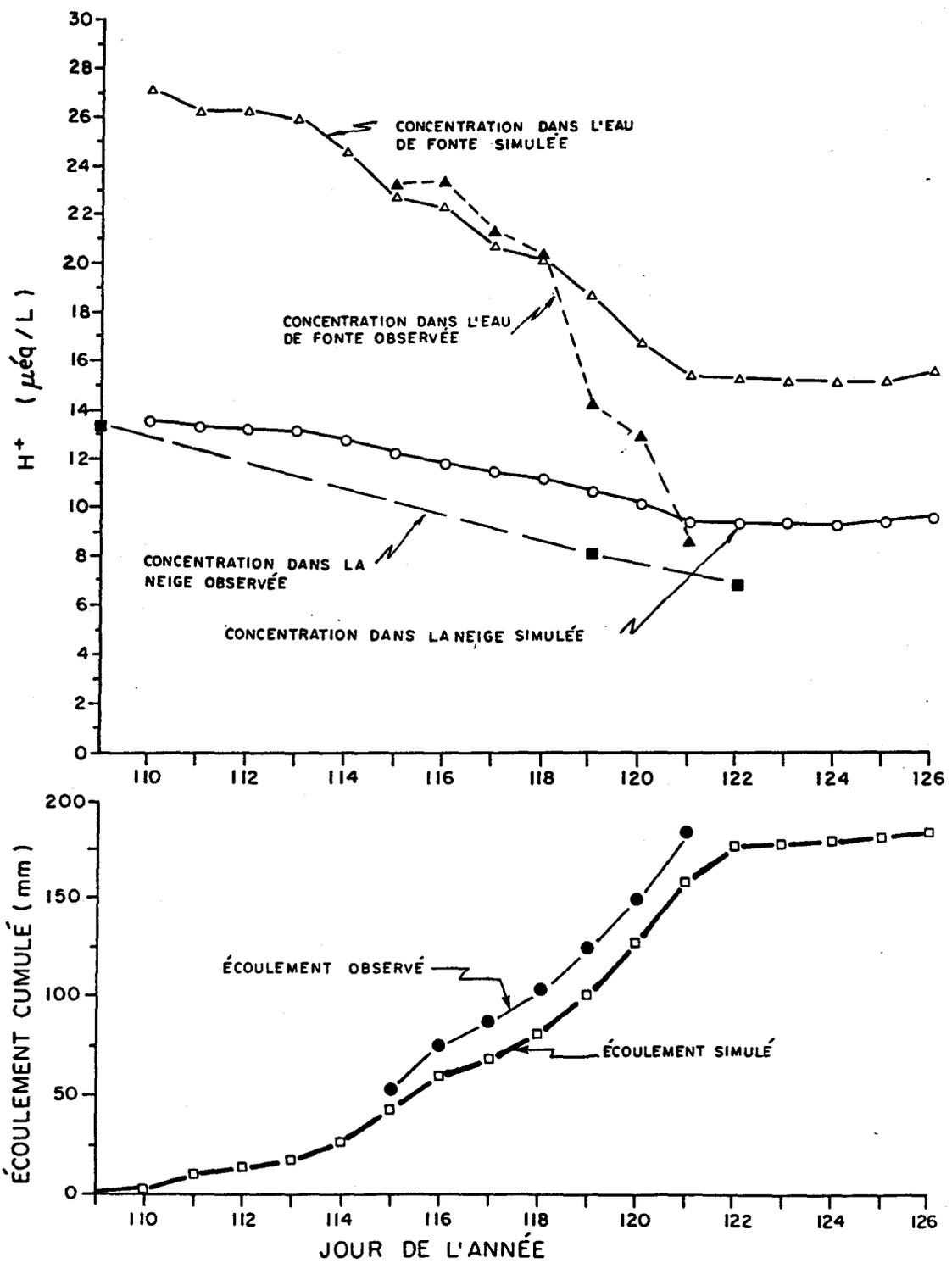


Figure 25. Valeurs observées et simulées de l'écoulement cumulé, concentrations de H<sup>+</sup> dans la neige et dans l'écoulement pendant la période de fonte 1984.

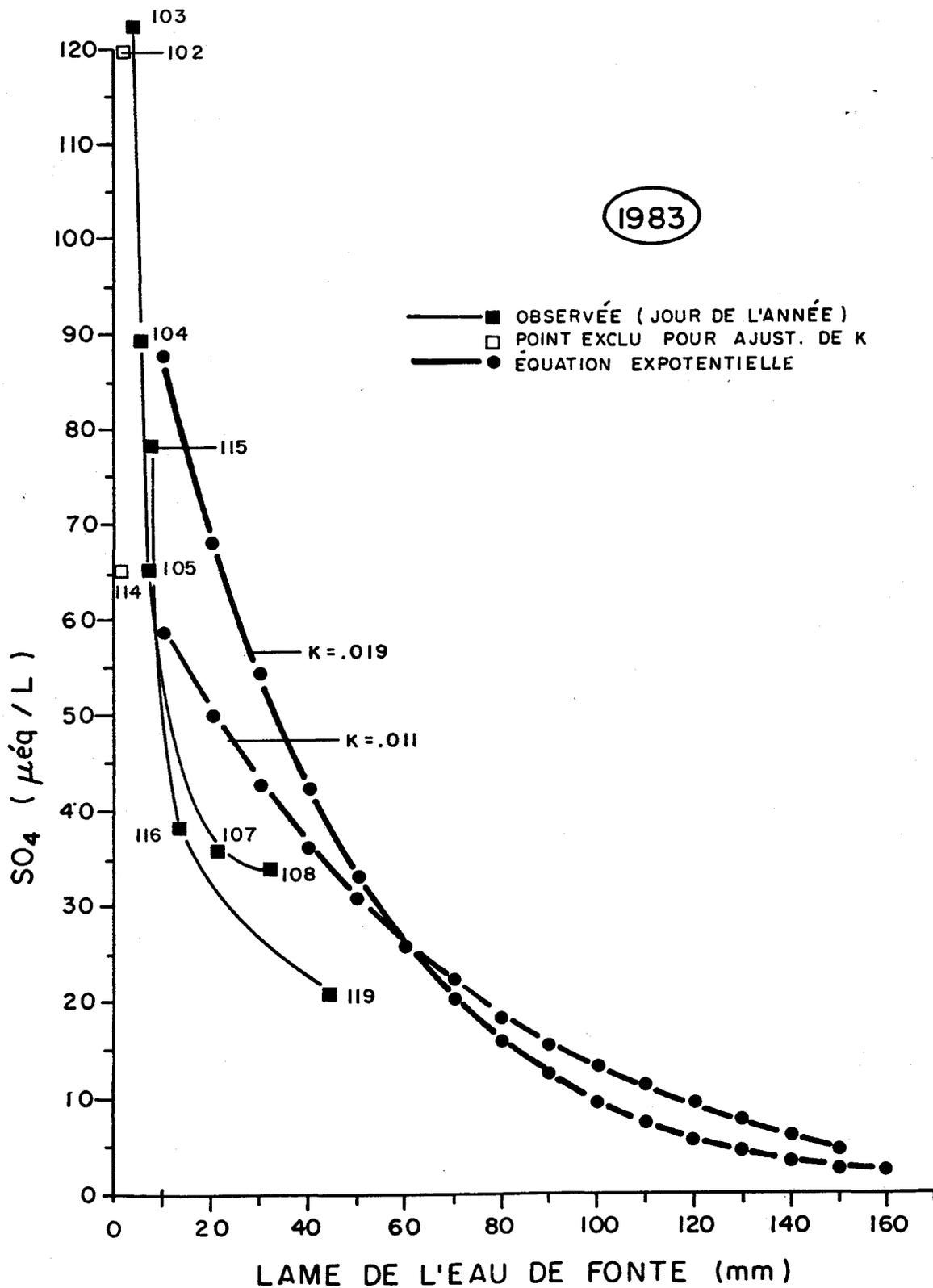


Figure 26 Simulation du SO<sub>4</sub> dans l'eau de fonte en 1983.





# Lysimetre-Hypodermique-Souterraine

LAC LAFLAMME (18 avr-20 mai)

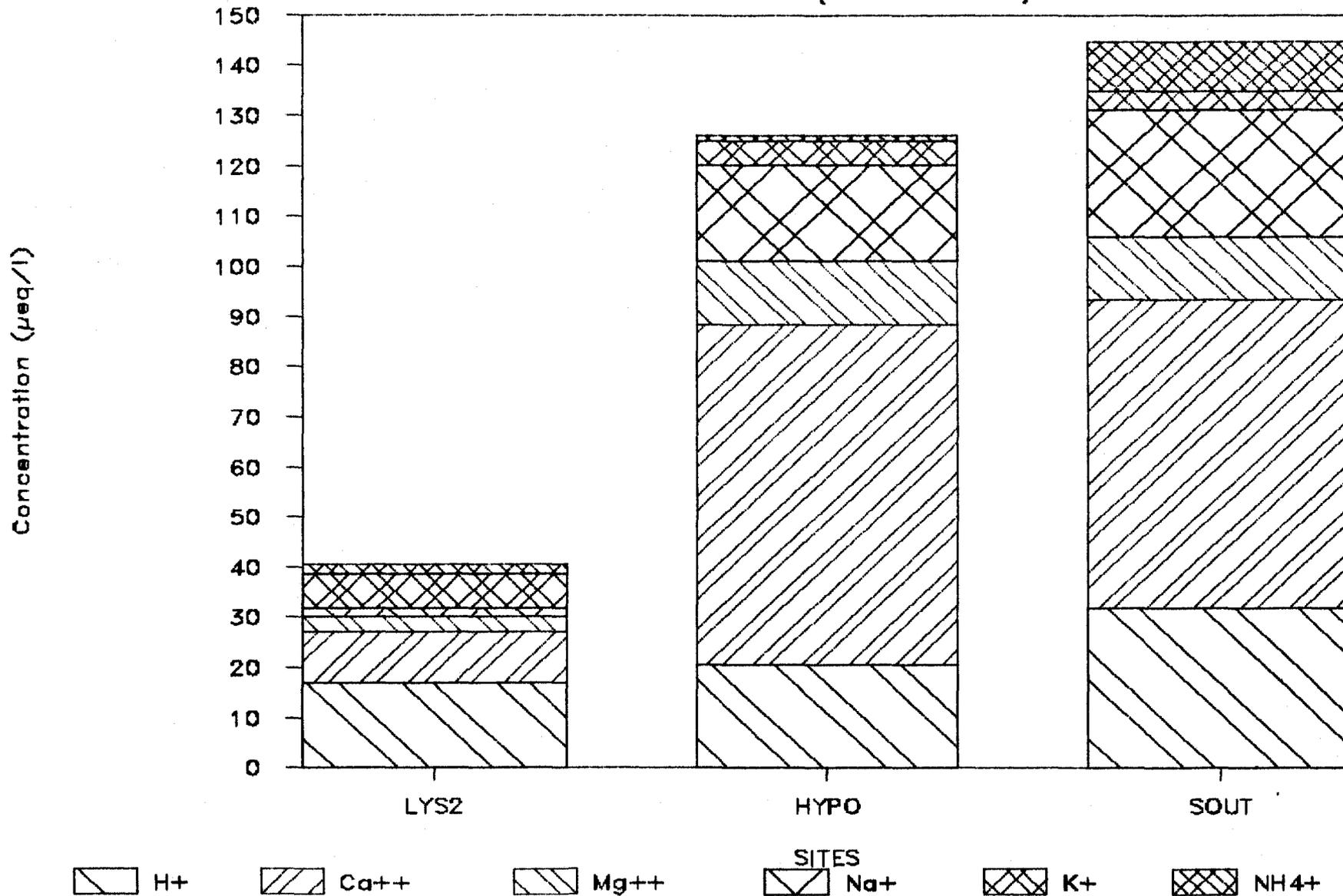


Figure 29 Concentration moyenne des cations dans l'eau de fonte (lys 2), dans l'eau de ruissellement (hypo) et dans l'eau souterraine (sout) au cours de la fonte de 1984.

# Lysimetre-Hypodermique-Souterraine

LAC LAFLAMME (18 avr-20 mai)

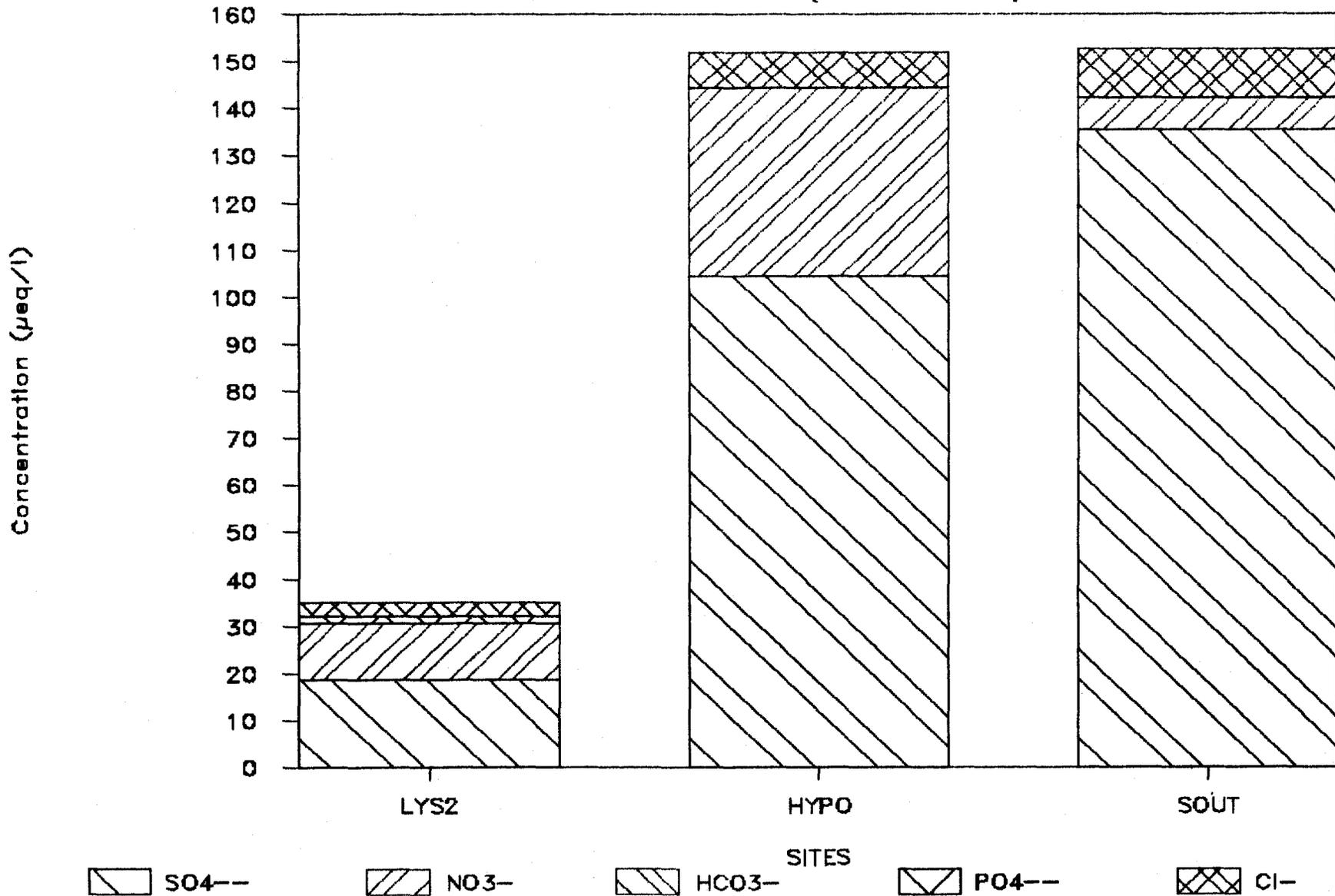


Figure 30 Moyenne des concentrations des anions majeurs dans l'eau de fonte (lys2), dans l'eau de ruissellement (hypo) et dans l'eau souterraine (sout).

# ACIDITE(lysim.-hypoderm.-souter.)

LAC LAFLAMME (avril-mai 1984)

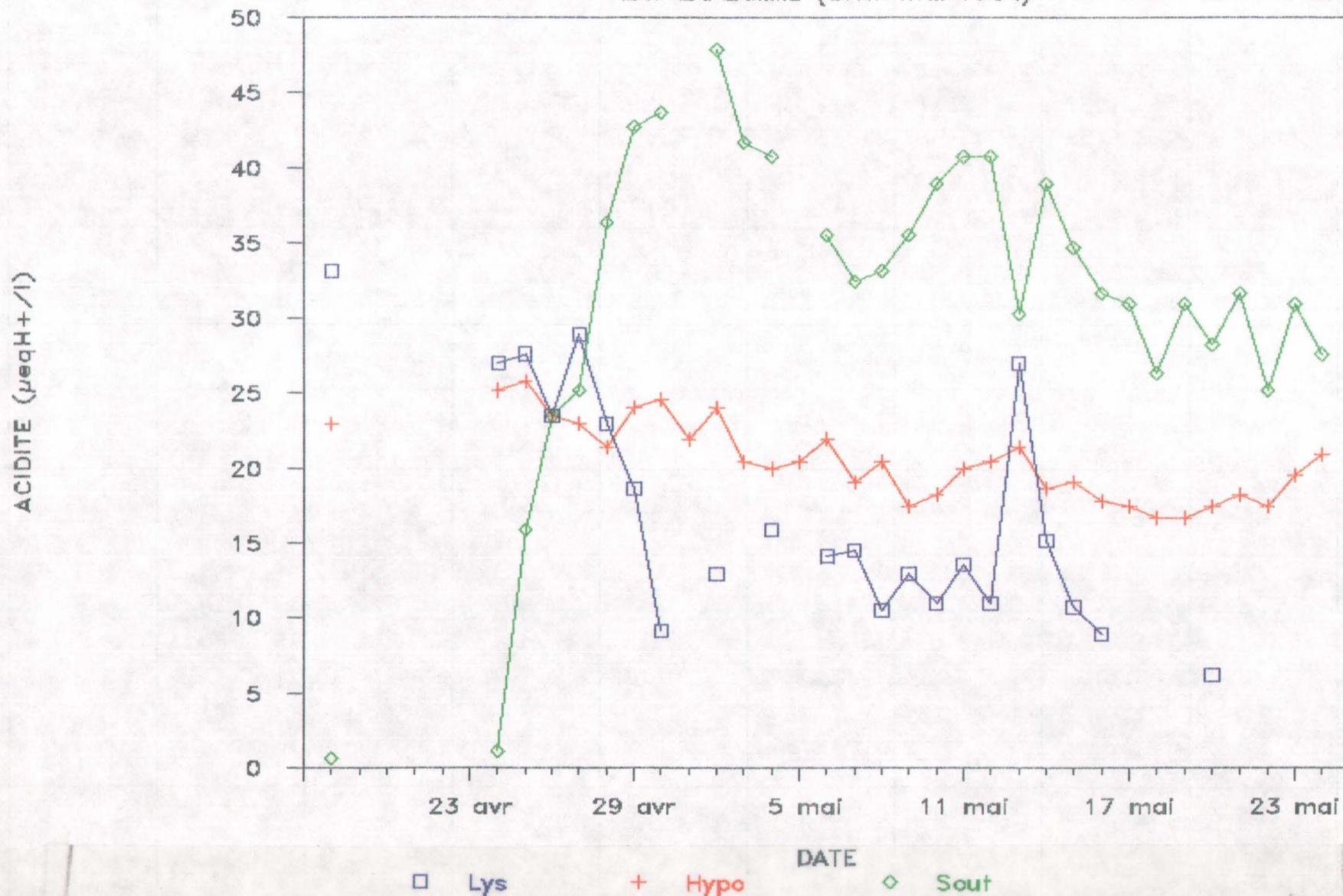


Figure 31. Taux d'acidité dans l'eau de fonte (lys), dans l'eau de ruissellement (hypo) et dans l'eau souterraine (sout).

# DEBIT(exutoire)-PREC.(Forest Montm.)

LAC LAFLAMME [janv--juin 84

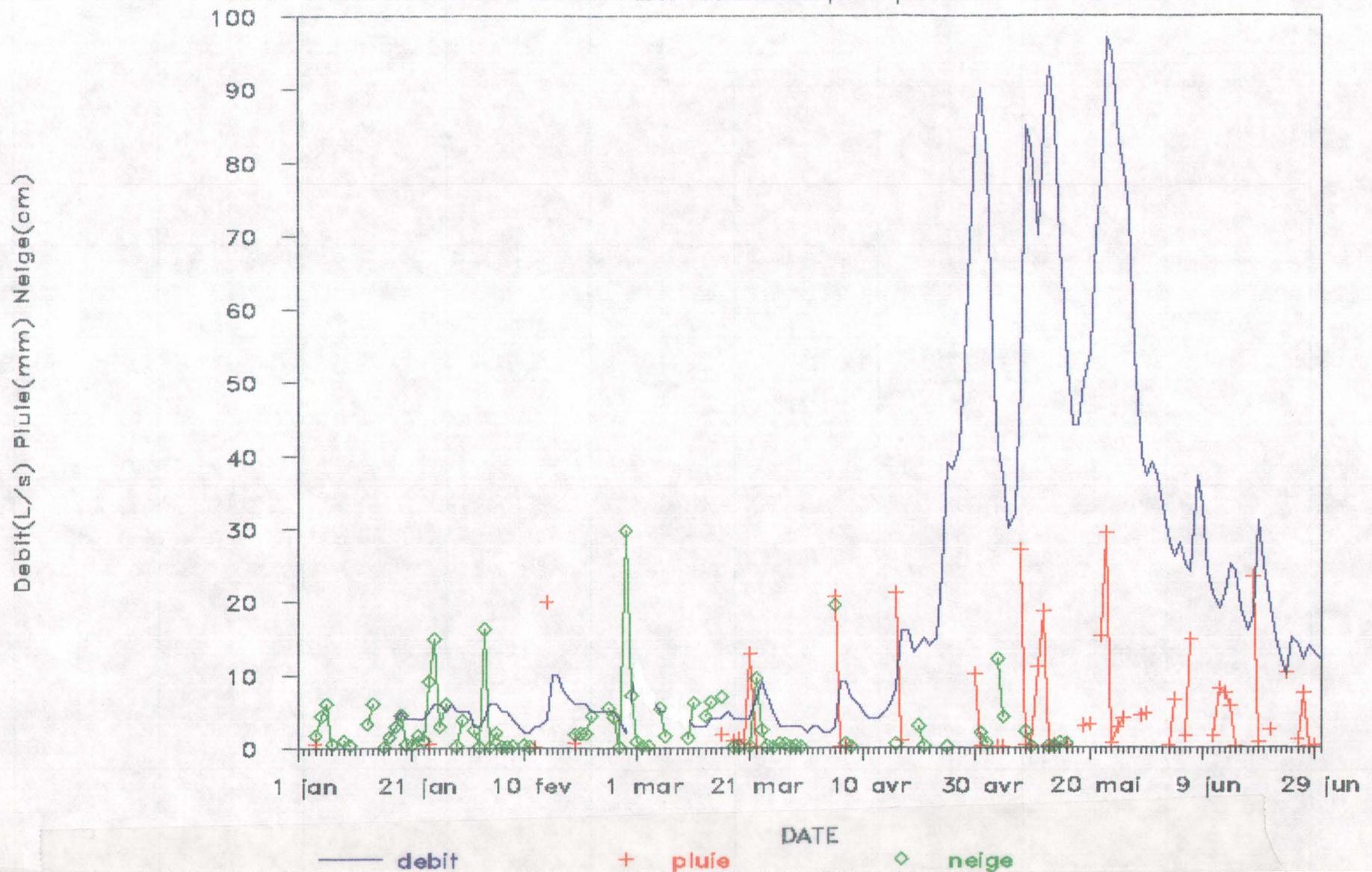


Figure 32 Débit, précipitation liquide et précipitation solide pendant la période de fonte de 1984.

Puits (A), B, C

NIVEAUX DE L'EAU DANS LES PUITS SOUTERRAINS (m)  
(AC & B L'ANNÉE 1984)

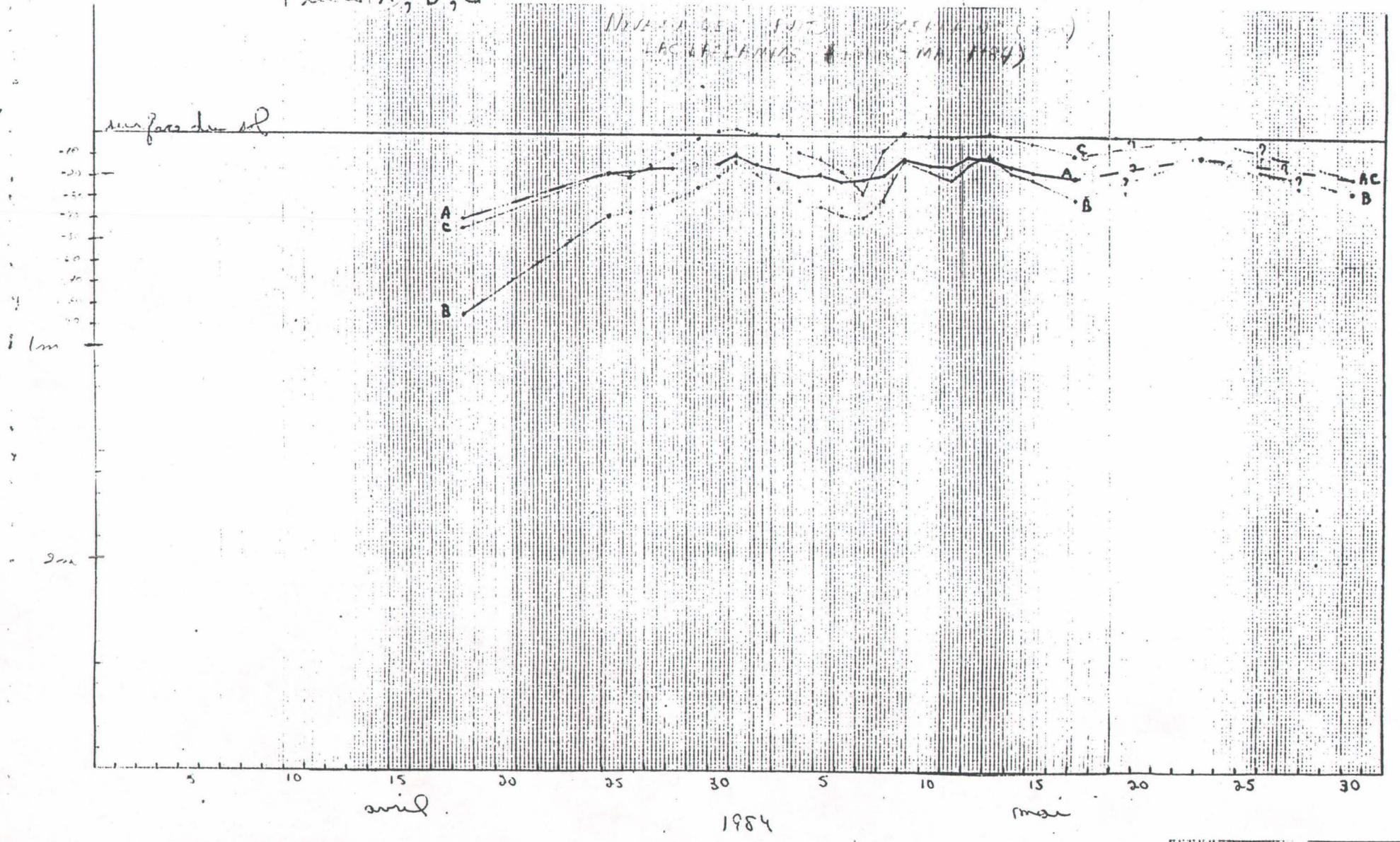


Figure 33 Niveaux de l'eau dans les puits souterrains A, B et C pendant la période de fonte de 1984.



# NITRATES(lysim.-hypoderm.-souter.)

LAC LAFLAMME (avril-mai 1984)

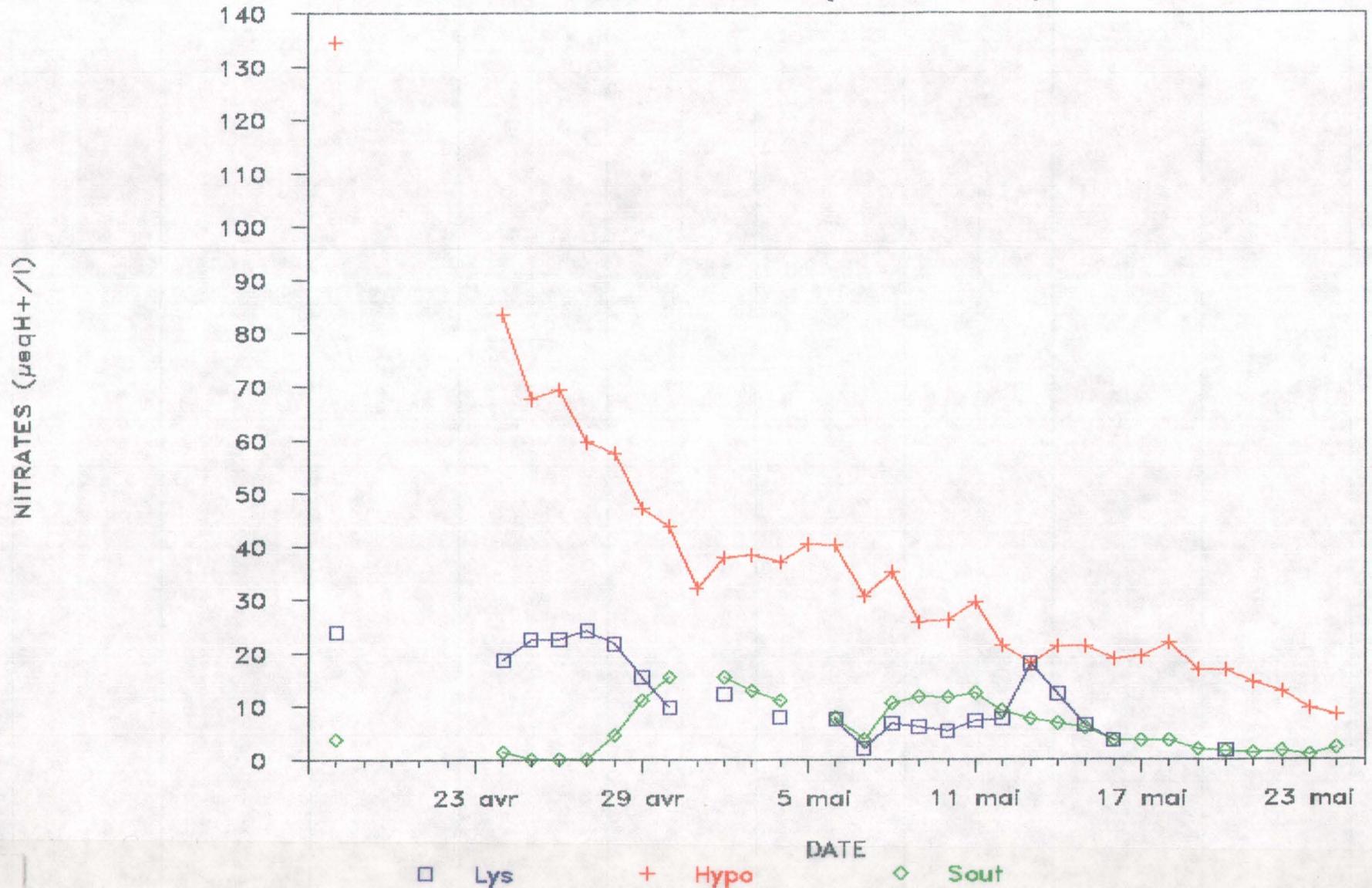


Figure 35 Concentration en nitrate dans l'eau de fonte, dans le ruisseau hypodermique et dans les eaux souterraines.

96

# SULFATES(lysim.-hypoderm.-souter.)

LAC LAFLAMME (avril-mai 1984)

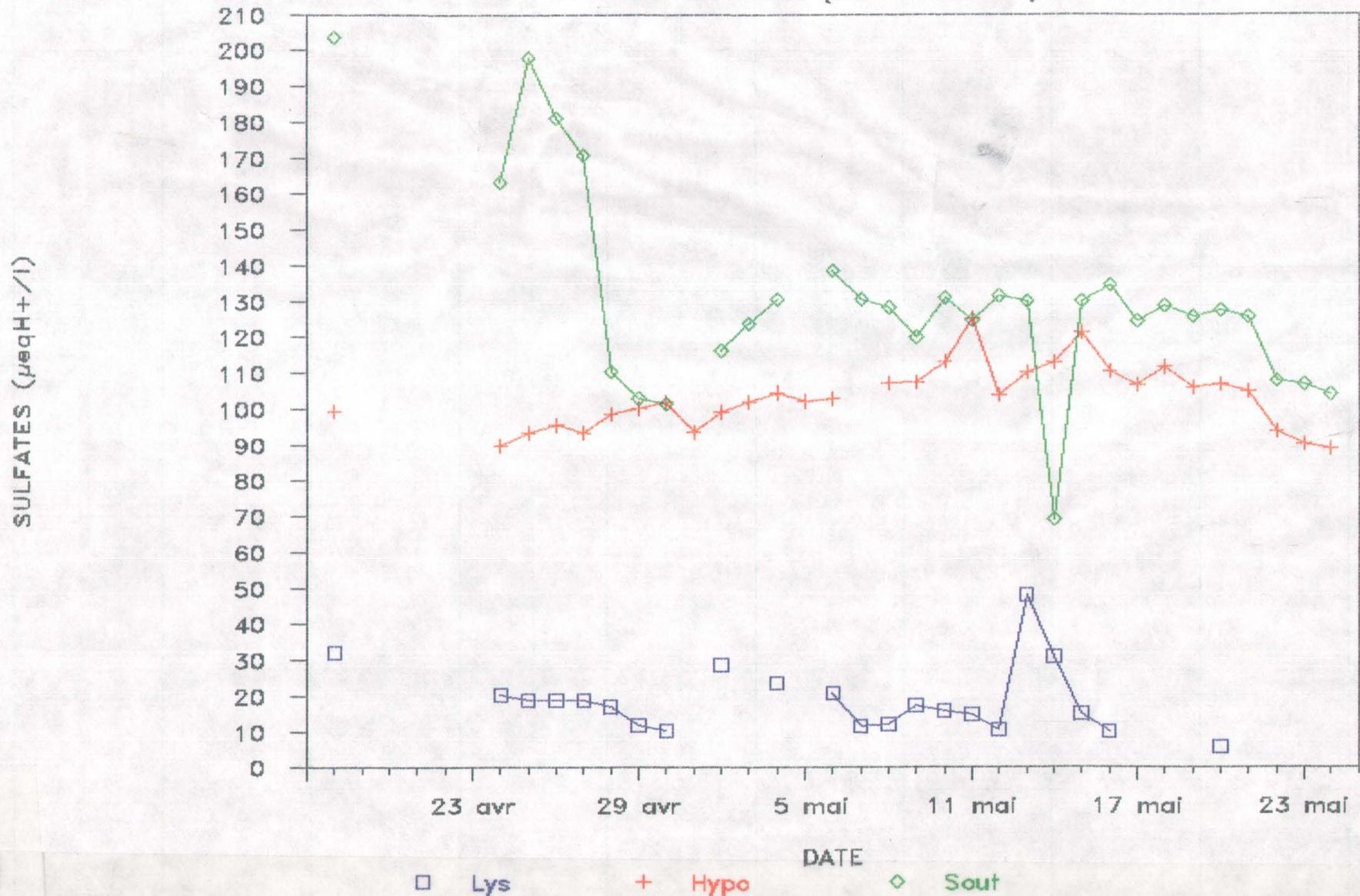


Figure 36 Concentration des sulfates dans l'eau de fonte, dans le ruisseau hypodermique et dans les eaux souterraines.