

Université du Québec

Mémoire présenté à

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

comme exigence partielle

de la

maîtrise ès sciences

par

Yves Bédard

Fonte printanière en forêt boréale: flux des
anions d'acides forts
dans les eaux de fonte et de
ruissellement hypodermique.

Février 1986

REMERCIEMENTS

Je remercie sincèrement toutes les personnes qui, chacune pour leur part, m'ont apporté leur appui dans l'élaboration de cette étude. Merci, particulièrement, à mesdames Wanda Sochanska, Suzanne Dussault et Hélène Rodrigue. Merci, aussi, à messieurs Jean Stein, Jean-Yves Charette, Jean Roberge, Denis Couillard et Roger Beauchemin. Merci, enfin, à monsieur H. Gerald Jones qui n'a pas ménagé temps, efforts et encouragements pour m'aider à élaborer ce travail de recherche.

RESUME

La forêt boréale du bouclier canadien est considérée comme un écosystème sensible aux précipitations acides. Sur le site d'étude du bassin versant du lac Laflamme, qui fait partie de cet écosystème, un échantillonnage des précipitations, des eaux de fonte, des eaux souterraines et des eaux de ruissellement a été effectué à la fin de l'hiver et au printemps de 1984. Cet échantillonnage a permis l'étude comparée de l'évolution temporelle des concentrations en anions d'acides forts (chlorures, sulfates et nitrates) et en ions hydrogène des compartiments hydrologiques mentionnés.

De plus, pour l'ensemble de la fonte, les flux, dans les eaux de fonte, des ions chlorures, sulfates et nitrates ont été respectivement estimés à $3,6 \pm 2,4$ méq/m² ($1,3 \pm 0,8$ kg/ha), 25 ± 8 méq/m² (12 ± 4 kg/ha) et 10 ± 7 méq/m² ($1,4 \pm 1,0$ kg N-NO₃⁻/ha). Ces mêmes flux dans les eaux de ruissellement hypodermique ont été estimés, d'après une première méthode (méthode du bilan net en chlorures nul), à $3,6 \pm 2,4$ méq Cl⁻/m² ($1,3 \pm 0,8$ kg Cl⁻/ha) (par hypothèse), 55 ± 36 méq SO₄²⁻/m² (26 ± 17 kg SO₄²⁻/ha) et 14 ± 9 méq NO₃⁻/m² ($2,0 \pm 1,3$ kg N-NO₃⁻/ha) et, d'après une seconde méthode (méthode du bilan hydrologique du bassin) moins fiable que la première, à $1,9$ méq Cl⁻/m² ($0,67$ kg Cl⁻/ha), 30 méq SO₄²⁻/m² (14 kg SO₄²⁻/ha) et $7,6$ méq NO₃⁻/m² ($1,1$ kg N-NO₃⁻/ha). Les charges en chlorures, sulfates et nitrates transportées par le ruissel-

lement hypodermique pourraient donc provenir de la fonte du couvert de neige, mais il n'est pas exclus qu'une partie des sulfates mesurés puisse provenir de quantités présentes dans le bassin avant la fonte.

Le compartiment "sol-eaux souterraines" joue un rôle important comme réservoir pour les sulfates (adsorbés dans le sol, en solution dans les eaux souterraines) et pour les chlorures (en solution dans les eaux souterraines), alors que les horizons organiques du sol agissent comme sites de production et de consommation des nitrates. Le niveau de la nappe phréatique dans le sol est déterminant pour la quantité et la qualité du ruissellement hypodermique dont elle est la principale source. En effet, pH et concentrations en ions dans les eaux pourront varier selon les caractéristiques physiques et chimiques des horizons de sols rencontrés lors de la percolation des eaux de fonte vers la nappe et du passage des eaux souterraines de la nappe vers la surface du sol pour former le ruissellement.

ABSTRACT

Ecosystems of the Canadian shield are considered to be sensitive to acid precipitation. At the Lake Laflamme watershed 80 km north of Québec city, on the southern half of the shield, the chemistry of precipitation, snowcover, meltwaters, groundwaters and surface runoff (intermittent stream) were studied during the winter and spring of 1983-1984. In particular, the evolution of strong acid anions (Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^-) and H^+ ions was characterized in each hydrological compartment during the spring melt.

For the whole melt period, Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^- fluxes in meltwaters were estimated respectively to $3,6 \pm 2,4 \text{ meq/m}^2$ ($1,3 \pm 0,8 \text{ kg/ha}$), $25 \pm 8 \text{ meq/m}^2$ ($12 \pm 4 \text{ kg/ha}$) and $10 \pm 7 \text{ meq/m}^2$ ($1,4 \pm 1,0 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$). To determine the fluxes in the stream waters for the whole melt period, two methods were used. The first method (null net Cl^- budget) led to estimates of $3,6 \pm 2,4 \text{ meq Cl}^-/\text{m}^2$ ($1,3 \pm 0,8 \text{ kg Cl}^-/\text{ha}$) (by definition), $55 \pm 36 \text{ meq SO}_4^{2-}/\text{m}^2$ ($26 \pm 17 \text{ kg SO}_4^{2-}/\text{ha}$) and $14 \pm 9 \text{ meq NO}_3^-/\text{m}^2$ ($2,0 \pm 1,3 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$). The second method (watershed hydrological budget method), which, however, is considered less reliable than the Cl^- budget one, gave concomitant values of $1,9 \text{ meq Cl}^-/\text{m}^2$ ($0,67 \text{ kg Cl}^-/\text{ha}$), $30 \text{ meq SO}_4^{2-}/\text{m}^2$ ($14 \text{ kg SO}_4^{2-}/\text{ha}$) and $7,6 \text{ meq NO}_3^-/\text{m}^2$ ($1,1 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$). These results show that the total discharge of SO_4^{2-} and NO_3^- by the stream waters could be accounted for by the SO_4^{2-} and NO_3^- loads pre-

sent in the snowcover before the start of the melt period and subsequent precipitation. However, they also strongly indicate that a part of the SO_4^{2-} discharge could have a pre-melt origin.

In effect it is shown that the "soil-groundwater" compartment plays an important role as a SO_4^{2-} reservoir (SO_4^{2-} adsorbed by soil, groundwaters dissolved SO_4^{2-}). Conversely the soil organic horizons act as production and consumption sites for NO_3^- . The height of the groundwater in the catchment area is a determining factor for the quantity and quality of stream waters. The pH and ionic concentrations of these waters depend on the degree of contact between soil horizons and meltwaters as they percolate towards the groundwater body and on that of the groundwaters as they return to the surface, producing stream flow.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xiv
1. INTRODUCTION	1
1.1 Problématique globale des précipitations acides	2
1.2 Problématique de la forêt boréale	3
1.3 Problématique de la fonte printanière	4
1.4 Objectif de l'étude	6
2. DESCRIPTION DU SITE D'ETUDE	9
3. METHODOLOGIE	11
3.1 Echantillonnage	12
3.1.1 Précipitations humides	12
3.1.2 Couvert de neige	12
3.1.3 Eaux de fonte	13
3.1.4 Eaux de ruissellement hypodermique	13
3.1.5 Eaux souterraines	14

	<u>Page</u>
3.2 Matériel et méthodes d'analyses physico-chimiques	14
3.2.1 Préparation des échantillons	14
3.2.2 Nettoyage de la verrerie de laboratoire	14
3.2.3 Filtration	15
3.2.4 Analyses des anions (chlorures, sulfates, nitrates)	15
3.2.5 Mesure du pH	16
3.3 Données météorologiques	16
3.4 Données hydrologiques	16
3.5 Traitement des données	17
 4. RESULTATS	 18
4.1 Précipitations humides	20
4.2 Couvert de neige	20
4.3 Eaux de fonte (lysimètres)	20
4.4 Eaux de ruissellement hypodermique	21
4.5 Eaux souterraines	21
 5. DISCUSSION	 22
5.1 Examen de l'évolution temporelle des concentrations	23
5.2 Mécanisme possible de production du ruissellement hypodermique observé	24

	<u>Page</u>
5.3 Evaluation des flux de chlorures, sulfates et nitrates véhiculés par les eaux de fonte et le ruisseau hypodermique et bilan global des flux	26
5.3.1 Evaluation des flux ioniques dans les eaux de fonte	27
5.3.1.1 Première période de fonte: 9 au 16 février 1984	28
5.3.1.2 Deuxième période de fonte: 3 mars au 28 avril 1984	28
5.3.1.3 Troisième période de fonte: 28 avril au 20 mai 1984	32
5.3.2 Evaluation des flux ioniques dans le ruisseau hypodermique	33
5.3.2.1 Estimation des charges ioniques maximales pouvant être apportées par le ruisseau hypodermique	34
5.3.2.2 Première méthode d'estimation des charges ioniques dans le ruisseau hypodermique: méthode du bilan net en chlorures nul	35
5.3.2.3 Deuxième méthode d'estimation des charges ioniques dans le ruisseau hypodermique: méthode du bilan hydrologique du bassin	38

	<u>Page</u>
5.3.3 Bilan global des flux (eaux de fonte et ruisseau hypodermique)	40
6. CONCLUSION	48
7. BIBLIOGRAPHIE	52
ANNEXE A Tableaux	60
ANNEXE B Figures	84

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>
TABLEAU 1 Liste des échantillons prélevés	61
TABLEAU 2 Concentrations et charges en chlorures des précipitations du 13 avril au 24 mai 1984	62
TABLEAU 3 Concentrations et charges en sulfates des précipitations du 13 avril au 24 mai 1984	63
TABLEAU 4 Concentrations et charges en nitrates des précipitations du 13 avril au 24 mai 1984	64
TABLEAU 5 Concentrations et charges en chlorures, sulfates et nitrates du couvert de neige les 3 mars et 28 avril 1984	65
TABLEAU 6 Equivalences en eau de la fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3	66
TABLEAU 7 Résultats d'analyse des échantillons d'eau de fonte (lysimètre 1)	67
TABLEAU 8 Résultats d'analyse des échantillons d'eau de fonte (lysimètre 2)	68

	<u>Page</u>
TABLEAU 9 Résultats d'analyse des échantillons d'eau de fonte (lysimètre 3)	69
TABLEAU 10 Détermination des charges en chlorures des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3	70
TABLEAU 11 Détermination des charges en sulfates des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3	71
TABLEAU 12 Détermination des charges en nitrates des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3	72
TABLEAU 13 Détermination des charges en ions hydrogène des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3	73
TABLEAU 14 Concentrations moyennes en chlorures, sulfates, nitrates et ions hydrogène de l'eau de fonte (concentrations moyennes pondérées des effluents des lysimètres L1, L2 et L3) et lames d'eau de fonte moyenne (H_{eau})	74
TABLEAU 15 Débits, concentrations et charges en chlorures, sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique ...	75

	<u>Page</u>
TABLEAU 16 Niveau de l'eau par rapport au sol et concentrations en chlorures, sulfates, nitrates et ions hydrogène des échantillons d'eau souterraine (puits A, printemps 1984)	76
TABLEAU 17 Bilan de la fonte du 9 au 16 février 1984	77
TABLEAU 18 Bilan de la fonte du 3 mars au 28 avril 1984	78
TABLEAU 19 Bilan de la fonte de décembre 1983 au 20 mai 1984	79
TABLEAU 20 Valeurs limites de la surface moyenne de drainage du ruisseau hypodermique et de la lame d'eau moyenne ruisselée	80
TABLEAU 21 Détermination des charges maximales possibles en chlorures, sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique	80
TABLEAU 22 Concentrations moyennes en chlorures, sulfates et nitrates des précipitations humides, des eaux de fonte, des eaux souterraines et des eaux de ruissellement (bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984)	81

	<u>Page</u>
TABLEAU 23 Détermination des charges en sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique d'après la méthode du bilan net en chlorures nul	82
TABLEAU 24 Détermination des charges en chlorures, sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique d'après la méthode du bilan hydrologique	82
TABLEAU 25 Bilan global des charges en chlorures, sulfates et nitrates impliquées durant la fonte printanière de 1984 sur le bassin versant du lac Laflamme	83

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>
FIGURE 1 Situation de la forêt Montmorency	85
FIGURE 2 Formations géologiques présentes sur le bassin versant du lac Laflamme	86
FIGURE 3 Plan du site d'étude	87
FIGURE 4 Evolution temporelle des concentrations en chlorures des eaux de fonte, de ruissellement hypodermique et souterraines	88
FIGURE 5 Evolution temporelle des concentrations en sulfates des eaux de fonte, de ruissellement hypodermique et souterraines	89
FIGURE 6 Evolution temporelle des concentrations en nitrates des eaux de fonte, de ruissellement hypodermique et souterraines	90
FIGURE 7 Schéma hydrologique du système	91

	<u>Page</u>
FIGURE 8 Evolution temporelle des concentrations en ions hydrogènes des eaux de fonte, de ruissellement hypodermique et souterraines	92
FIGURE 9 Flux estimés de chlorures, sulfates et nitrates dans la forêt boréale du bassin versant du lac Laflamme durant les différentes phases de la fonte printanière de 1984	93

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

1.1 PROBLEMATIQUE GLOBALE DES PRECIPITATIONS ACIDES

Depuis le début de la décennie précédente, la découverte de l'importance de l'acidité des précipitations en certaines parties du monde n'a pas manqué d'éveiller l'inquiétude et de soulever maintes questions chez les personnes ayant à coeur la préservation de la qualité de l'environnement (Dillon et al., 1978). Plusieurs chercheurs ont suggéré en effet que les précipitations acides puissent être la cause de certaines détériorations observées dans le milieu telles les baisses de populations de quelques espèces de poissons ou le dépérissement de certaines espèces végétales (Leivestad et Muniz, 1976). Plusieurs études sur le terrain même ont donc été mises en branle depuis quelques années dans le but de découvrir le lien éventuel entre l'acidité des précipitations et certains phénomènes que l'on observe dans le milieu naturel. Une meilleure compréhension de la question permettrait ainsi d'envisager l'intervention la plus efficace si une action doit être posée.

Les travaux effectués jusqu'à maintenant par une multitude de chercheurs ont permis de mettre en lumière une partie de la complexité du phénomène. L'hétérogénéité inhérente du milieu naturel fait que l'impact de l'acidification des précipitations varie à la fois dans le temps et dans l'espace. En effet certains milieux sont plus sensibles que d'autres et l'influence de ces précipitations ne semble pas être la même tout le long de l'année.

1.2 PROBLEMATIQUE DE LA FORET BOREALE

Une partie importante du territoire du Canada, de même qu'une partie proportionnellement encore plus grande du Québec, est constituée par le bouclier canadien. Sur cette formation géologique, on retrouve comme couverture forestière dominante, la forêt boréale. A cause de son importance et de sa richesse, la forêt boréale joue dans notre économie un rôle de premier plan avec les industries de fabrication du papier, de bois de construction et touristiques, et occupe une place irremplaçable dans notre patrimoine écologique et culturel. Or, tout cet écosystème serait menacé à plus ou moins long terme (CNRC, 1981). En effet, le substrat avec lequel les précipitations et les eaux de surface entrent en contact sur le bassin est un sol podzolique sur une assise de roches métamorphiques. La capacité tampon, vis-à-vis l'acidité de ce substrat étant reconnue comme faible, on a donc affaire à un écosystème très sensible aux précipitations acides avec ses eaux de surface peu minéralisées (Papineau, 1984). Le même type de milieu sensible se retrouve aussi en d'autres endroits du globe comme la Scandinavie, l'est des Etats-Unis et le nord de l'Ontario.

Face à la menace potentielle que laisse peser l'acidité des précipitations, plusieurs bassins jaugés ont fait et font l'objet d'études de par le monde. Au Canada, trois bassins ont été spécialement choisis comme sites d'étude privilégiés par Environnement Canada (Papineau, 1983). Depuis 1979, le bassin versant du lac Laflamme, un écosystème typique de la forêt boréale, fait partie de ces sites et est donc l'objet de plusieurs travaux de recherche (Jones et al., 1985;

Charette et al., 1983; Jones et al., 1984b; Papineau, 1983; Padilla et al., 1983, entre autres) touchant l'impact des précipitations acides sur cet écosystème sensible.

1.3 PROBLEMATIQUE DE LA FONTE PRINTANIERE

Des études menées sur une base annuelle sur quelques bassins versants considérés comme sensibles aux précipitations acides ont mis en évidence des changements radicaux dans la qualité chimique des eaux de surface durant la période correspondant à la fonte printanière (Seip et al., 1980 ; Johannessen et al., 1977; Marmorek et al., 1984). Le même phénomène a d'ailleurs été observé sur le bassin versant du lac Laflamme (Charette et al., 1983). Ces changements, qu'on a appelé "choc acide printanier", seraient dus au relâchement, par le couvert de neige, d'eau de fonte fortement concentrée en polluants acides durant les premiers jours de fonte (Johannessen et Henriksen, 1978).

Cependant, nous savons aussi que l'écosystème terrestre, par l'intermédiaire du sol particulièrement, réagit à ces apports de contaminants acides en neutralisant une partie de l'acidité et en modifiant l'équilibre chimique des eaux qui entrent en contact avec lui (Overrein et al., 1980).

Il a été observé au lac Laflamme, lors de la fonte printanière de 1983, que l'influence néfaste possible de ce choc printanier pourrait consister, dans un premier temps, en une baisse de pH de la couche d'eau se trouvant à la surface, juste en dessous de la couverture de glace recouvrant le lac, stratifié à ce moment de l'année (Jones et al.,

1984a). Ce phénomène représenterait un danger, entre autres, pour les frayères connues qui sont situées sur le fond du lac près des berges à de faibles profondeurs d'eau (Papineau, 1984). Ce comportement des eaux du lac serait dû à des apports d'eau originant de la fonte du couvert de neige sur le bassin versant et apportée par le ruissellement de surface sur les berges du lac. Ces eaux ont séjournées moins longtemps sur le bassin que les eaux souterraines alimentant, à cette époque, le fond du lac et auraient ainsi moins subi l'effet neutralisateur du sol, ce qui acidifierait l'épilimnion du lac.

Dans un deuxième temps, après la fonte de la couche de glace recouvrant le lac, un autre aspect du choc acide printanier serait l'arrivée massive d'eaux provenant des différents ruisseaux alimentés par la fonte du couvert de neige. Le mélange de ces eaux acidifiées avec les eaux du lac n'est plus alors seulement superficiel à cause de la turbulence. Les quantités impliquées, ajoutées à ce facteur de mélange, rendent l'acidification du lac plus généralisée; d'autant plus, qu'au même moment, les eaux souterraines alimentant aussi le lac sont également acidifiées, étant donné que les eaux se déchargeant de la nappe vers le lac proviennent de plus en plus de l'infiltration récente de l'eau de fonte et ont donc eu moins le temps d'être tamponnées par contact avec le sol. La composition chimique des eaux de ruissellement semble donc jouer un rôle déterminant dans la perspective du choc acide printanier sur le bassin versant du lac Laflamme.

Les ions sulfates et nitrates accompagnent principalement, comme contre-ions, les ions hydrogènes dans les précipitations. Cependant, si

les ions hydrogènes sont neutralisés peu à peu dans l'environnement et les ions nitrates, incorporés par la biomasse, les ions sulfates, eux, semblent beaucoup plus persistants dans le milieu. Ces sulfates sont, de plus, associés à un effet inquiétant des précipitations acides, à savoir le lessivage de cations comme le calcium et le magnésium divalents et le potassium et le sodium monovalents des sols (Overrein et al., 1980; Wiklander, 1980; Cronan, 1980; Wiklander, 1975).

1.4 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les sulfates sont, globalement, les anions dominants dans les précipitations, les eaux de fonte et le ruissellement sur le bassin versant du lac Laflamme lors de la fonte (Jones et al., 1985). Les flux de sulfates dans l'écosystème permettent de mieux suivre les conséquences de l'acidification des précipitations. Cependant, à cause de la complexité du système hydrologique, il s'avère problématique de comparer les flux ioniques mesurés dans les eaux de fonte et qui sont rapportés en termes de quantités par unité de surface (méq/m²) pour une période donnée, et ces mêmes flux mesurés dans un ruisseau hypodermique en termes de quantités (méq) pour une période donnée, alors qu'il est très difficile d'estimer la surface variable participant au ruissellement. Il nous faut donc examiner le comportement des sulfates dans le système relativement à d'autres anions d'acides forts afin de mieux discerner ce qui est particulier aux sulfates de ce qui ne l'est pas. Les ions chlorures (Cl⁻) et nitrates (NO₃⁻) feront donc, en plus des sulfates (SO₄²⁻), l'objet de notre étude.

Nous voulons ainsi mettre en évidence d'abord les facteurs qui conditionnent l'évolution temporelle des concentrations des ions chlorures, sulfates et nitrates dans l'eau de ruissellement sur le bassin versant du lac Laflamme durant la fonte printanière. L'influence des ions sulfates et nitrates est considérée comme déterminante dans le processus d'acidification des eaux de surface par les précipitations acides (CNRC, 1981).

L'ion chlorure, présent lui aussi dans les précipitations comme les sulfates et nitrates, n'est pas considéré comme jouant un rôle dans l'acidification des eaux, bien qu'étant, lui aussi, un anion d'acide fort (HCl). Cependant, sa grande solubilité, sa faible adsorption par les sols et sa faible réactivité chimique dans la biosphère en font un "traceur chimique" pouvant servir à mieux caractériser le rôle des facteurs hydrologiques du système qui influencent aussi le comportement des sulfates et nitrates dans le milieu.

Ce travail veut aussi déterminer, à partir des données disponibles pour la fonte de 1984 au lac Laflamme, certains flux de chlorures, sulfates et nitrates à travers le système. Une estimation des charges ioniques en chlorures, sulfates et nitrates permettrait de quantifier ces flux durant les différents épisodes de fonte du couvert de neige de même que le flux observé dans un ruisseau intermittent du site (ruissellement hypodermique). L'intercomparaison de ces flux permettra de mieux cerner les mécanismes qui régissent le devenir des chlorures, sulfates et nitrates dans le milieu en identifiant d'autres réservoirs d'ions dans le système. C'est ainsi que nous arriverons à expliquer les

comportements observés dans les charges et les concentrations en ces anions dans le ruissellement de surface.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DU SITE D'ETUDE

2. DESCRIPTION DU SITE D'ETUDE

Le bassin du lac Laflamme (altitude: 777 m à 884 m; 46°11'N, 74°57'0) est situé dans la forêt Montmorency (réserve des Laurentides, Québec) à 80 km au nord de la ville de Québec (figure 1). La sapinière à bouleau blanc recouvre ce site dont la roche mère est de gneiss charnockitique précambrien de la province de Grenville. Till et moraine recouvrent la presque totalité du bassin, l'exception étant les deux tourbières à chaque extrémité du lac (figure 2). Les versants du bassin ont une pente médiane de 8.7% (minimum 0%, maximum 30%). Le lac lui-même occupe une superficie de 0,061 km² sur un bassin de 0,684 km².

La température moyenne annuelle y est de 0,2°C (température minimale moyenne, janvier: -15°C; température maximale moyenne, juillet: 15°C). La période moyenne sans gel est de seulement 40 jours. Les vents dominants soufflent dans la direction ouest-est. Les précipitations annuelles moyennes enregistrées depuis 1966 s'élèvent à environ 1400 mm dont 34% sous forme de neige (Plamondon, 1981).

Le réseau de drainage du lac est peu développé. De nombreux petits ruisseaux intermittents sont observés lorsque le niveau de la nappe phréatique est élevé, mais seul le ruisseau principal (figure 3) coule durant toute l'année. La majeure portion de l'alimentation du lac est d'origine souterraine durant la plus grande partie de l'année bien que le ruissellement de surface prenne de l'importance durant la fonte printanière (Azzaria et al., 1982).

CHAPITRE 3

METHODOLOGIE

3. METHODOLOGIE

3.1 ECHANTILLONNAGE

Les échantillons nécessaires à notre étude ont été recueillis durant l'hiver et le printemps 1984 sur un site situé sur le versant nord du lac (figure 3).

3.1.1 Précipitations humides

La collecte des précipitations a été effectuée par deux collecteurs automatiques (type Sangamo) installés dans le sous-bois aux sites SA et SB (figure 3).

3.1.2 Couvert de neige

Le couvert de neige a été échantillonné aux stations 6, 9 et 11 et à l'emplacement de deux lignes de neige (WE et NS) par la méthode de tranchée à la pelle (Jones et al., 1984a). La couverture végétale et le sol de ces sites ont déjà été nettoyés et partiellement nivelés dans le cadre d'un programme régulier de l'INRS-Eau sur les études physico-chimiques de la neige. L'équivalence en eau du couvert de neige a été calculée à partir de la mesure de la densité de la neige effectuée directement sur le terrain à l'aide d'un densitomètre suédois (AB Produktionmater Stockholm). La comparaison entre les volumes des échantillons de neige recueillis et ceux de l'eau provenant de ces échantillons fondus en laboratoire a permis de valider cet estimé de l'équivalence en eau.

3.1.3 Eaux de fonte

Les eaux de fonte ont été recueillies par trois lysimètres de 1 m² aux stations L1, L2 et L3. Les lysimètres consistent en des bacs rigides en fibre de verre gris (longueur: 1 m; largeur: 1 m; hauteur: 0,3 m), installés de façon à ce que leur fond repose sur le premier horizon du sol minéral. Les bacs ont été mis au niveau et un lit forestier artificiel de terre organique, de branches et d'herbacées a été reconstitué autour de la paroi afin que le ruissellement vertical des eaux de fonte se fasse dans des conditions aussi naturelles que possible. Afin d'éviter le réchauffement local de la neige par les radiations de longues longueurs d'onde réémises par les parois des lysimètres lors des jours ensoleillés, des feuilles de mousse de polystyrène ont été placées pour protéger les parois exposées de chaque lysimètre de la radiation directe du soleil, en évitant, comme il se doit, de mettre la surface de neige des lysimètres à l'ombre. Les eaux de fonte s'écoulant des lysimètres ont été recueillies dans des récipients de plastique (capacité: 45 litres) placés plus profondément dans le sol; le contenu des récipients était alors protégé, grâce à un couvercle, de contaminations éventuelles par des apports de l'atmosphère ou de la voûte forestière.

3.1.4 Eaux de ruissellement hypodermique

Les eaux de ruissellement hypodermique (eaux de surface circulant alternativement dans et sur les couches superficielles du sol) ont été prélevées à la station de jaugeage (RH) d'Environnement Canada au

ruisseau intermittent situé à 50 m au sud-est de la ligne de neige WE (figure 3).

3.1.5 Eaux souterraines

Des échantillons d'eaux souterraines ont été obtenus au piézomètre A (PA), situé près du lac, au moyen d'une pompe péristaltique.

3.2 ANALYSES DE LABORATOIRE

3.2.1 Préparation des échantillons pour analyse

Les échantillons prélevés sur le site étudié (précipitations, neige, eaux de fonte des lysimètres, eaux du ruisseau hypodermique, eaux souterraines) étaient apportés au laboratoire de l'INRS-Eau à Québec aussitôt après leur cueillette ou en-dedans de 24 heures au maximum. On laissait fondre à la température ambiante (23°C) les échantillons solides dans des béciers de plastique. Aussitôt cette fonte terminée, le volume de liquide obtenu était mesuré au moyen d'un cylindre gradué en plastique.

3.2.2 Nettoyage de la verrerie de laboratoire

Toute la verrerie qui devait venir 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 (eau d'abord distillée que l'on fait ensuite circuler sur de la résine échangeuse d'ions). Les

contenants servant à entreposer les sous-échantillons pour le dosage des anions avaient été rincés à l'eau ultrapure seulement.

3.2.3 Filtration des échantillons

Tous les échantillons ont été filtrés sur un système en polycarbonate (Sartorius no SM16-510) avec un filtre en polycarbonate (Nucléopore, 47 mm de diamètre, 0,4 um de porosité). Le filtre était posé avec des pinces en plastique et rincé avec 50 ml d'eau ultrapure de conductivité inférieure à 1 uS/cm (système Millipore Milli-Q3RO/Milli-Q2). Après avoir enlevé l'eau de rinçage, l'échantillon était filtré. Dépendant de la vitesse de filtration, on utilisait un ou plusieurs filtres de façon à ce que l'opération se fasse dans un délai raisonnable. Le filtrat était ensuite placé dans un contenant de polyéthylène linéaire pour le dosage des anions et la mesure du pH et conservé à 4°C et à l'obscurité. Les analyses ont été faites d'après les méthodes reconnues (EPA, 1979) et à l'intérieur des délais de conservation recommandés.

3.2.4 Analyses des anions (chlorures, sulfates, nitrates)

Ces trois anions sont dosés simultanément par chromatographie ionique (appareil de marque Dionex 12S). L'échantillon est injecté à l'entrée de la colonne de séparation par un échantillonneur automatique et passe à travers la colonne, entraîné par l'éluant (NaHCO_3 0,0024M; Na_2CO_3 0,0030M). La séparation des différents constituants anioniques s'effectue ainsi en moins de dix minutes. Un suppresseur permet d'abaisser la conductivité de base. Un conductivimètre placé après le

suppresseur permet de mesurer en continu la conductivité qui est directement proportionnelle à la concentration de chaque anion. Les concentrations respectives sont finalement obtenues par référence à une courbe de calibration établie à l'aide d'étalons de concentrations connues.

3.2.5 Mesure du pH

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pHmètre (Radiometer PHM 26) et d'une électrode combinée. La calibration a été effectuée à tous les jours où il y a eu mesure du pH, à l'aide des tampons pH = 7,0 et pH = 4,0 (Fisher Scientifique Ltée).

3.3 DONNEES METEOROLOGIQUES

Les données météorologiques utilisées proviennent de la station météorologique "forêt Montmorency" du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada. Une très bonne corrélation existe entre les données recueillies à cette station et celles prises sur le bassin versant du lac Laflamme même (Plamondon, 1982). Nous utiliserons donc ces données, avec ajustements si nécessaire, pour obtenir les renseignements dont nous avons besoin sur les conditions météorologiques prévalant durant la période étudiée.

3.4 DONNEES HYDROLOGIQUES

Certaines données hydrologiques dont nous avons eu besoin, telles le niveau de la nappe phréatique et le débit du ruisseau hypodermique, ont été recueillies, compilées et traitées par une équipe de travail du

département d'hydrologie forestière de l'université Laval (J. Stein et J. Roberge, communication personnelle).

3.5 TRAITEMENT DES DONNEES

Un traitement numérique des données obtenues a été effectué ainsi:

- entrée des données sur fichiers informatiques;
- calcul des concentrations ($\mu\text{eq/l}$) de chlorures, nitrates et sulfates à partir des mesures en hauteurs de pic de chromatographie par l'utilisation de la méthode d'ajustement des courbes (méthode des moindres carrés);
- calcul ou estimations des charges ioniques contenues dans les précipitations, le couvert de neige, les eaux de fonte des lysimètres et les eaux de ruissellement hypodermique.

CHAPITRE 4

RESULTATS

4. RESULTATS

Des échantillons ont été prélevés à tous les jours du 24 avril jusque vers la fin de la période de fonte massive (16 mai). D'autres échantillons ont été recueillis, à des fréquences moins grandes un peu après et, surtout, avant cette période, à l'époque des fontes partielles. Le tableau 1 donne une vue d'ensemble de l'échantillonnage.

La charge ionique d'un échantillon recueilli pour représenter l'état des précipitations, du couvert de neige, des eaux de fonte, des eaux souterraines ou des eaux de ruissellement pendant un intervalle de temps donné est calculée d'après l'équation (1) suivante :

$$L(i) = a \cdot H_{\text{eau}} \cdot [i] \quad (1)$$

où:

$L(i)$: charge en ion "i" contenue dans les précipitations, le couvert de neige, les eaux de fonte, les eaux souterraines ou l'eau de ruissellement ($\text{még}/\text{m}^2$);

a: facteur de conversion ($10^{-3} \text{ még} \cdot \text{l} / \text{uéq} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^2$);

H_{eau} : équivalence en eau des précipitations, du couvert de neige, de la fonte, de l'écoulement souterrain ou du ruissellement (mm);

[i]: concentration en ion "i" du couvert de neige, des eaux de fonte, des précipitations, des eaux souterraines ou de eaux de ruissellement hypodermique ($\text{uéq}/\text{l}$).

4.1 PRECIPITATIONS

Les analyses des échantillons de neige et de pluie recueillis par les deux capteurs Sangamo et les équivalences en eau des précipitations nous permettent ainsi, par l'équation 1, de calculer les charges en chlorures (tableau 2), sulfates (tableau 3) et nitrates (tableau 4) apportées par les précipitations.

4.2 COUVERT DE NEIGE

Des échantillons du couvert de neige ont été prélevés pendant et avant la fonte massive. Les charges ioniques contenues dans le couvert de neige ont été calculées d'après l'équation 1 (tableau 5). Ces données de qualité de la neige ont été utilisées particulièrement pour estimer la qualité chimique des eaux de fonte lorsque des mesures directes n'avaient pas été effectuées.

4.3 EAUX DE FONTE

Dépendamment des conditions météorologiques et du débit de fonte dans les lysimètres, les échantillons d'eau de fonte ont été prélevés, soit le matin vers 10 heures, soit l'après-midi vers 15 heures 30. Quantité et qualité de ces eaux de fonte sont rapportées aux tableaux 6 à 9. Des défauts dans le fonctionnement des lysimètres ou, tout simplement, l'absence de fonte expliquent le manque de données pour certaines journées.

Les charges moyennes en chlorures (tableau 10), sulfates (tableau 11), nitrates (tableau 12) et ions hydrogène (tableau 13) dans les eaux

de fonte sont calculées suivant l'équation 1. Les concentrations moyennes journalières en ces quatre ions (tableau 14) sont obtenues en divisant les charges moyennes journalières (tableaux 10 à 13) par les équivalences en eau moyennes journalières de la fonte (tableau 6).

4.4 EAUX DE RUISSELLEMENT HYPODERMIQUE

Trente échantillons d'eau de ruissellement ont été prélevés entre le 24 avril et le 23 mai et deux autres le 18 avril et le 24 mai, au début de la fonte massive et durant la période suivant la fonte, respectivement. Les résultats des analyses de ces échantillons, de même que les débits du ruisseau et les charges ioniques associées, sont reproduits au tableau 15.

4.5 EAUX SOUTERRAINES

Au tableau 16 sont présentés les résultats des analyses chimiques des échantillons d'eau souterraine recueillis au puits A, ainsi que les niveaux journaliers de l'eau dans ce puits.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5. DISCUSSION

5.1 EXAMEN DE L'ÉVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS

L'évolution temporelle des concentrations en ions chlorures, sulfates et nitrates des eaux de fonte (moyenne pondérée des trois lysimètres, tableau 14), des eaux de ruissellement hypodermique (tableau 15) et des eaux souterraines (tableau 16) peut être observée aux figures 4, 5 et 6. Nous pouvons remarquer d'abord qu'un épisode de fonte hivernale a été enregistré durant l'intervalle du 9 au 16 février (particulièrement à cause d'une pluie assez importante le 15 février). Deux courtes périodes de pré-fonte ont ensuite eu lieu du 20 au 22 mars et les 6 et 7 avril avant la fonte massive qui s'est déroulée, avec quelques interruptions dues à des jours de regel, du 11 avril jusque vers le 20 mai.

Nous constatons l'importance des concentrations impliquées dans la fonte du 9 au 16 février par rapport à celles qui ont été mesurées du 13 avril au 24 mai. Pour cette dernière période, il faut noter la similitude, pour les chlorures et les sulfates, entre les concentrations des eaux de ruissellement hypodermique et celles des eaux souterraines et l'importance de ces concentrations par rapport à celles des eaux de fonte au même moment. Les eaux de fonte et les eaux souterraines possèdent, par contre, des concentrations en nitrates similaires du 13 avril au 20 mai, alors que les eaux de ruissellement hypodermique en possèdent des concentrations nettement plus élevées. Il semblerait donc, comme l'ont affirmé Jones et al. (1985), que les nitrates des eaux de

ruissellement hypodermique proviendraient en grande partie de la percolation de l'eau libérée par le couvert de neige à travers les horizons superficiels organiques du sol, alors que sulfates et chlorures auraient vraisemblablement comme origine, pour une bonne part, les eaux souterraines, donc des eaux ayant été plus influencées par le contact avec les horizons minéraux plus profonds du sol. Ceci nous amène donc à envisager un mécanisme de production du ruissellement observé.

5.2 MECANISME POSSIBLE DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT HYPODERMIQUE OBSERVE

Contrairement à ce que l'on aurait pu d'abord penser, la production du ruissellement sur la portion de bassin versant étudiée ne serait pas due principalement à un ruissellement de l'eau de fonte sur un sol gelé. Comme il a été mentionné précédemment, les eaux souterraines formeraient une bonne partie du ruissellement hypodermique observé. Ce phénomène semblerait même assez général dans les zones de climat tempéré humide (Sklash et Farvolden, 1979). Quand le sol est recouvert d'une épaisseur de neige assez importante, comme c'est le cas sur le bassin versant du lac Laflamme au début de la fonte, le sol demeure à une température légèrement supérieure au point de congélation (J. Stein et J. Roberge, communication personnelle) et l'infiltration de l'eau de fonte peut se faire. Lorsque le couvert de neige est réduit, le sol peut alors geler en partie ou complètement, selon la température de l'air, et l'infiltration peut alors être ralentie. Une structure ouverte ("honeycomb") du sol gelé permettant l'infiltration de l'eau dans le sol et qui pourrait exister sur le site entourant le lac Laflamme, a été

observée sur certains bassins (Price et Hendrie, 1983). Il semble donc que, sur le bassin versant du lac Laflamme, une importante partie de l'eau de fonte puisse s'infiltrer dans le sol jusqu'à la nappe phréatique.

Le rehaussement du niveau de la nappe occasionné par cette recharge ferait en sorte qu'en certains endroits, comme dans les creux de terrain et les bas de pente, le sol deviendrait saturé par la nappe affleurant la surface, ce qui provoquerait un écoulement d'eaux souterraines en ces points (Price et Hendrie, 1983; Sklash et Farvolden, 1979). Ce phénomène (écoulement restitué: "return flow") serait majoritairement responsable de la génération de l'écoulement observé dans le ruisseau hypodermique. De plus, les eaux de fonte produites sur ces zones de saturation où l'infiltration ne peut se faire, ruissellent en surface (ruissellement de saturation: "saturation overland flow") formant vraisemblablement la majeure partie de l'écoulement du ruisseau non influencée par les strates profondes du sol.

Bien qu'il semble qu'il s'agisse d'un phénomène plutôt rare dans le temps et dans l'espace (Freeze, 1972), le ruissellement de Horton ("Horton overland flow") pourrait aussi se produire en certains endroits où l'arrivée d'eau de fonte excède la capacité d'infiltration du sol comme il pourrait arriver lors de fontes dues à de fortes pluies. Une partie de l'eau de fonte infiltrée peut également rester emmagasinée un certain temps sous la surface dans la zone insaturée (vadose) et même y circuler latéralement si des zones imperméables sont rencontrées avant de parvenir à la zone saturée ou, si cette rencontre avec la nappe se

fait tout près de la surface, finir par ruisseller sans avoir été pratiquement en contact avec les horizons minéraux du sol (écoulement insaturé). Un schéma présente les diverses composantes hydrologiques du système (figure 7).

5.3 EVALUATION DES FLUX DE CHLORURES, SULFATES ET NITRATES VEHICULES PAR LES EAUX DE FONTE ET LE RUISSEAU HYPODERMIQUE ET BILAN DES FLUX

Considérant qu'une partie des eaux de fonte recharge la nappe phréatique qui, elle-même, constitue la source d'une bonne partie du ruissellement hypodermique par écoulement restitué, et qu'une autre partie moins importante de la fonte passe plus directement dans le ruisseau par ruissellement de saturation et peut-être, même, par écoulement insaturé et ruissellement de Horton, il est essentiel de savoir si toute la charge ionique du ruisseau en chlorures, sulfates et nitrates peut provenir de la fonte du couvert de neige seul, par nappe phréatique interposée ou pas, ou s'il y a d'autres sources pour ces ions.

Nous savons déjà que les charges en ions chlorures, sulfates et nitrates véhiculées par le ruisseau hypodermique entre les 18 avril et 20 mai 1984 ne peuvent provenir de la seule fonte du couvert de neige pendant cette même période étant donné que les concentrations mesurées dans les eaux de fonte sont constamment plus faibles que celles qui ont été mesurées dans le ruisseau. Cependant, les différences de charges pourraient peut-être avoir été suppléées par les épisodes de fonte précédant le 18 avril, les ions libérés par le couvert de neige à ce

moment ayant été stockés temporairement quelque part à l'intérieur du système. Nous devons donc évaluer les charges totales en chlorures, sulfates et nitrates libérées par le couvert de neige pour l'ensemble de la fonte printanière de 1984 et les comparer aux charges correspondantes évaluées pour les flux ioniques à travers le ruisseau hypodermique.

5.3.1 Evaluation des flux ioniques dans les eaux de fonte

Comme il a été possible de le constater à la section 5.1, la qualité des eaux de fonte n'a pas été mesurée directement sur toute la période, bien qu'une grande partie de la fonte massive l'ait été. Il n'est donc pas possible d'évaluer directement le flux d'un ion pour l'ensemble de la période. Il est cependant possible d'estimer ces flux pour différentes "sous-périodes", le découpage de ces dernières étant fait de façon relative, selon les données disponibles. C'est ainsi que, outre les périodes sans fonte du début de décembre 1983 au 9 février 1984 et du 16 février au 3 mars 1984, nous considérerons les périodes de fonte du 9 au 16 février 1984, du 3 mars au 28 avril 1984 et du 28 avril au 20 mai 1984. Il faut remarquer que la fonte n'est pas continue pendant ces épisodes (les jours exacts où il y a eu fonte sont mentionnés à la section 5.1), mais que la méthode employée peut seulement permettre d'établir un estimé global, pour l'ensemble de chaque période. Nous considérons le flux d'un ion dans l'eau de fonte ou dans le ruisseau hypodermique comme la charge en cet ion dans l'eau de fonte ou de ruissellement hypodermique.

5.3.1.1 Première période de fonte: 9 au 16 février 1984

De décembre 1983 jusqu'au 9 février 1984 aucune fonte n'avait été enregistrée sur le site. Entre les visites du site les 9 et 16 février, des eaux de fonte ont été recueillies dans les trois lysimètres. Connaissant donc l'équivalence en eau de la fonte ayant eu lieu entre ces deux dates et la concentration de ces eaux de fonte, les charges en chlorures, sulfates et nitrates impliquées lors de cette période de fonte hivernale partielle ont pu être calculées suivant l'équation (1) et sont donc présentées au tableau 17.

5.3.1.2 Deuxième période de fonte: 3 mars au 28 avril 1984

L'intervalle de temps entre le 3 mars et le 28 avril 1984 a été marqué par des épisodes de fontes intermittentes et les débuts de la fonte massive. Cependant aucun échantillon d'eau de fonte des lysimètres provenant de cette période n'a pu être recueilli à cause de difficultés techniques survenues à cette époque. Toutefois, des données physiques et chimiques sur l'état du couvert de neige le 3 mars et le 28 avril sont disponibles. Nous avons donc dû estimer les charges ioniques impliquées dans la fonte durant cette période en établissant un bilan de masses faisant appel aux stocks de neige au sol. Nous considérons alors que:

$$\text{charge finale} = \text{charge initiale} + \text{apports} - \text{exports} \quad (2)$$

Appliquée à l'évolution du couvert de neige, cette équation se traduit donc par:

$$L^{(i)}_{N,28/04} = L^{(i)}_{N,3/03} + L^{(i)}_{P,3/03-28/04} - L^{(i)}_{F,3/03-28/04} + v L^{(i)}_{N,3/03-28/04} \quad (3)$$

où:

$L^{(i)}_{N,28/04}$: charge ionique du couvert de neige le 28 avril 1984;

$L^{(i)}_{N,3/03}$: charge ionique du couvert de neige le 3 mars 1984;

$L^{(i)}_{P,3/03-28/04}$: charge ionique apportée par les précipitations humides (neige et pluie) et les dépôts secs du 3 mars au 28 avril 1984;

$L^{(i)}_{F,3/03-28/04}$: charge ionique des eaux de fonte produites du 3 mars au 28 avril 1984;

$v L^{(i)}_{N,3/03-28/04}$: charge ionique produite ou consommée à l'intérieur du couvert de neige par des réactions chimiques (avec la matière organique par exemple) ou des processus biologiques entre le 3 mars et le 28 avril 1984.

Les ions chlorures et sulfates sont habituellement considérés comme conservatifs à l'intérieur du couvert de neige (Johannessen et al., 1980), c'est-à-dire non produits ou consommés par réaction chimique ou phénomène biologique dans le milieu. Il semble plus délicat de poser la même hypothèse dans le cas des nitrates étant donné que, à cause de

leur rôle de premier plan comme nutriment, ces ions sont utilisés et produits par la biomasse de façon beaucoup plus rapide et importante que ne peuvent l'être les sulfates par exemple. Cependant, personne n'ayant rapporté dans la littérature, à notre connaissance, de consommation ou d'apport important de nitrates par des mécanismes agissant à l'intérieur du couvert de neige, nous considérerons donc comme relativement négligeables les quantités de nitrates impliquées dans les transformations de nature chimique ou biologique qu'auraient à subir ces ions à l'intérieur du couvert de neige. En réaménageant l'équation (3) et en supposant donc chlorures, sulfates et nitrates conservatifs, on obtient:

$$L^{(1)}F,3/03-28/04 = L^{(1)}N,3/03 + L^{(1)}P,3/03-28/04 - L^{(1)}N,28/04 \quad (4)$$

De plus, les précipitations se présentent sous forme humides et sèches et, en plus, pour fins de calcul, l'estimé des précipitations humides a dû être fait sur trois sous-périodes à savoir du 3 mars au 13 avril, du 13 avril au 18 avril et du 18 avril au 28 avril. L'équation (3) devient alors finalement:

$$\begin{aligned} L^{(1)}F,3/03-28/04 = & L^{(1)}N,3/03 + L^{(1)}PH,3/03-13/04 \\ & + L^{(1)}PH,13/04-18/04 + L^{(1)}PH,18/04-28/04 \\ & + L^{(1)}DS,3/03-28/04 - L^{(1)}N,28/04 \end{aligned} \quad (5)$$

où:

$L^{(1)}PH,3/03-13/04$: charge ionique apportée par les précipitations humides du 3 mars au 13 avril 1984;

L(i)PH,13/04-18/04: charge ionique apportée par les précipitations humides du 13 au 18 avril 1984;

L(i)PH,18/04-28/04: charge ionique apportée par les précipitations humides du 18 au 28 avril 1984;

L(i)DS,3/03-28/04: charge ionique apportée par les dépôts secs du 3 mars au 28 avril 1984.

L'évaluation de la charge des eaux de fonte produites du 3 mars au 28 avril 1984 est donc calculée à partir de l'équation (5) et présentée au tableau 18.

Les charges ioniques du couvert de neige le 3 mars proviennent d'un seul échantillon tandis que celles du 28 avril proviennent de la moyenne de cinq échantillons recueillis à cette date (tableau 5).

Les précipitations humides ont fait l'objet d'un échantillonnage du 13 avril au 24 mai. Les charges des précipitations humides du 13 au 18 avril et du 18 au 28 avril, entre autres, ont donc pu être déterminées directement à partir des mesures (tableaux 2 à 4). Ne possédant comme mesures directes que les équivalences en eau des précipitations humides tombées entre le 3 mars et le 13 avril, les charges en chlorures, sulfates et nitrates de ces dernières ont donc dû être calculées en utilisant comme estimé les concentrations moyennes en ces ions des précipitations échantillonnées du 13 avril au 24 mai.

Les dépôts secs n'ont fait l'objet d'aucune mesure directe lors de la période d'étude. L'évaluation directe des charges ioniques apportées par les dépôts secs reste encore en effet très difficile à effectuer.

La quantité de ces dépôts dépend de divers facteurs tels les concentrations présentes dans l'atmosphère, les directions et vitesses des vents, l'humidité de l'air et le type de surface de captage (neige sèche ou humide, type et densité de couvert végétal, etc). Il n'existe jusqu'à date aucune méthode standard pour la mesurer, bien que plusieurs de celles-ci aient été expérimentées (Pruppacher et al., 1983; Delmas et Jones, 1985).

Jones et Sochanska (1985) ont estimé les charges en chlorures, sulfates et nitrates apportées par les dépôts secs sur le bassin versant du lac Laflamme lors de la fonte printanière de 1983 grâce à une méthode de bilan des charges ioniques du couvert de neige. Leurs résultats permettent de conclure que les pourcentages (charges des dépôts secs)/(charges des précipitations humides) ont été de 61% pour les chlorures, 50% pour les sulfates et 57% pour les nitrates lors de la fonte printanière de 1983. Nous pouvons supposer que ces rapports ont été similaires au printemps 1984. Ayant calculé les charges ioniques des précipitations humides pour la période, nous pourrions estimer, à partir de ces charges et des pourcentages mentionnés précédemment, les charges ioniques que représentent ces dépôts secs entre le 3 mars et le 28 avril 1984 (tableau 18).

5.3.1.3 Troisième période de fonte: 28 avril au 20 mai 1984

Comme il avait été déjà mentionné, des échantillons d'eau de fonte avaient été recueillis du 28 avril au 20 mai. Les charges ioniques apportées par les eaux de fonte lors de cette période ont donc été

calculées pour les chlorures (tableau 10), les sulfates (tableau 11) et les nitrates (tableau 12) en se servant de l'équation (1).

Le tableau 19 présente le bilan ionique de l'ensemble de la fonte, de décembre 1983 au 20 mai 1984.

5.3.2 Evaluation des flux ioniques dans le ruisseau hypodermique

L'évaluation des charges ioniques véhiculées par le ruisseau hypodermique s'est avérée être beaucoup plus problématique que les calculs précédents. Les concentrations en divers ions dans les eaux de ruissellement hypodermique ont été mesurées du 18 avril au 24 mai, de même que les débits de ce ruisseau pour une partie de cette période (tableau 15).

Comme il a été mentionné précédemment (section 5.2), les eaux de ruissellement hypodermique proviendraient en bonne partie de l'écoulement restitué de la nappe phréatique affleurant le sol et aussi d'eaux de fonte non-infiltrées ou ayant percolé seulement au travers des couches superficielles du sol. Il s'avère donc particulièrement difficile d'établir la lame d'eau ayant produit le ruissellement hypodermique observé par nappe interposée (les eaux de cette dernière étant la composante majeure du ruissellement). Le débit d'eau de ruissellement mesuré peut provenir, en effet, à une extrême, de la presque totalité de la lame de fonte sur une petite partie de la superficie du bassin ou, à l'autre extrême, d'une petite partie de la lame de fonte s'écoulant sur une grande surface du bassin.

5.3.2.1 Estimation des charges ioniques maximales pouvant être apportées par le ruisseau hypodermique

Nous pouvons déjà, cependant, déterminer des limites des paramètres que nous avons à estimer. La lame d'eau ruissellée maximum ($H_{rh \max}$) ne peut dépasser l'équivalence en eau de la fonte du couvert de neige, soit 594 mm (tableau 19). La surface maximale de fonte contribuant au ruissellement ne peut pas être plus grande qu'environ le sixième de la superficie du bassin versant sans le lac ($6,23 \times 10^5 \text{ m}^2/6 = 1,04 \times 10^5 \text{ m}^2$). La surface moyenne minimale de fonte contribuant au ruissellement ($S_{rh \min}$) est, pour une période donnée (18 avril-20 mai 1984), celle où toute la lame d'eau de fonte ($H_{rh \text{ tot}}$) (tableau 14) contribuerait au ruissellement total observé durant cette période ($Q_{rh \text{ tot}}$) (tableau 15), soit:

$$S_{rh \min} = \frac{Q_{rh \text{ tot}}}{H_{rh \text{ tot}}} = \frac{3,83 \times 10^5 \text{ l}}{472 \text{ mm}} = 810 \text{ m}^2 \quad (6)$$

La lame minimale d'eau de fonte alimentant le ruissellement ($H_{rh \min}$) serait le cas, tout à fait improbable, où une partie de la lame d'eau de fonte sur, approximativement, le sixième de la surface du bassin au maximum, contribue au ruissellement total observé, soit:

$$H_{rh \min} = \frac{Q_{rh \text{ tot}}}{S_{\text{bassin}}/6} = \frac{5,99 \times 10^5 \text{ l}}{6,23 \times 10^5 \text{ m}^2/6} = 6 \text{ mm} \quad (7)$$

Nous pouvons retrouver, au tableau 20, les valeurs limites des paramètres S_{rh} et H_{rh} .

Connaissant la lame d'eau de fonte maximale pouvant contribuer au ruissellement (tableau 20) et les concentrations moyennes pondérées en ions chlorures, sulfates et nitrates dans les eaux de ruissellement (tableau 15), nous pouvons alors calculer les charges maximales en ces ions qu'a pu transporter le ruisseau (tableau 21), avec l'équation (1). Ayant estimé, en quelque sorte, les limites possibles des charges ioniques véhiculées par le ruisseau hypodermique, nous tenterons maintenant d'établir des estimés plus définis de ces charges selon deux méthodes présentées aux sections suivantes.

5.3.2.2 Première méthode d'estimation des charges ioniques dans le ruisseau hypodermique: méthode du bilan net en chlorures nul

Comme il peut être observé à la figure 4, les concentrations en chlorures mesurées entre les 18 avril et 20 mai 1984 sont, à tous les jours, systématiquement plus élevées dans les eaux de ruissellement hypodermique que dans les eaux de fonte. Cependant, les ions chlorures peuvent être pratiquement considérés comme conservatifs dans le milieu (voir section 5.3.1.2) et ne seraient pas ainsi adsorbés de façon irréversible dans les sols (voir également Skartveit et Gjessing, 1979; Overrein et al., 1980; Gjessing et al., 1976). Les différences de concentrations observées ne seraient donc pas dues à une source de chlorures dans le système. Ce décalage serait plutôt attribuable aux phénomènes d'adsorption-désorption se produisant au niveau du sol, ce dernier se comportant comme une colonne à chromatographie vis-à-vis des ions chlorures. Il y aurait donc eu une rétention des charges en chlorures des premières eaux de fonte plus concentrées (avant le 18

avril) (figure 4), suivie d'un relâchement progressif de ces anions par le passage dans le sol des eaux moins concentrées libérées par la fonte massive. Cette hypothèse est d'autant plus vraisemblable que les concentrations moyennes pondérées en chlorures de l'ensemble de toutes les eaux de fonte (9 février au 20 mai 1984) et des eaux de ruissellement hypodermique (18 avril au 24 mai 1984) sont très semblables (tableau 22).

Nous n'avons pu tenir compte des toutes premières eaux de ruissellement (quelques jours avant le 18 avril) ni dans le calcul du débit total ruisselé par le ruisseau ($Q_{rh \text{ tot}}$), ni dans celui de la concentration moyenne pondérée des chlorures dans le ruisseau. Cependant, les données sur ce type de ruissellement recueillies au moment de la fonte printanière lors d'une autre année nous permettent de constater que, relativement à ce qui se passe lors de la majeure partie du ruissellement, ses premières eaux sont un peu plus concentrées, mais leurs débits peu importants face à l'ensemble. Les charges ioniques impliquées dans le ruissellement avant le 18 avril 1984 sont donc négligeables en regard à ce qui a été mesuré.

Il semble donc que la circulation, dans le milieu, de l'eau provenant de la fonte du couvert de neige n'influence pas de façon appréciable les quantités globales de chlorures en ce sens que le sol peut ralentir la circulation de ces ions, mais ne peut pas l'empêcher sur une période assez longue. Tout ce qui a été dit précédemment nous permet alors de supposer que toute la charge en chlorures transportée par les eaux de ruissellement hypodermique proviendrait de la fonte de

l'ensemble du couvert de neige. De ceci, on peut déduire que la concentration moyenne en chlorures des eaux du ruisseau provient de toute la charge en chlorures impliquée dans l'ensemble de la fonte du couvert de neige apportées par une lame d'eau (H_{rh}) qui est déterminée selon l'équation (8):

$$H_{rh} = \frac{L(Cl^-)_{F \text{ tot}}}{[Cl^-]_{rh \text{ moy}}} \quad (8)$$

où:

$L(Cl^-)_{F \text{ tot}}$: charge en chlorures impliquée dans la totalité de la fonte du couvert de neige;

$[Cl^-]_{rh \text{ moy}}$: concentration moyenne en chlorures des eaux du ruisseau.

Donc:

$$H_{rh} = \frac{3,6 \pm 2,4 \text{ még/m}^2}{6,6 \text{ uég/l}} = (5,5 \pm 3,6) \times 10^2 \text{ mm}$$

Ayant donc estimé la lame d'eau de fonte ayant contribué au ruissellement et connaissant les concentrations moyennes en sulfates et nitrates dans le ruisseau (tableau 15), nous avons pu évaluer les charges en ces deux ions dans les eaux de ruissellement hypodermique (tableau 23). De même, nous pouvons estimer la surface de fonte ($S_{rh \text{ moy}}$) correspondant à la lame de fonte calculée ($H_{rh \text{ moy}}$):

$$S_{rh \text{ moy}} = \frac{Q_{rh \text{ tot}}}{H_{rh}} \quad (9)$$

$$S_{rh \text{ moy}} = \frac{5,99 \times 10^5 \text{ l}}{(5,5 \pm 3,6) \times 10^2 \text{ mm}} = (1,1 \pm 0,7) \times 10^3 \text{ m}^2$$

Une telle valeur pour $S_{rh \text{ moy}}$ entre bien dans le domaine des valeurs acceptables pour ce paramètre et renforce la crédibilité de cette évaluation.

5.3.2.3 Deuxième méthode d'estimation des charges ioniques dans le ruisseau hypodermique: méthode du bilan hydrologique du bassin

Considérons que la lame moyenne d'eau de fonte ayant produit le ruissellement hypodermique observé est similaire à la lame d'eau moyenne exportée par l'ensemble du bassin durant la période de fonte massive, soit du 6 avril au 24 mai 1984. On a alors:

$$H_{rh \text{ moy}} = H_{\text{exports bassin}} = \frac{Q_{\text{exports}}}{S_{\text{bassin}}} \quad (10)$$

où:

$H_{rh \text{ moy}}$: lame moyenne d'eau de fonte produisant le ruissellement hypodermique mesuré;

$H_{\text{exports bassin}}$: lame d'eau moyenne exportée par l'ensemble du bassin du 6 avril au 24 mai 1984;

S_{bassin} : surface totale du bassin versant du lac Laflamme;

Q_{exports} : volume des exports d'eau (de surface et souterraines) par le bassin entre le 6 avril et le 24 mai 1984.

On doit noter que, ainsi défini, $H_{rh \text{ moy}}$ tend à être surestimé étant donné qu'une portion peut-être non négligeable de l'eau qui sort du bassin versant n'a pas ruisselé et provient d'eaux de fonte générant un écoulement souterrain alimentant directement le lac ou quittant le bassin sans revenir ruisseler en surface. En considérant comme négligeable l'évaporation de la neige sur l'ensemble du bassin et du lac (ce qui aurait tendance à sous-estimer $H_{rh \text{ moy}}$), on a, de plus:

$$Q_{\text{exports}} = Q_{\text{ex tot}} + Q_{\text{ex sout}} \quad (11)$$

où:

$Q_{\text{ex tot}}$: volume total d'eau évacué par l'exutoire du 6 avril au 24 mai 1984;

$Q_{\text{ex sout}}$: volume total d'eau évacué du bassin par voie souterraine du 6 avril au 24 mai 1984.

Sur le bassin du lac Laflamme, il a été établi (Papineau, 1984), sur une base annuelle, que les exports d'eau par voie souterraine représentent 12% des exports de surface pour chacune des deux périodes juin 81-mai 82 et juin 82-mai 83. Si nous considérons cette observation comme un estimé aussi valable pour la sous-période de la fonte printanière de 1984, nous obtenons alors:

$$Q_{\text{ex sout}} = 12\% \cdot Q_{\text{ex tot}} \quad (12)$$

ce qui donne, substitué dans l'équation (11):

$$Q_{\text{exports}} = Q_{\text{ex tot}} + (12\% \cdot Q_{\text{ex tot}}) = 1,12 \cdot Q_{\text{ex tot}} \quad (13)$$

et donc, aussi, dans (10):

$$H_{rh \text{ moy}} = \frac{1,12 \cdot Q_{ex \text{ tot}}}{S_{bassin}} \quad (14)$$

ce qui donne:

$$H_{rh \text{ moy}} = \frac{1,12 \cdot (1,80 \times 10^8 \text{ l})}{6,84 \times 10^5 \text{ m}^2} = 295 \text{ mm}$$

La surface moyenne de fonte ayant contribué au ruissellement correspondante serait alors:

$$S_{rh \text{ moy}} = \frac{Q_{rh \text{ tot}}}{H_{rh \text{ moy}}} \quad (15)$$

$$S_{rh \text{ moy}} = \frac{5,99 \times 10^5 \text{ l}}{295 \text{ mm}} = 2,03 \times 10^3 \text{ m}^2$$

Les charges ioniques correspondant à la lame d'eau de ruissellement estimée selon cette méthode sont présentées au tableau 24.

5.3.3 Bilan global des flux (eaux de fonte et ruisseau hypodermique)

Les flux de chlorures, sulfates et nitrates apportés par la fonte du couvert de neige ainsi que par le ruissellement hypodermique sont rapportés au tableau 25. Bien qu'entachés d'une bonne imprécision, ces résultats sont bien dans le même ordre de grandeur lorsque comparés à d'autres mesures faites sur le bassin versant du lac Laflamme (Papineau, 1984). On y rapporte ainsi pour 1981 des apports atmosphériques annuels,

par précipitations humides seulement, de 0,8 kg de chlorures/ha, 19 kg de sulfates/ha et 2,7 kg d'azote-nitrates/ha et, pour 1982, 2,2 kg de chlorures/ha, 20,7 kg de sulfates/ha et 3,3 kg d'azote-nitrates/ha. Une bonne partie de ces apports annuels se retrouve en effet dans le couvert de neige et les charges correspondantes sont transférées, par la suite, dans les eaux de fonte.

Le flux de chlorures dans les eaux de ruissellement hypodermique estimé par la méthode du bilan hydrologique du bassin entre dans l'intervalle des valeurs inférieures possibles que peut prendre le flux de chlorures estimé dans les eaux de fonte. Bien que l'imprécision soit élevée sur ce dernier estimé, l'hypothèse que ces deux flux sont égaux, employée dans la première méthode (méthode du bilan net en chlorures nul), est en accord avec ce résultat.

Les flux de sulfates et de nitrates mesurés (tableau 25) laissent croire qu'il serait possible qu'une partie des sulfates et, même, des nitrates provienne d'autres sources que la fonte du couvert de neige simplement. Cependant, ces sources seraient différentes pour ces deux anions (sol et nappe phréatique pour les sulfates; couche superficielle du sol pour les nitrates).

Les sulfates, ainsi, sont considérés comme ayant un caractère plutôt conservatif, bien que cela dépende des conditions du milieu (Johannessen et al., 1980). Cependant, ces ions sont aussi reconnus pour être facilement adsorbés par certains sols (Fuller et al., 1985; Johnson et Todd, 1983; Singh et al., 1980; Wiklander, 1980; Rajan, 1978;

Johnson et Cole, 1977; Harward et Reisenauer, 1966) et, particulièrement, celui qu'on rencontre sur le bassin versant du lac Laflamme (podzol ferro-humique orthique) ferait partie de cette catégorie (Papineau, 1984; Hay et al., 1985). Faisant contre-partie à cette bonne adsorptivité, au moins une partie des anions sulfates seraient d'autre part assez facilement désorbés de ces types de sols par de l'eau possédant des concentrations faibles en ces ions (Fuller et al., 1985; Wiklander, 1980; Johnson et Henderson, 1979; Khanna et Beese, 1978).

Nous devons encore souligner deux faits observés à propos des sulfates lors de la fonte printanière. D'abord, les concentrations en cet anion mesurées dans le ruisseau hypodermique entre le 18 avril et le 24 mai laissent supposer un rôle important du compartiment du système hydrologique "sol-eaux souterraines" comme réservoir de stockage des sulfates. En effet, les sulfates observés dans le ruissellement de surface lors de cette période (figure 5) ne peuvent provenir directement du couvert de neige si nous nous fions aux concentrations mesurées dans l'eau de fonte, mais proviendraient plutôt du compartiment hydrologique précité sans, cependant, que nous puissions distinguer les influences respectives du sol et des eaux souterraines.

Il faut remarquer ensuite que, malgré l'imprécision de l'évaluation, il ne serait donc pas impossible qu'une partie non négligeable des sulfates du ruissellement hypodermique puisse provenir d'autres sources que la fonte (tableau 25) comme, éventuellement, de précipitations avant décembre 1983, dont une part des charges en

sulfates aurait été emmagasinée dans le sol ou la nappe phréatique jusqu'à la fonte de 1984, ou encore du sous-sol, bien que les précipitations soient considérées, au lac Laflamme entre autres, comme la source principale d'ions sulfates (Caron, 1985).

Les ions nitrates retrouvés dans les eaux de ruissellement hypodermique auraient plus plausiblement une origine différente de celle des sulfates. En effet, et les eaux souterraines, et les eaux de fonte contiennent des charges moins élevées en cet anion que les eaux de ruissellement hypodermique. Nous pouvons alors en déduire que c'est la circulation de ces eaux au travers des couches superficielles du sol à fortes teneurs en matière organique, qui provoque une mise en solution de nitrates libérés par cette matière organique (Hay et al., 1985; Klein et al., 1983; Cronan, 1980). Cette hypothèse est en accord avec l'évolution temporelle de la concentration en nitrates observée dans le ruissellement hypodermique (figure 6). En effet, ce phénomène de prise en charge des nitrates dépend de la température du milieu et du temps de contact avec la litière forestière. Les nitrates sont des nutriments de première importance pour les organismes du milieu. Une hausse de la température entraîne alors une recrudescence du métabolisme des êtres vivants et donc une prise en charge plus grande par ceux-ci de ces anions présents dans les eaux superficielles.

Ce phénomène se manifeste ainsi globalement par une diminution graduelle des concentrations de nitrates dans le temps (figure 6) due au réchauffement printanier progressif de l'air. Nous pouvons de même remarquer que la période plus froide du 2 au 6 mai 1984 correspond à une

augmentation des concentrations de nitrates des eaux de ruissellement hypodermique qui pourrait, en plus, être attribué au fait que, le débit du ruissellement diminuant à cause du ralentissement de la fonte, le temps de contact de l'eau avec la litière forestière augmente. De plus, les averses de pluie des 1, 9, 12 et 13 mai, occasionne des hausses de débit du ruisseau, ce qui fait donc diminuer le temps de contact des eaux de ruissellement avec le sol. Ces jours d'averses correspondent ainsi à des baisses de ces mêmes concentrations.

Lorsque nous examinons l'évolution temporelle des concentrations en chlorures (figure 4), sulfates (figure 5), nitrates (figure 6) et même en ions hydrogène (figure 8) des eaux de fonte, de ruissellement hypodermique et souterraines, nous constatons que durant la période du 26 au 30 avril, des changements notables se produisent dans ces concentrations.

A partir de cette époque et jusqu'à la fin de la fonte, les concentrations, auparavant plus élevées dans les eaux souterraines que dans les eaux de ruissellement, deviennent presque égales dans ces deux compartiments hydrologiques pour ce qui est des chlorures et des sulfates. Les concentrations en chlorures et sulfates des eaux de fonte demeurent, pendant ce temps, bien inférieures à celles des eaux souterraines et de ruissellement. A partir du 26-30 avril, de même, les eaux souterraines et les eaux de fonte ont sensiblement les mêmes concentrations en nitrates, concentrations bien inférieures à celles des eaux de ruissellement par ailleurs, alors que les nitrates étaient quasi absents des eaux souterraines avant ces dates. Aux alentours du 26

avril, aussi, les eaux de ruissellement deviennent un peu plus acides que les eaux de fonte à la même époque, alors que les eaux souterraines deviennent rapidement acidifiées et plus chargées en ions hydrogène que les eaux de fonte et de ruissellement.

Ces changements importants surviennent au moment où la nappe phréatique, du moins dans le puits A, rechargée par les eaux de fonte, s'élève, aux alentours des 26-30 avril, jusqu'à un niveau tout près de la surface du sol (environ 15 cm sous la surface)(tableau 16). Le niveau supérieur de la nappe se trouve à ce moment dans l'horizon Ae (Hay et al., 1985) qui possède un pH un peu plus bas que celui de l'horizon inférieur Bhf1. Ceci expliquerait le fait que les eaux du puits A deviennent alors plus acides et un peu plus chargées en nitrates étant donné qu'il a été observé (Hay et al., 1985) qu'une hausse d'acidité favorise une mise en solution des substances azotées dans le type de sol podzologique présent à la forêt Montmorency.

Le niveau d'environ 15 cm sous la surface qu'atteint la nappe au puits A, semble être le maximum qu'elle puisse atteindre (le maximum observé est plus précisément de 10 cm, tableau 16), étant donné qu'un peu plus bas sur la pente, la nappe doit affleurer la surface pour provoquer le ruissellement hypodermique observé (par écoulement restitué). L'eau souterraine, pour ruisseller, doit alors circuler au travers de l'horizon superficiel LFH du sol à teneurs plus élevées en matière organique et en azote que les horizons minéraux inférieurs. Ceci expliquerait les concentrations constamment élevées en nitrates des eaux de ruissellement qui seraient dues au lessivage, de même que leurs

concentrations stables en ions hydrogène, autant avant, qu'après le 28 avril, à cause de l'effet tampon plus élevé de l'horizon LFH du sol où ont lieu particulièrement la solubilisation d'acides organiques et l'échange de cations basiques, deux phénomènes qui abaissent le pH (Hay et al., 1985).

L'affleurement de la nappe à la fin d'avril sur le site étudié est aussi visible par les concentrations en chlorures très voisines des eaux souterraines et de ruissellement après cette date (figure 4), étant donné que le passage des eaux souterraines au travers de l'horizon organique du sol n'a pas d'influence sur la quantité de chlorures. Ceci est d'ailleurs presque aussi vrai pour les sulfates (figure 5). En effet, les concentrations en sulfates des eaux de ruissellement un peu plus faibles, relativement aux chlorures, que celles des eaux souterraines, trahissent probablement le fait que les sulfates ne sont pas aussi "inertes" que les chlorures et qu'une petite partie de ces sulfates peut être absorbée, en surface, par les végétaux et microorganismes.

Nous devons finalement constater que l'élévation de la nappe est un facteur déterminant pour la quantité et la qualité du ruissellement printanier sur le bassin du lac Laflamme, bien que le pouvoir adsorbant des sols (vis-à-vis des sulfates) et la présence de matière organique et d'organismes vivants (pour les nitrates et les ions hydrogène) soient aussi des facteurs spécifiques importants. Les trois anions, chlorure, sulfate et nitrate, ont donc des comportements différents qui peuvent être visualisés par les flux que nous avons estimés durant les trois étapes de la fonte que nous avons identifiées, soient la fonte hivernale

du 9 au 16 février, les pré-fontes et le début de la fonte massive du 3 mars au 28 avril et la fin de la fonte massive du 28 avril au 20 mai (figure 9). La représentation des flux de la figure 9 ne doit pas être prise cependant trop rigoureusement, mais plutôt à titre indicatif, étant donné que plusieurs données sont, soit manquantes, soit trop imprécises. Elle permet, néanmoins, de constater le rôle du niveau de la nappe phréatique lors des trois phases de fonte et de mettre en évidence certains phénomènes comme l'accumulation, le relâchement, la production ou la consommation de certains ions.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

6. CONCLUSIONS

Les ions chlorures, sulfates et nitrates adoptent des comportements chimiques différents sur le bassin versant du lac Laflamme. Le compartiment "eaux souterraines-sol" joue un rôle de première importance en ce qui a trait aux quantités de sulfates présentes dans le ruissellement hypodermique intermittent, alors que l'apport des couches superficielles du sol contenant des organismes vivants et de la matière organique est déterminant pour les nitrates présents dans ces mêmes eaux de ruissellement.

Les ions chlorures relâchés par la fonte du couvert de neige se retrouvent, eux, à peu près en même quantité dans l'eau de ruissellement hypodermique sans que le sol ou la nappe phréatique n'ait joué d'autres rôles que celui de réservoir transitoire. Les chlorures et les sulfates libérés par les premières eaux de fonte auraient donc été emmagasinés pratiquement sans subir de transformations dans le sol, la nappe phréatique ou ces deux sites avant d'être relâchés, plus tard, graduellement, lors de la fonte massive, par l'intermédiaire de ruisseaux hypodermiques. L'examen comparatif des charges en sulfates libérées par la fonte du couvert de neige et celles transportées par le ruisseau hypodermique ne nous permet pas d'exclure la possibilité qu'une partie des sulfates observés dans le ruissellement hypodermique étudié puisse originer, même, de quantités de ces ions accumulées avant la période de fonte printanière de 1984. Il serait possible, par exemple, qu'une partie de la charge en sulfates des pluies de l'automne 1983 ait été adsorbée dans le sol et lessivée par les eaux peu concentrées

libérées par le couvert de neige vers la fin de la période de fonte printanière.

Nous pouvons enfin constater que l'accumulation des charges ioniques, libérées lors de la fonte du couvert de neige, dans le compartiment "sol-eaux souterraines" ou le relâchement de ces charges ioniques dans le ruissellement hypodermique, dépend largement du niveau auquel se trouve la nappe dans le sol. En effet, le niveau de la nappe détermine non seulement la quantité d'écoulement restitué, formant une partie importante du ruissellement, mais aussi la qualité chimique de ces eaux, dépendant du temps de contact de l'eau avec des strates particulières du sol.

En vue de compléter le présent travail, il serait bon de refaire sensiblement ce même type d'étude sur le site du lac Laflamme lors de périodes de fonte printanière durant d'autres années de façon à vérifier si les observations faites en 1984 se répètent à chaque année ou sont caractéristiques d'une ou de certaines années particulièrement. Il faudrait alors s'assurer que même les toutes premières eaux de fonte et de ruissellement soient échantillonnées à une fréquence convenable (idéalement quotidiennement). L'échantillonnage de plusieurs puits permettrait d'avoir une meilleure idée de l'ensemble de la nappe phréatique, de même que l'échantillonnage d'autres ruisseaux permettrait de généraliser, de façon plus sûre, à tout le ruissellement, les observations faites. Enfin, parallèlement à toutes les mesures précédentes recommandées, nous suggérons l'installation, sur le site d'étude, de lysimètres, enfouis dans le sol, qui recueilleraient

les eaux percolant au travers des différentes strates. L'examen de la qualité chimique des eaux provenant de la percolation des eaux de fonte permettrait de mettre en lumière l'influence exacte du sol sur ces dernières et, par le fait même, de clarifier le rôle de la nappe phréatique qui génère ce ruissellement de surface printanier.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- AZZARIA, L.M., P.J. GELINAS, R. ROBITAILLE, J.F. WILHELMY. (1982). Etude géologique et hydrogéologique du lac Laflamme, Parc des Laurentides, Québec. Université Laval, Département de géologie. Rapport rédigé pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région du Québec, 238 p.
- CARON, F. (1985). Evaluation, à l'aide des mesures des rapports des isotopes stables du soufre et de l'oxygène, de la proportion des sulfates mesurés dans les lacs attribuable aux dépôts atmosphériques. Mémoire de maîtrise, INRS, Université du Québec, 104 p.
- CHARETTE, J.Y., D. LAFLAMME et G. ROBITAILLE. (1983). Modification de la qualité des eaux de surface au lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec, au cours de la fonte printanière de 1982. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région du Québec, 48 p.
- CNRC. (1981). Acidification dans l'environnement aquatique au Canada: Critères scientifiques pour évaluer les effets du dépôt acide sur les écosystèmes aquatiques. Publication du CNRC no 18476, 377 p.
- CRONAN, C.S. (1980). Controls on leaching from coniferous forest floor microcosms. *Plant and Soil*, 56: 301-322.

- DELMAS, V. et H.G. JONES. (1985). Evaluation d'une méthodologie pour la détermination du taux de sédimentation de dépôt sec des polluants acides sur le couvert de neige à la station CAPMOH, forêt Montmorency, Québec. INRS-Eau, Rapport scientifique no 183, Sainte-Foy (Québec), 86 p.
- DILLON, P.J., D.S. JEFFRIES, W. SNYDER, R. REID, N.D. YAN, D. EVANS, J. MOSS et W.A. SCHEIDER. (1978). Acidic precipitation in south-central Ontario: recent observations. J. Fish. Res. Board Can., 35: 809-815.
- EPA. (1979). Methods for chemical analysis of water & waste. United States Environmental Protection Agency, Research and Development report, EPA-600/4-79-020.
- FREEZE, R.A. (1972). Role of subsurface flow in generating surface runoff. 2. Upstream source areas. Water Resour. Res., 8(5): 1272-1283.
- FULLER, R.D., M.B. DAVID et C.T. DRISCOLL. (1985). Sulfate adsorption relationships in forested spodosols of the northeastern USA. Soil Sci. Soc. Am. J., 49: 1034- 1040.
- GJESSING, E.T., A. HENRIKSEN, M. JOHANNESSEN et R.F. WRIGHT. (1976). Effects of acid precipitation on freshwater chemistry. Dans: Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway. Ed. F.H. Braekke. SNSF-Project Fr 6/76, p. 65-85.
- HARWARD M.E. et H.M. REISENAUER. (1966). Reactions and movement of inorganic soil sulfur. Soil Science, 101(4): 326-335.

HAY, G.W., J.H. JAMES et G.W. VANLOON. (1985). Solubilization effects of simulated acid rain on the organic matter of forest soil; preliminary results. *Soil Sci.*, 139(5): 422-430.

JOHANNESSEN, M., T. DALE, A. GJESSING, A. HENRIKSEN et R.F. WRIGHT. (1977). Acid precipitation in Norway: the regional distribution of contaminants in snow and the chemical concentration processes during snowmelt. *Proc. isotopes and impurities in snow and ice symposium, Grenoble, 1975. Int. Ass. Hydrol. Sci. Publ.* 118: 116-120.

JOHANNESSEN, M., A. HENRIKSEN. (1978). Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resour. Res.*, 14(4):615-619.

JOHANNESSEN, M., A. SKARTVEIT et R.F. WRIGHT. (1980). Streamwater chemistry before, during and after snowmelt. *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip., Norway 1980, SNSF project*, p. 224-225.

JOHNSON, D.W., D.W. COLE. (1977). Sulfate mobility in an outwash soil in Western Washington. *Water, Air and Soil Poll.*, 7: 489-495.

JOHNSON, D.W. et G.S. HENDERSON. (1979). Sulfate adsorption and sulfur fractions in a highly weathered soil under a mixed deciduous forest. *Soil Sci.*, 128(1): 34-40.

JOHNSON, D.W. et D.E. TODD. (1983). Relationships among iron, aluminium, carbon and sulfate in a variety of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 792-800.

JONES, H.G. et W. SOCHANSKA. (1985). The chemical characteristics of snow cover in a northern boreal forest during the spring run-off period. *Annals of Glaciology*, 7: 167-174.

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 d'Environnement Canada).

JONES, H.G., W. SOCHANSKA, J.M. GAUTHIER, R. BOUGIE, J.Y. CHARETTE. (1984a). 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. Etude effectuée pour Environnement Canada, Département des eaux intérieures. INRS-Eau, rapport scientifique no 165,, 145 p., 7 annexes.

JONES, H.G., W. SOCHANSKA, J.M. GAUTHIER, J.Y. CHARETTE. (1984b). The physical and chemical evolution of snowpack structure, meltwater flow patterns and surface runoff during the springmelt period in a northern boreal forest. *Canadian Hydrology Symposium*, Université Laval, Sainte-Foy (Québec), 10-12 juin 1984.

KHANNA, P.K. et F. BEESE. (1978). The behavior of sulfate on salt input in podzolic brown earth. *Soil Sci.*, 125(1): 16-21.

- KLEIN, T.M., J.P. KREITINGER et M. ALEXANDER. (1983). Nitrate formation in acid forest soils from the Adirondacks. Soil Sci. Soc. Am. J., 47: 506-508.
- LEIVESTAD, H., I.P. MUNIZ. (1976). Fish kill at low pH in a Norwegian river. Nature, 259: 391-392.
- MARMOREK, D.R., G. CUNNINGHAM, M.L. JONES, P. BUNNELL. (1984). Snowmelt effects related to acidic precipitation: a structured review of existing knowledge and current research activities. ESSA report for Environment Canada and Department of Fisheries and Oceans, 80 p.
- OVERREIN, L.N., H.M. SEIP, A. TOLLAN. (1980). Acid precipitation - effects on forest and fish. Final report SNSF-Project 1972-1980, Oslo, 175 p.
- PADILLA F., P. BERNIER, P.J. GELINAS, L.M. AZZARIA, S. GOULET. (1983). Programme des pluies acides: Observations hydrogéologiques et géochimiques des eaux souterraines du lac Laflamme durant la fonte de 1983. Université Laval, Département de géologie. Rapport rédigé pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région du Québec, 141 p.
- PAPINEAU, M. (1983). Le bassin du lac Laflamme: caractérisation physico-chimique du lac et établissement du bilan ionique en relation avec le transport à grande distance des polluants atmosphériques. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région du Québec, 18 p.

- PAPINEAU, M. (1984). Composition chimique et bilan ionique du lac Laflamme (forêt Montmorency, Québec). Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région du Québec. 90 p.
- PLAMONDON, A. (1981). Etude hydrologique du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec, en relation avec le programme d'étude d'impact des pluies acides sur l'environnement forestier. Université Laval, Faculté de foresterie et de géodésie, Département d'aménagement et de sylviculture et Centre de recherches sur l'eau, Rapport rédigé pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Région du Québec, 237 p.
- PLAMONDON, A. (1982). La précipitation moyenne sur le bassin du lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec. Université Laval, Faculté de foresterie et de géodésie, Département d'aménagement et de sylviculture et Centre de recherches sur l'eau, Rapport rédigé pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec, 28 p.
- PRICE, A.C. et L.K. HENDRIE.(1983). Water motion in a deciduous forest during snowmelt. J. Hydrol., 64: 339-356.
- PRUPPACHER, H,R,, R.G. SEMONIN et W.G.N. SLINN. (1983). Precipitation scavenging, dry deposition, and resuspension. Volume 2. Dry deposition and resuspension. Proc. of the Fourth International Conference, Santa Monica, California, 29 November-3 December, 1982. Elsevier Science Publishing Co., New York, 1462 p.

- RAJAN, S.S.S. (1978). Sulfate adsorbed on hydrous alumina, ligands displaced, and changes in surface charge. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 39-44
- SEIP, H.M., G. ABRAHAMSEN, N. CHRISTOPHERSEN, E.T. GJESSING et A.O. STUANES. (1980). Snow and meltwater chemistry in mini-catchments. SNSF-Project 1432 As, Res. Rep. IR 53/80, Oslo, Norway, 51 pp.
- SINGH, B.R., G. ABRAHAMSEN, A. STUANES. (1980). Effect of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 75-80.
- SKARTVEIT, A., Y.T. GJESSING. (1979). Chemical budgets and chemical quality of snow and runoff during spring snowmelt. *Nordic Hydrology*, 10(2/3): 141-154.
- SKLASH, M.G., R.N. FARVOLDEN. (1979). The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, 43: 45-65.
- WIKLANDER, L. (1975). The role of neutral salts in the ion exchange between acid precipitation and soil. *Geoderma*, 14: 93-105.
- WIKLANDER, L. (1980). Interaction between cations and anions influencing adsorption and leaching. dans T.C. Hutchinson et M. Havas (éds), *Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems*, Plenum Press, New York, 654 p.

ANNEXE A

TABLEAUX

Tableau 1: Liste des échantillons prélevés.

Type d'échantillon	Station	Nombre d'échantillons
Précipitations humides (pluie et neige)	2 collecteurs Sangamo	16
Couvert de neige	3 stations et 2 lignes de neige	6
Eaux de fonte	3 lysimètres (L1, L2 et L3)	61
Eaux hypodermiques	Station de jaugeage	31
Eaux souterraines	Puits A	31
TOTAL		145

Tableau 2: Concentrations et charges en chlorures des précipitations du 13 avril au 24 mai 1984 (H_{eau} : équivalence en eau des précipitations).

Période	H_{eau} (mm)	Concentration ($\mu\text{eq/l}$)			Charge ($\mu\text{eq/m}^2$)
		San A	San B	SanA+B ou moy	
13/04-18/04	23,6	6,8	3,1	5,0	117
18/04-1/05	13,6	14,1	7,3	10,7	146
1/05-6/05	11,3	2,3	2,5	2,4	27
6/05-9/05	25,4	3,4	6,5	5,0	126
9/05-13/05	28,2	4,8	3,4	4,1	116
13/05-15/05	0,0	ND	ND	ND	0
15/05-16/05	0,6	ND	ND	39,2	24
16/05-20/05	6,7	ND	ND	13,8	92
20/05-23/05	43,3	6,2	5,6	5,9	255
23/05-24/05	0,5	2,5	2,3	2,4	1
Somme	153				903
Concentration moyenne pondérée:				5,9	
ND: valeur non déterminée					

Tableau 3: Concentrations et charges en sulfates des précipitations du 13 avril au 24 mai 1984 (H_{eau} : équivalence en eau des précipitations).

Période	H_{eau} (mm)	Concentration ($\mu\text{eq/l}$)			Charge ($\mu\text{eq/m}^2$)
		San A	San B	SanA+B ou moy	
13/04-18/04	23,6	13,3	9,8	11,6	273
18/04-1/05	13,6	52,3	48,6	50,5	686
1/05-6/05	11,3	11,4	11,4	11,4	129
6/05-9/05	25,4	28,4	33,6	31,0	787
9/05-13/05	28,2	65,4	64,9	65,2	1837
13/05-15/05	0,0	ND	ND	ND	0
15/05-16/05	0,6	ND	ND	23,7	14
16/05-20/05	6,7	ND	ND	19,1	128
20/05-23/05	43,3	94,0	85,9	90,0	3895
23/05-24/05	0,5	31,5	35,7	33,6	17
Somme	153				7766
Concentration moyenne pondérée:				51	
ND: valeur non déterminée					

Tableau 4: Concentrations et charges en nitrates des précipitations du 13 avril au 24 mai 1984 (H_{eau} : équivalence en eau des précipitations).

Période	H_{eau} (mm)	Concentration ($\mu\text{eq/l}$)			Charge ($\mu\text{eq/m}^2$)
		San A	San B	SanA+B ou moy	
13/04-18/04	23,6	3,1	3,1	3,1	73
18/04-1/05	13,6	20,5	20,0	20,2	275
1/05-6/05	11,3	5,3	4,8	5,0	57
6/05-9/05	25,4	8,7	9,2	8,9	227
9/05-13/05	28,2	25,0	26,0	25,5	719
13/05-15/05	0,0	ND	ND	ND	0
15/05-16/05	0,6	ND	ND	4,4	3
16/05-20/05	6,7	ND	ND	7,3	49
20/05-23/05	43,3	28,2	28,7	28,4	1232
23/05-24/05	0,5	10,2	11,8	11,0	6
Somme	153				2641
Concentration moyenne pondérée:				17	
ND: valeur non déterminée					

Tableau 5: Concentrations et charges en chlorures, sulfates et nitrates du couvert de neige les 3 mars et 28 avril 1984 (N: nombre d'échantillons; H_{eau}: équivalence en eau du couvert de neige).

Période	Station	H _{eau} (mm)	Concentrations (uég/l)			Charges (még/m ²)		
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
3/03	WE	383	5,6	12,5	11,3	2,14	4,79	4,33
28/04	6	170	3,7	7,9	5,5	0,63	1,34	0,94
28/04	9	350	5,4	9,3	9,0	1,89	3,26	3,15
28/04	11	340	2,8	5,2	9,4	0,95	1,77	3,20
28/04	WE	330	3,4	7,9	9,4	1,12	2,61	3,10
28/04	NS	290	5,4	5,2	7,7	1,57	1,51	2,23
Moyenne (28/04):		296	4,1	7,1	8,2	1,23	2,10	2,52
Écart-type (28/04):		74				0,5	0,8	1,0
Précision (N=5):						50%	47%	49%
Précision (N=1):						112%	105%	110%

Tableau 6: Equivalence en eau de la fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3.

Période	Equivalence en eau (mm)			
	L1	L2	L3	Moyenne
9/02-16/02	35,5	35,0	35,0	35,2
13/04-18/04	66,0	63,0	ND	64,5
18/04-24/04	65,5	62,5	37,0	55,0
25/04	26,0	25,0	14,5	21,8
26/04	18,0	11,5	7,0	12,2
27/04	28,0	25,0	5,0	19,3
28/04	22,0	22,0	19,0	21,0
29/04	ND	31,5	15,5	23,5
30/04	ND	ND	37,0	37,0
1/05	ND	ND	31,5	31,5
2/05	6,0	4,5	0,0	3,5
3/05	0,0	0,0	0,0	0,0
4/05	0,0	6,0	0,0	2,0
5/05	0,0	0,0	0,0	0,0
6/05	ND	3,5	12,5	8,0
7/05	ND	7,0	ND	7,0
8/05	21,0	20,5	19,0	20,2
9/05	35,5	32,5	42,0	36,7
10/05	14,5	14,5	14,5	14,5
11/05	10,0	11,0	10,0	10,3
12/05	40,0	40,0	45,5	41,8
13/05	36,0	22,5	34,5	31,0
14/05	13,0	12,5	12,0	12,5
15/05	9,0	9,0	7,5	8,5
16/05	6,5	6,5	6,5	6,5
16/05-20/05	56,5	54,0	36,0	48,8
Somme (13/04-20/05):				537,2
Somme (28/04-20/05):				343,3

ND: valeur non déterminée

Tableau 7: Résultats d'analyse des échantillons d'eau de fonte (lysimètre 1) (H_{eau} : lame d'eau de fonte).

Période	H_{eau} (mm)	Concentrations (uég/l)			
		Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	H^+
9/02-16/02	35,5	20,6	270	62,9	151
13/04-18/04	66,0	4,8	22,7	10,0	20,0
18/04-24/04	65,5	4,2	18,9	20,0	17,0
25/04	26,0	4,5	18,7	19,4	22,9
26/04	18,0	4,2	20,8	19,4	24,0
27/04	28,0	4,0	14,6	14,5	20,9
28/04	22,0	5,1	11,5	13,1	11,0
29/04	ND	ND	ND	ND	ND
30/04	ND	ND	ND	ND	ND
1/05	ND	ND	ND	ND	ND
2/05	6,0	6,2	25,2	9,0	10,5
3/05	0,0	ND	ND	ND	ND
4/05	0,0	ND	ND	ND	ND
5/05	0,0	ND	ND	ND	ND
6/05	ND	ND	ND	ND	ND
7/05	ND	ND	ND	ND	ND
8/05	21,0	2,0	7,7	4,3	8,3
9/05	35,5	2,8	23,1	5,2	16,2
10/05	14,5	2,0	18,1	3,9	12,3
11/05	10,0	3,1	15,4	6,9	11,5
12/05	40,0	2,0	11,5	7,6	11,8
13/05	36,0	2,3	45,8	14,2	23,4
14/05	13,0	1,4	25,2	9,3	13,2
15/05	9,0	2,0	13,9	6,8	9,6
16/05	6,5	2,5	10,2	4,3	5,5
16/05-20/05	56,5	2,0	6,7	2,6	6,3

ND: valeur non déterminée

Tableau 8: Résultats d'analyse des échantillons d'eau de fonte
(lysimètre 2) (H_{eau}: lame d'eau de fonte).

Période	H _{eau} (mm)	Concentrations (uéq/l)			
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	H ⁺
9/02-16/02	35,0	10,4	87	62,9	93,3
13/04-18/04	63,0	5,1	32,0	23,9	33,1
18/04-24/04	62,5	2,8	20,1	18,7	26,9
25/04	25,0	4,2	18,7	22,6	27,5
26/04	11,5	4,0	18,7	22,6	23,4
27/04	25,0	4,2	18,7	24,2	28,8
28/04	22,0	5,1	16,8	21,6	22,9
29/04	31,5	2,5	11,6	15,5	18,6
30/04	ND	ND	ND	ND	ND
1/05	ND	ND	ND	ND	ND
2/05	4,5	4,5	28,4	12,3	12,9
3/05	0,0	ND	ND	ND	ND
4/05	6,0	4,2	23,4	8,1	15,9
5/05	0,0	ND	ND	ND	ND
6/05	3,5	2,5	20,8	7,6	14,1
7/05	7,0	2,3	11,4	2,1	14,5
8/05	20,5	2,8	12,0	6,8	10,5
9/05	32,5	1,4	17,0	6,1	12,9
10/05	14,5	1,7	15,8	5,2	11,0
11/05	11,0	2,5	14,7	7,3	13,5
12/05	40,0	1,7	10,4	7,6	11,0
13/05	22,5	2,5	47,7	18,1	26,9
14/05	12,5	2,3	30,7	12,3	15,1
15/05	9,0	1,7	14,9	6,5	10,7
16/05	6,5	2,8	9,8	3,5	8,9
16/05-20/05	54,0	2,0	5,6	1,8	6,2

ND: valeur non déterminée

Tableau 9: Résultats d'analyse des échantillons d'eau de fonte
(lysimètre 3) (H_{eau} : lame d'eau de fonte).

Période	H_{eau} (mm)	Concentrations (uég/l)			
		Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	H^+
9/02-16/02	35,0	28,2	368	46,8	158
13/04-18/04	ND	11,6	37,1	16,0	19,5
18/04-24/04	37,0	5,4	23,0	26,9	25,7
25/04	14,5	4,2	18,7	22,6	19,5
26/04	7,0	4,5	12,4	14,5	16,2
27/04	5,0	3,4	6,2	8,1	11,2
28/04	19,0	4,0	6,4	4,7	8,3
29/04	15,5	1,7	5,0	5,0	7,4
30/04	37,0	1,4	6,8	6,3	7,6
1/05	31,5	4,8	21,2	24,7	14,8
2/05	0	ND	ND	ND	ND
3/05	0	ND	ND	ND	ND
4/05	0	ND	ND	ND	ND
5/05	0	ND	ND	ND	ND
6/05	12,5	5,1	36,5	6,1	20,0
7/05	ND	ND	ND	ND	ND
8/05	19,0	2,5	7,0	6,1	7,8
9/05	42,0	3,1	25,5	4,7	15,1
10/05	14,5	2,0	18,1	2,6	11,0
11/05	10,0	2,3	14,7	5,7	9,8
12/05	45,5	2,5	16,2	4,7	11,0
13/05	34,5	2,3	52,5	11,1	30,9
14/05	12,0	2,0	16,4	3,4	8,1
15/05	7,5	2,3	8,5	3,1	5,5
16/05	6,5	7,0	7,0	1,0	4,5
16/05-20/05	36,0	1,4	5,2	0,7	4,3

ND: valeur non déterminée

Tableau 10: Détermination des charges en chlorures des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3.

Jour Julien	Période	Charge en Cl ⁻ (méq/m ²)			
		L1	L2	L3	moy
47	9/02-16/02	0,73	0,36	0,99	0,69
109	13/04-18/04	0,32	0,32	ND	0,32
115	18/04-24/04	0,28	0,18	0,20	0,22
116	25/04	0,12	0,11	0,06	0,10
117	26/04	0,08	0,05	0,03	0,05
118	27/04	0,11	0,11	0,02	0,08
119	28/04	0,11	0,11	0,08	0,10
120	29/04	ND	0,08	0,03	0,06
121	30/04	ND	ND	0,05	0,05
122	1/05	ND	ND	0,15	0,15
123	2/05	0,04	0,02	0,00	0,02
124	3/05	0,00	0,00	0,00	0,00
125	4/05	0,00	0,03	0,00	0,01
126	5/05	0,00	0,00	0,00	0,00
127	6/05	ND	0,01	0,06	0,03
128	7/05	ND	0,02	ND	0,02
129	8/05	0,04	0,06	0,05	0,05
130	9/05	0,10	0,05	0,13	0,09
131	10/05	0,03	0,02	0,03	0,03
132	11/05	0,03	0,03	0,02	0,03
133	12/05	0,08	0,07	0,12	0,09
134	13/05	0,08	0,06	0,08	0,07
135	14/05	0,02	0,03	0,02	0,02
136	15/05	0,02	0,02	0,02	0,02
137	16/05	0,02	0,02	0,05	0,03
141	16/05-20/05	0,11	0,11	0,05	0,09
Somme (28/04 au 20/05):					0,9

ND: valeur non déterminée

Tableau 11: Détermination des charges en sulfates des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3.

Jour julien	Période	Charge en SO_4^{2-} (méq/m ²)			
		L1	L2	L3	moy
47	9/02-16/02	9,6	3,05	12,9	8,52
109	13/04-18/04	1,49	2,01	ND	1,75
115	18/04-24/04	1,23	1,26	1,85	1,11
116	25/04	0,49	0,47	0,27	0,41
117	26/04	0,37	0,21	0,09	0,22
118	27/04	0,41	0,47	0,03	0,30
119	28/04	0,25	0,37	0,12	0,25
120	29/04	ND	0,37	0,08	0,23
121	30/04	ND	ND	0,25	0,25
122	1/05	ND	ND	0,67	0,67
123	2/05	0,15	0,13	0,00	0,09
124	3/05	0,00	0,00	0,00	0,00
125	4/05	0,00	0,14	0,00	0,05
126	5/05	0,00	0,00	0,00	0,00
127	6/05	ND	0,07	0,46	0,27
128	7/05	ND	0,08	ND	0,08
129	8/05	0,16	0,25	0,13	0,18
130	9/05	0,82	0,55	1,07	0,81
131	10/05	0,26	0,23	0,26	0,25
132	11/05	0,15	0,16	0,15	0,15
133	12/05	0,46	0,41	0,74	0,54
134	13/05	1,64	1,07	1,81	1,51
135	14/05	0,33	0,38	0,20	0,30
136	15/05	0,13	0,13	0,06	0,11
137	16/05	0,07	0,06	0,05	0,06
141	16/05-20/05	0,38	0,30	0,19	0,29
Somme (28/04 au 20/05):					5,8

ND: valeur non déterminée

Tableau 12: Détermination des charges en nitrates des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3.

Jour Julien	Période	Charge en NO_3^- (méq/m ²)			
		L1	L2	L3	moy
47	9/02-16/02	2,23	1,39	1,64	1,75
109	13/04-18/04	0,66	1,50	ND	1,08
115	18/04-24/04	1,31	1,17	1,00	1,16
116	25/04	0,50	0,56	0,33	0,46
117	26/04	0,35	0,26	0,10	0,24
118	27/04	0,41	0,60	0,04	0,35
119	28/04	0,29	0,48	0,09	0,29
120	29/04	ND	0,49	0,08	0,28
121	30/04	ND	ND	0,23	0,23
122	1/05	ND	ND	0,78	0,78
123	2/05	0,05	0,06	0,00	0,04
124	3/05	0,00	0,00	0,00	0,00
125	4/05	0,00	0,05	0,00	0,02
126	5/05	0,00	0,00	0,00	0,00
127	6/05	ND	0,03	0,08	0,06
128	7/05	ND	0,01	ND	0,01
129	8/05	0,09	0,14	0,12	0,12
130	9/05	0,18	0,20	0,20	0,19
131	10/05	0,06	0,07	0,04	0,06
132	11/05	0,07	0,08	0,06	0,07
133	12/05	0,30	0,30	0,21	0,27
134	13/05	0,51	0,41	0,38	0,43
135	14/05	0,12	0,15	0,04	0,10
136	15/05	0,06	0,06	0,02	0,05
137	16/05	0,03	0,02	0,01	0,02
141	16/05-20/05	0,15	0,10	0,02	0,09
Somme (28/04 au 20/05):					2,8

ND: valeur non déterminée

Tableau 13: Détermination des charges en ions hydrogène des eaux de fonte dans les lysimètres L1, L2 et L3.

Jour julien	Période	Charge en H ⁺ (még/m ²)			
		L1	L2	L3	moy
47	9/02-16/02	5,37	3,27	5,55	4,73
109	13/04-18/04	1,32	2,09	ND	1,71
115	18/04-24/04	1,11	1,68	0,96	1,25
116	25/04	0,60	0,69	0,28	0,52
117	26/04	0,43	0,27	0,11	0,27
118	27/04	0,58	0,72	0,06	0,45
119	28/04	0,24	0,50	0,16	0,30
120	29/04	ND	0,59	0,11	0,35
121	30/04	ND	ND	0,28	0,28
122	1/05	ND	ND	0,47	0,47
123	2/05	0,06	0,06	0,00	0,04
124	3/05	0,00	0,00	0,00	0,00
125	4/05	0,00	0,10	0,00	0,03
126	5/05	0,00	0,00	0,00	0,00
127	6/05	ND	0,05	0,25	0,15
128	7/05	ND	0,10	ND	0,10
129	8/05	0,17	0,21	0,15	0,18
130	9/05	0,58	0,42	0,64	0,55
131	10/05	0,18	0,16	0,16	0,17
132	11/05	0,11	0,15	0,10	0,12
133	12/05	0,47	0,44	0,50	0,47
134	13/05	0,84	0,61	1,07	0,84
135	14/05	0,17	0,19	0,10	0,15
136	15/05	0,09	0,10	0,04	0,08
137	16/05	0,04	0,06	0,03	0,04
141	16/05-20/05	0,36	0,33	0,15	0,28

ND: valeur non déterminée

Tableau 14: Concentrations moyennes en chlorures, sulfates, nitrates et ions hydrogène de l'eau de fonte (concentrations moyennes pondérées des effluents des lysimètres L1, L2 et L3) et lames d'eau de fonte moyenne (H_{eau}).

Période	H_{eau} (mm)	Concentrations (uég/l)			
		Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	H^+
9/02-16/02	35,2	19,6	241	51,1	135
13/04-18/04	64,5	5,0	27,1	16,7	26,5
18/04-24/04	55,0	4,0	20,2	21,1	22,7
25/04	21,8	4,6	18,8	21,1	23,9
26/04	12,2	4,1	18,0	19,7	22,1
27/04	19,3	4,1	15,5	18,1	23,3
28/04	21,0	4,8	11,9	13,8	14,3
29/04	23,5	2,6	9,4	12,3	14,9
30/04	37,0	1,4	6,8	6,2	17,6
1/05	31,5	4,8	21,3	24,8	14,9
2/05	3,5	5,7	25,7	11,4	11,4
3/05	0,0	ND	ND	ND	ND
4/05	2,0	5,0	25,0	10,0	15,0
5/05	0,0	ND	ND	ND	ND
6/05	8,0	5,0	33,8	7,5	18,8
7/05	7,0	2,9	11,4	1,4	14,3
8/05	20,2	2,5	8,9	6,0	8,9
9/05	36,7	2,5	22,1	5,2	15,0
10/05	14,5	2,1	17,2	4,1	11,7
11/05	10,3	2,9	14,6	6,8	11,7
12/05	41,8	2,2	12,9	6,5	11,2
13/05	31,0	2,3	48,7	13,9	27,1
14/05	12,5	1,6	24,0	8,0	12,0
15/05	8,5	2,4	12,9	5,9	9,4
16/05	6,5	4,6	9,2	3,1	6,2
16/05-20/05	48,8	1,8	5,9	1,8	5,7

ND: valeur non déterminée

Tableau 15: Débits (Q_{rh}), concentrations ($conc_{rh}$) et charges ($Charge_{rh}$) en chlorures, sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique.

Période	Q_{rh} (l)	Chlorures		Sulfates		Nitrates		Ion hydrogène
		$Conc_{rh}$ ($\mu\text{eq/l}$)	$Charge_{rh}$ ($\text{m}\mu\text{g}$)	$Conc_{rh}$ ($\mu\text{eq/l}$)	$Charge_{rh}$ ($\text{m}\mu\text{g}$)	$Conc_{rh}$ ($\mu\text{eq/l}$)	$Charge_{rh}$ ($\text{m}\mu\text{g}$)	$Conc_{rh}$ ($\mu\text{eq/l}$)
18/04	ND	11,9	ND	99,5	ND	135	ND	22,9
18/04-24/04	31496*	10,6*	333,86	94,7	2981,10	109,3	3442,51	
24/04	ND	9,3	ND	89,8	ND	83,6	ND	25,1
25/04	16695*	9,3	155,26	93,7	1564,32	67,7	1130,25	25,7
26/04	5632*	9,3	52,38	95,8	539,55	69,4	390,86	23,4
27/04	883	9,0	7,95	93,7	82,74	59,7	52,72	22,9
28/04	5330	9,3	49,57	98,9	527,14	57,4	305,94	21,4
29/04	10200	8,5	86,70	100	1020,00	47,1	480,42	24,0
30/04	24700	7,9	195,13	102	2519,40	43,7	1079,39	24,6
1/05	38100	6,8	259,08	93,9	3577,59	32,1	1223,01	21,9
2/05	2830	7,9	22,36	99,3	281,02	37,7	106,69	24,0
3/05	22,5	8,2	0,18	102	2,29	38,4	0,86	20,4
4/05	10,6	8,7	0,09	105	1,11	36,9	0,39	20,0
5/05	59,9	8,7	0,52	102	6,11	40,3	2,41	20,4
6/05	0	ND	0,00	ND	0,00	ND	0,00	ND
7/05	884	5,9	5,22	71,6	63,29	30,7	27,14	19,1
8/05	7590	7,6	57,68	107	812,13	35,2	267,17	20,4
9/05	39500	7,3	288,35	108	4266,00	25,8	1019,10	17,4
10/05	19600	7,1	139,16	113	2214,80	26,1	511,56	18,2
11/05	8500	8,2	69,70	126	1071,00	29,5	250,75	20,0
12/05	28500	6,2	176,70	104	2964,00	21,3	607,05	20,4
13/05	105400	7,6	801,04	111	11699,40	18,1	1907,74	21,4
14/05	16400	8,5	139,40	113	1853,20	21,1	346,04	18,6
15/05	6390	8,2	52,40	122	779,58	21,1	134,83	19,1
16/05	2680	6,5	17,42	111	297,48	18,9	50,65	17,8
17/05	995	5,1	5,07	107	106,47	19,4	19,30	17,4
18/05	1440	5,1	7,34	112	161,28	21,9	31,54	16,6
19/05	4970	5,6	27,83	106	526,82	16,9	83,99	16,6
20/05	4350	5,1	22,18	107	465,45	16,9	73,52	17,4
21/05	11400	4,5	51,30	105	1197,00	14,5	165,30	18,2
22/05	13500	5,1	68,85	94,1	1270,35	12,7	171,45	17,4
23/05	30650	5,1	156,31	90,6	2776,89	9,7	297,30	19,5
24/05	160700	4,5	723,15	89,3	14350,51	8,4	1349,88	20,9
Somme:	599408		3972,20		59978,01		15529,77	
Moyenne arithmétique:	19336	7,7		105		39,6		
Concentration moyenne pondérée:		6,6		100		25,9		

* valeur estimée; ND: valeur non déterminée

Tableau 16: Niveau de l'eau par rapport au sol et concentrations en chlorures, sulfates, nitrates et ions hydrogène des échantillons d'eau souterraine (puits A, printemps 1984).

Date de l'échantillonnage	Niveau de l'eau (cm) *	Concentrations (uéq/l)			
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	H ⁺
18/04	-40	26,0	204	3,7	0,6
24/04	ND	18,6	163	1,5	1,1
25/04	-19	18,6	198	0,0	15,9
26/04	-18	15,0	181	0,0	23,4
27/04	-16	12,1	171	0,0	25,1
28/04	-16	12,1	110	4,7	36,3
29/04	ND	12,7	103	11,1	42,7
30/04	ND	11,0	101	15,5	43,7
1/05	-10	ND	ND	ND	ND
2/05	-14	7,6	116	15,5	47,9
3/05	-16	8,5	124	13,1	41,7
4/05	-20	9,0	130	11,1	40,7
5/05	-19	9,0	130	9,4	40,7
6/05	-22	8,2	139	7,9	35,5
7/05	-21	6,8	130	3,7	32,4
8/05	-19	8,7	128	10,6	33,1
9/05	-11	8,7	120	11,8	35,5
10/05	-14	7,3	131	11,6	38,9
11/05	-15	8,7	125	12,4	40,7
12/05	-10	7,9	132	9,2	40,7
13/05	-11	9,6	130	7,6	30,2
14/05	-15	7,9	69,3	6,8	38,9
15/05	-17	9,0	130	6,0	34,7
16/05	ND	5,9	127	3,5	31,6
17/05	-20	6,2	125	3,5	30,9
18/05	ND	7,9	129	3,5	26,3
19/05	ND	5,6	126	1,9	30,9
20/05	ND	6,2	127	1,6	28,2
21/05	ND	5,1	126	1,3	31,6
22/05	ND	5,6	108	1,6	25,1
23/05	-10	6,8	107	1,0	30,9
24/05	ND	4,5	104	2,3	27,5
Moyenne (18/04-24/05):		9,6	130	6,2	31,7
Moyenne (1/05-24/05):		7,4	122	6,8	34,6

ND: valeur non déterminée

* la surface du sol représente le niveau 0 et les valeurs sont négatives vers le bas.

Tableau 17: Bilan de la fonte du 9 au 16 février 1984.

Lys.	H _{eau} (mm)	Concentrations ($\mu\text{eq/l}$)			Charges ($\text{m}\mu\text{eq/m}^2$)		
		Cl ⁻ $\pm 1,4$	SO ₄ ²⁻ ± 1	NO ₃ ⁻ $\pm 0,8$	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
L1	35,5	20,6	270	62,9	0,73 $\pm 0,06$	9,6 $\pm 0,1$	2,23 $\pm 0,05$
L2	35,0	10,4	87	39,7	0,36 $\pm 0,05$	3,05 $\pm 0,06$	1,39 $\pm 0,04$
L3	35,0	28,2	368	46,8	0,99 $\pm 0,06$	12,9 $\pm 0,1$	1,64 $\pm 0,04$
moy	35,2	19,7	242	49,8	0,69 $\pm 0,06$	8,52 $\pm 0,09$	1,75 $\pm 0,04$

Tableau 18: Bilan de la fonte du 3 mars au 28 avril 1984.

Compartiment hydrologique	Période	H _{eau} (mm)	Conc (µeq/l)			Charges (meq/m ²)		
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Couvert de neige	3/03	383	5,6	12,5	11,3	2,1 ±1,2	4,8 ±2,5	4,3 ±4,7
Précipitations humides	3/03-13/04	104	5,9	51	17	0,61±0,05	5,3 ±3,2	1,8 ±0,6
Précipitations humides	13/04-18/04	23,6	5,0	11,6	3,1	0,12±0,05	0,27±0,05	0,07±0,05
Précipitations humides	18/04-28/04	0,7	10,7	50,5	11,4	0,01	0,04±0,01	0,01
Dépôts secs	3/03-28/04	0				0,45±0,06	2,8 ±1,6	1,1 ±0,4
Couvert de neige	28/04	296	4,2	7,1	8,5	1,2 ±0,6	2,1 ±1,0	2,5 ±1,2
Fonte estimée	3/03-28/04	215				2 ±2	11 ±8	5 ±7

Tableau 19: Bilan de la fonte de décembre 1983 au 20 mai 1984 (H_{eau} : lame d'eau de fonte).

Apports- exports	Période	H_{eau} (mm)	Charges (méq/m ²)		
			chlorures	sulfates	nitrites
Apports par la fonte	déc 83-9/02/84	0	0	0	0
	9/02/84-16/02/84	35,2	0,69±0,06	8,52± 0,09	1,75±0,04
	16/02/84-3/03/84	0	0	0	0
	3/03/84-28/04/84	215	2 ±2	11 ± 8	5 ±7
	28/04/84-20/05/84	343,3	0,9 ±0,3	5,8 ± 0,3	2,8 ±0,3
Somme des apports par la fonte	Déc 83-20/05/84	594	3,6 ±2,4	25 ± 8	10 ±7

Tableau 20: Valeurs limites de la surface moyenne de drainage du ruisseau hypodermique (S_{rh}) et de la lame d'eau moyenne ruisselée (H_{rh}).

Valeur	H_{rh} (mm)	S_{rh} (m ²)
maximale	594	1,04 X 10 ⁵
minimale	6	8,10 X 10 ²

Tableau 21: Détermination des charges maximales possibles ($Charge_{rh,max}$) en chlorures, sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique à partir de la lame d'eau ruisselée maximale possible (H_{rh}) et des concentrations moyennes mesurées dans le ruisseau hypodermique ($conc_{rh,moy}$).

Ions	$H_{rh,max}$ (mm)	$conc_{rh,moy}$ (uég/l)	$Charge_{rh,max}$ (még/m ²)
Cl ⁻	594	6,6	3,9
SO ₄ ²⁻	594	100	59
NO ₃ ⁻	594	25,9	15

Tableau 22: Concentrations moyennes en chlorures, sulfates et nitrates des précipitations humides, des eaux de fonte, des eaux souterraines et des eaux de ruissellement (bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984).

Compartiment du système hydrologique	Période	Concentrations (uéq/l)		
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Précipitations humides (1)	13/04-24/05	5,9	51	17
Eaux de fonte (1)	9/02-20/05	6,1	42	17
Eaux souterraines (2)	18/04-24/05	9,6	131	6,2
Eaux souterraines (2)	1/05-24/05	7,4	122	6,8
Eaux de ruissellement (3)	18/04-24/05	6,6	100	26

(1) concentration moyenne = $\frac{\text{charge totale (uéq/m}^2\text{)}}{\text{équivalence en eau totale (mm)}}$

(2) concentration moyenne = moyenne arithmétique des concentrations journalières

(3) concentration moyenne = charge totale (uéq) / débit total (l)

Tableau 23: Détermination des charges totales en sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique ($Charge_{rh\ tot}$) d'après la méthode du bilan net en chlorures nul ($H_{rh\ moy}$: lame d'eau moyenne ruisselée estimée; $Conc_{rh\ moy}$: concentration moyenne pondérée en ions dans le ruisseau hypodermique).

Ions	$H_{rh\ moy}$ (± 360 mm)	$Conc_{rh\ moy}$ ($\mu eq/l$)	$Charge_{rh\ tot}$ (meq/m^2)
SO_4^{2-}	550	100	55 ± 36
NO_3^-	550	25,9	14 ± 9

Tableau 24: Détermination des charges totales en chlorures, sulfates et nitrates dans le ruisseau hypodermique ($Charge_{rh\ tot}$) d'après la méthode du bilan hydrologique ($H_{rh\ moy}$: lame d'eau moyenne ruisselée estimée; $Conc_{rh\ moy}$: concentration moyenne pondérée en ions dans le ruisseau hypodermique).

Ions	$H_{rh\ moy}$ (mm)	$Conc_{rh\ moy}$ ($\mu eq/l$)	$Charge_{rh\ tot}$ (meq/m^2)
Cl^-	295	6,6	1,9
SO_4^{2-}	295	100	30
NO_3^-	295	25,9	7,6

Tableau 25: Bilan global des charges en chlorures, sulfates et nitrates impliquées durant la fonte printanière de 1984 sur le bassin versant du lac Laflamme.

Apports-exports	Période	Charges (méq/m ²)			Charges (kg/ha)		
		chlorures	sulfates	nitrates	chlorures	sulfates	N-nitrates
Apports par la fonte	déc 83-9/02/84	0	0	0	0	0	0
	9/02/84-16/02/84	0,69±0,06	8,52± 0,09	1,75±0,04	0,24±0,02	4,09±0,04	0,245±0,005
	16/02/84-3/03/84	0	0	0	0	0	0
	3/03/84-28/04/84	2 ±2	11 ± 8	5 ±7	0,7 ±0,7	5,3 ±3,8	0,7 ±1,0
	28/04/84-20/05/84	0,9 ±0,3	5,8 ± 0,3	2,8 ±0,3	0,3 ±0,1	2,8 ±0,1	0,39 ±0,04
Somme des apports par la fonte	Déc 83-20/05/84	3,6 ±2,4	25 ± 8	10 ±7	1,3 ±0,8	12 ±4	1,4 ±1,0
Exports par le ruisseau	début de l'écoulement-18/04/84	négligeables			négligeables		
	18/04/84-24/05/84	négligeables			négligeables		
	·estimé maximum	3,9	59	15	1,4	28	2,1
	·estimé méthode 1	3,6*	55 ±36	14 ±9	1,3*	26 ±17	2,0 ±1,3
·estimé méthode 2	1,9	30	7,6	0,67	14	1,1	

* par définition

ANNEXE B

FIGURES

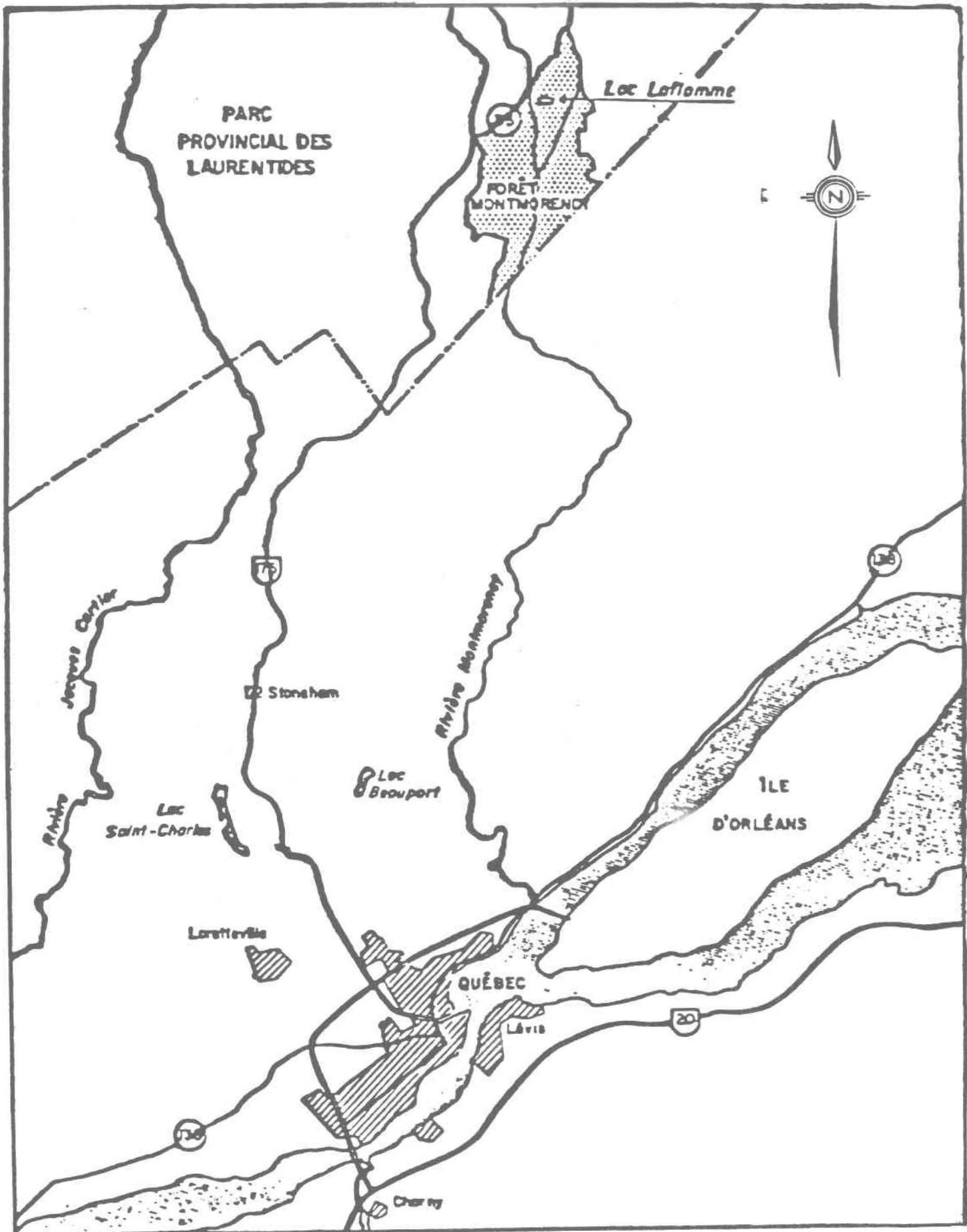


Figure 1: Localisation du bassin du lac Laflamme (Jones et al., 1985).

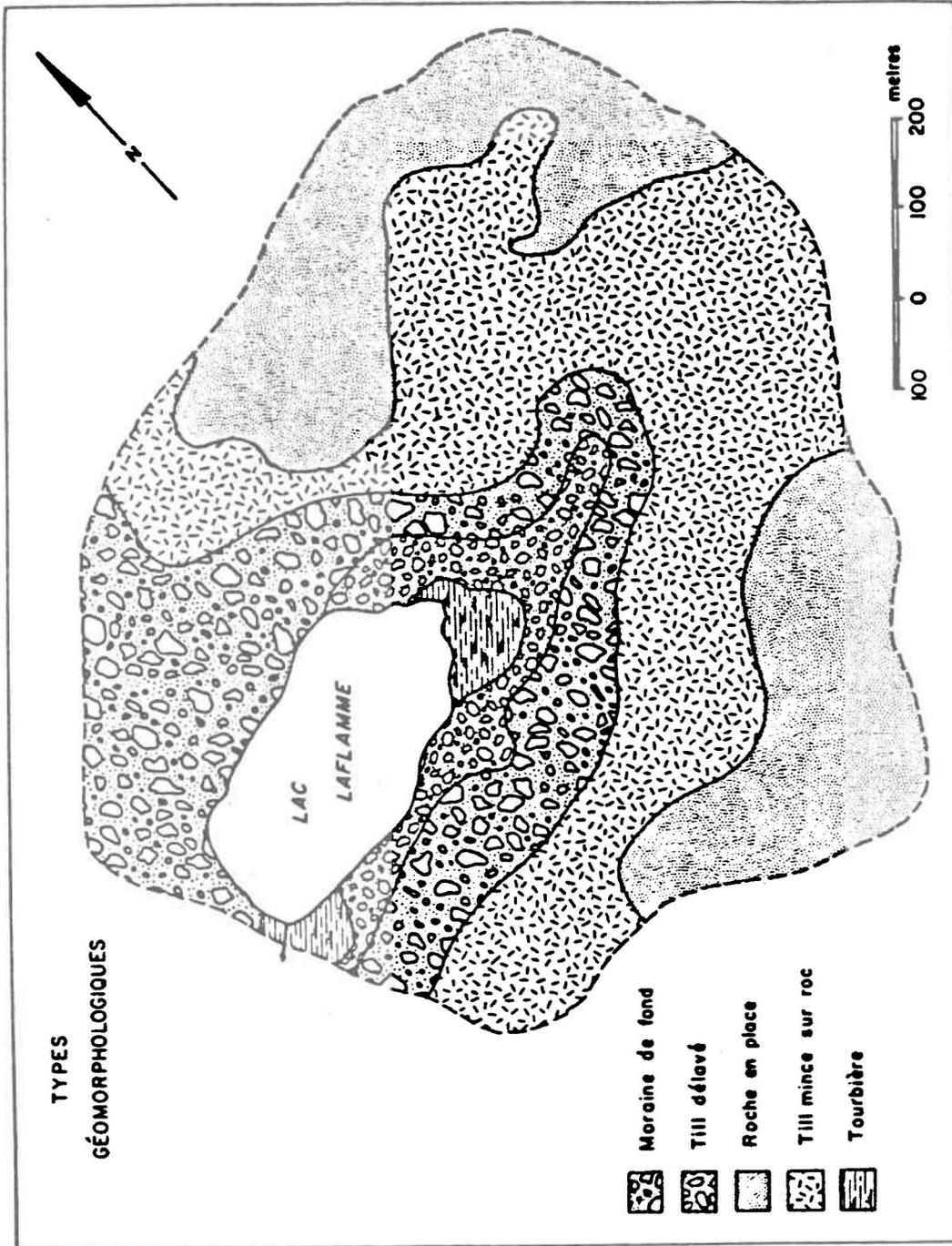


Figure 2: Types géomorphologiques du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec. (Jones et al., 1985).

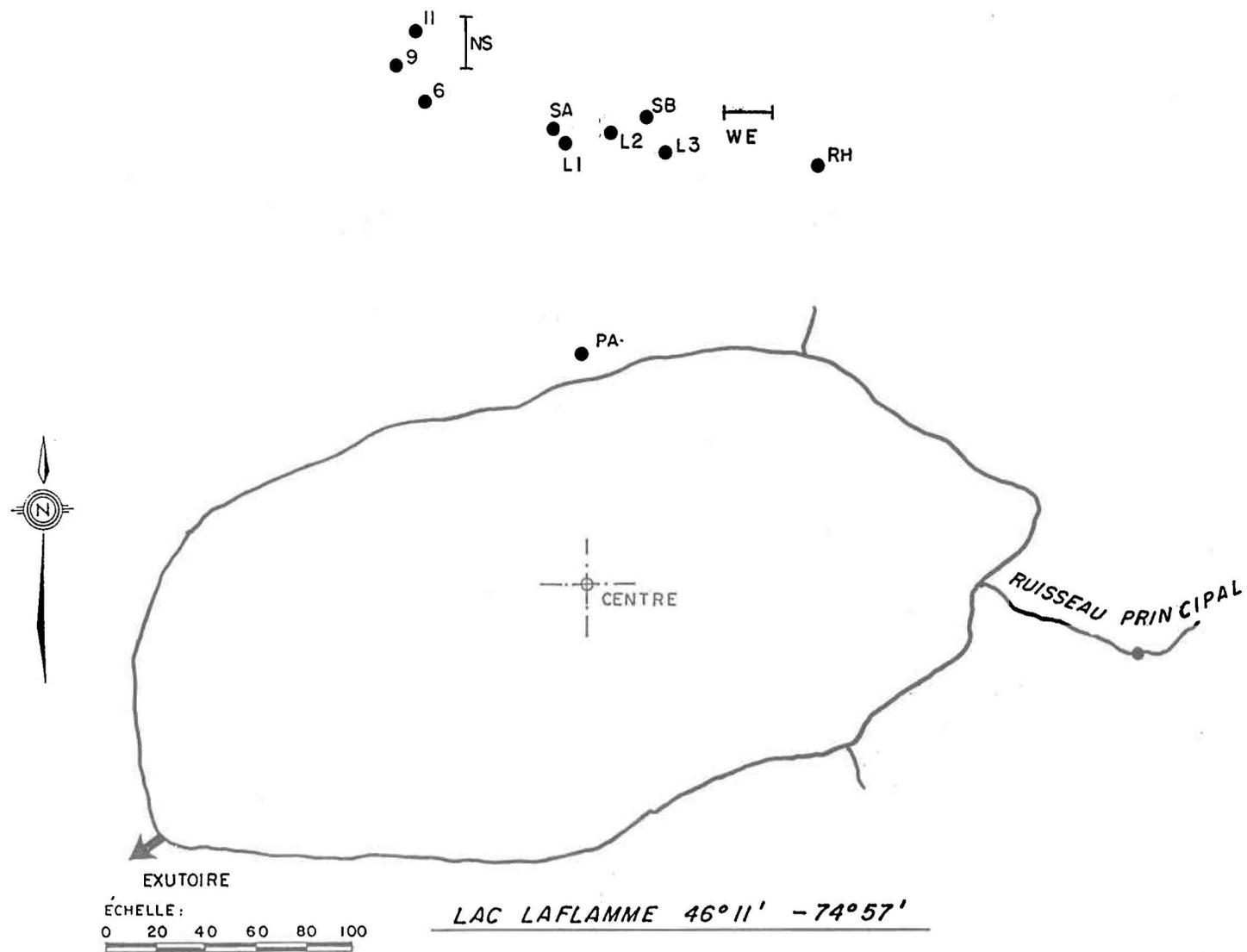


Figure 3: Stations d'échantillonnage sur le versant nord du bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.

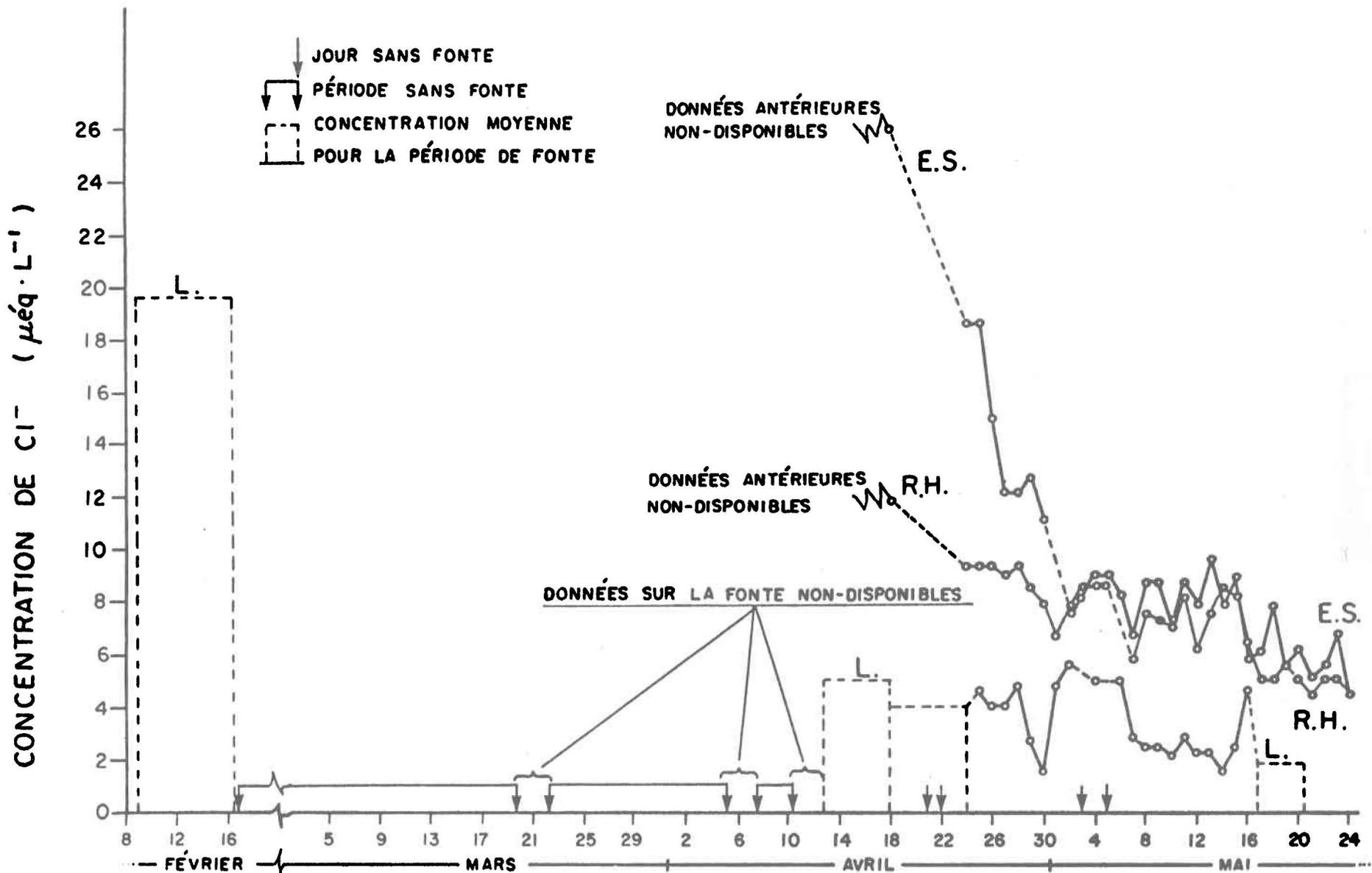


Figure 4: Evolution des concentrations de chlorures des eaux souterraines (puits A)(E.S.), des eaux de ruissellement hypodermique (R.H.) et des eaux de fonte provenant des lysimètres L1, L2 et L3 (concentrations moyennes pondérées)(L.); bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

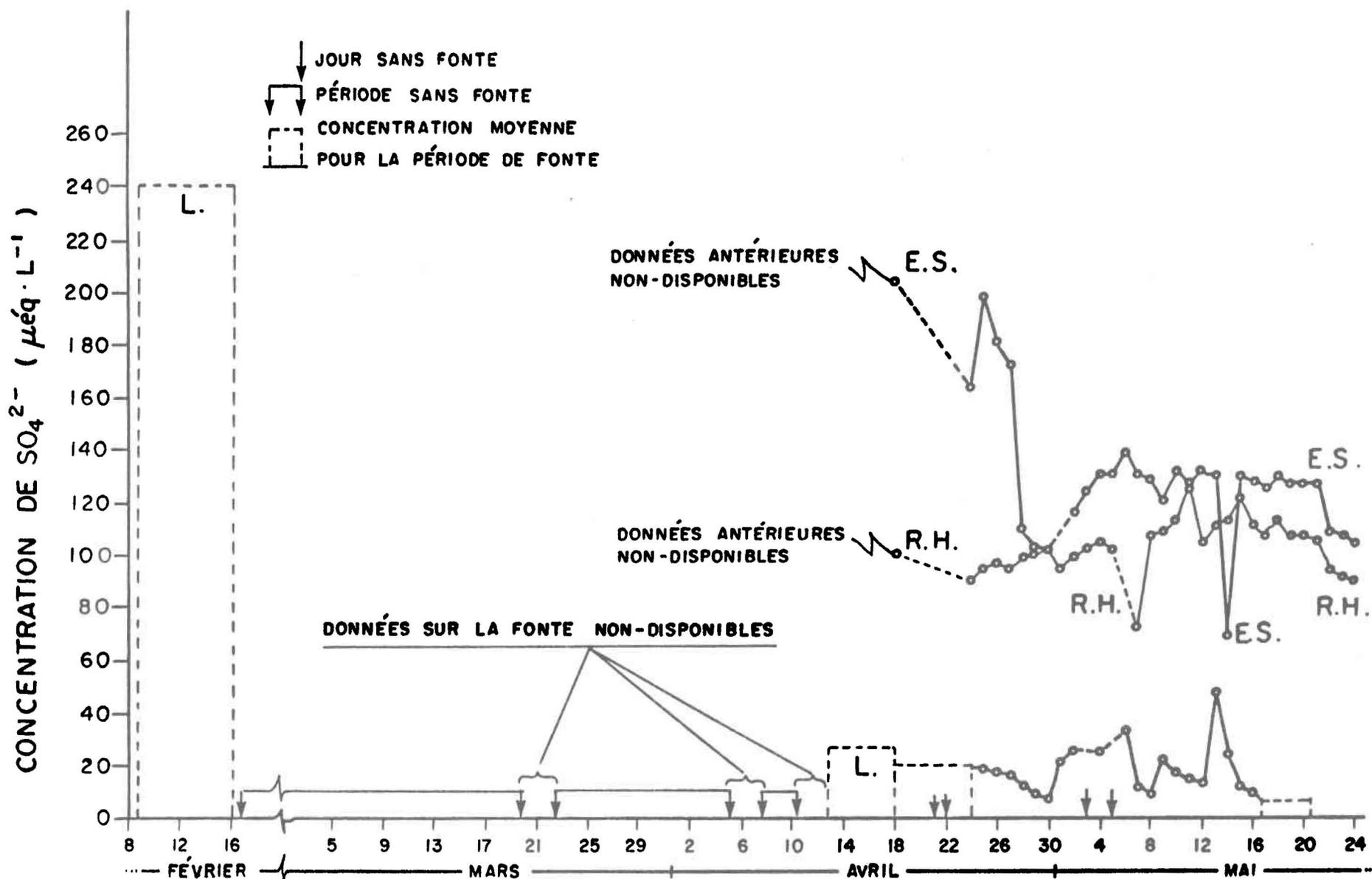


Figure 5: Evolution des concentrations de sulfates des eaux souterraines (puits A)(E.S.), des eaux de ruissellement hypodermique (R.H.) et des eaux de fonte provenant des lysimètres L1, L2 et L3 (concentrations moyennes pondérées)(L.); bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

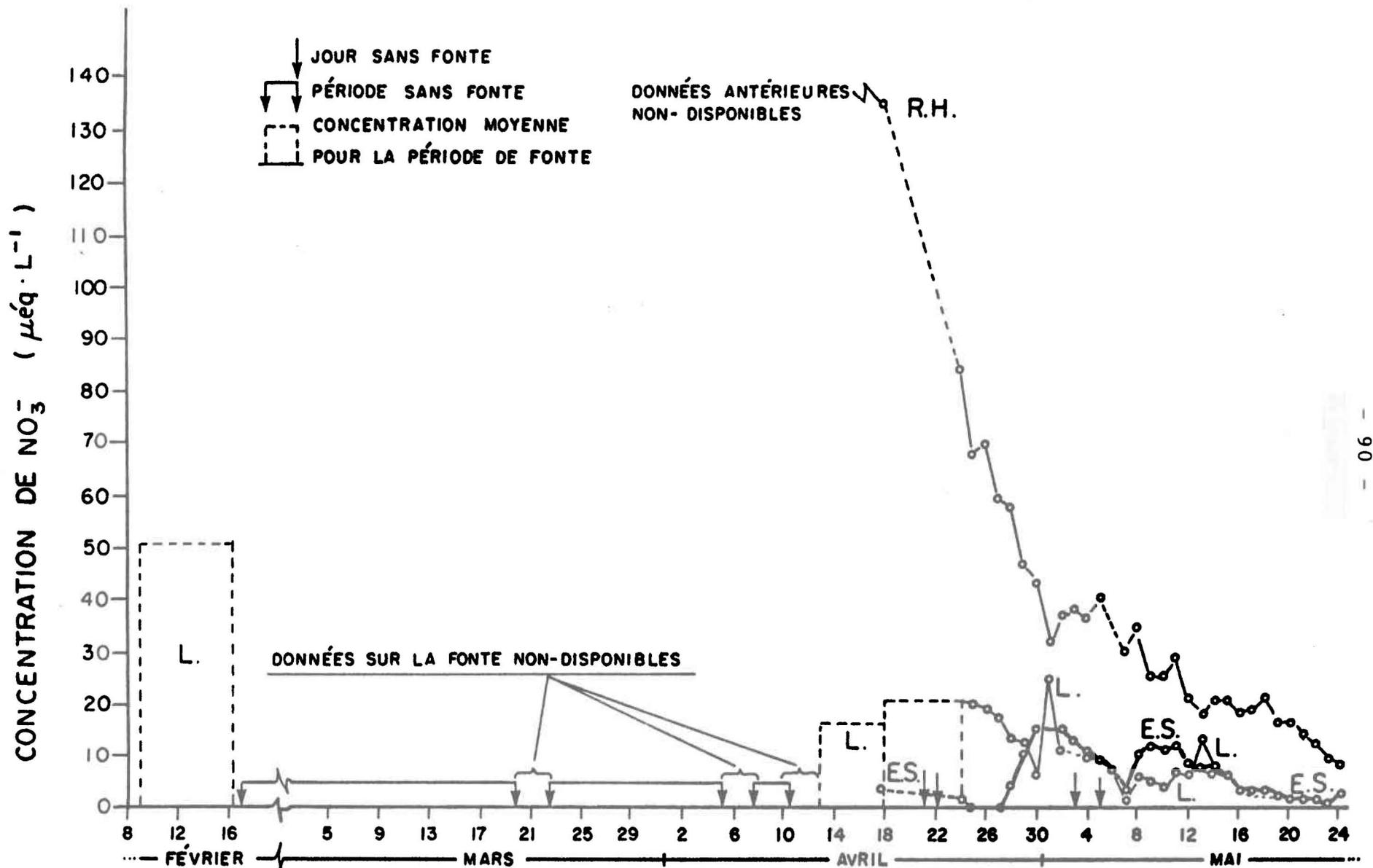


Figure 6: Evolution des concentrations de nitrates des eaux souterraines (puits A)(E.S.), des eaux de ruissellement hypodermique (R.H.) et des eaux de fonte provenant des lysimètres L1, L2 et L3 (concentrations moyennes pondérées)(L.); bassin versant du lac Laflamme, printemps 1984.

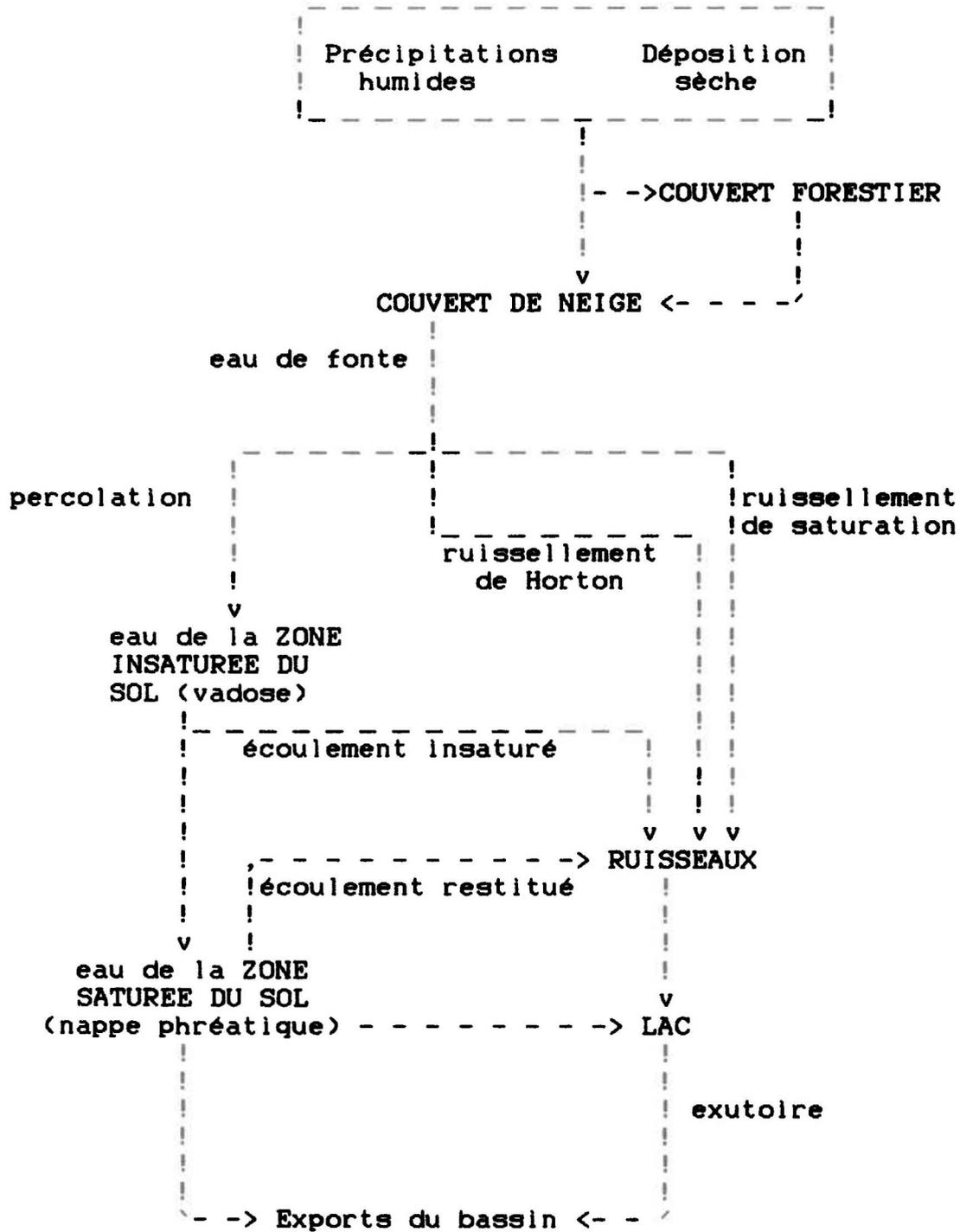


Figure 7: Schéma hydrologique du système

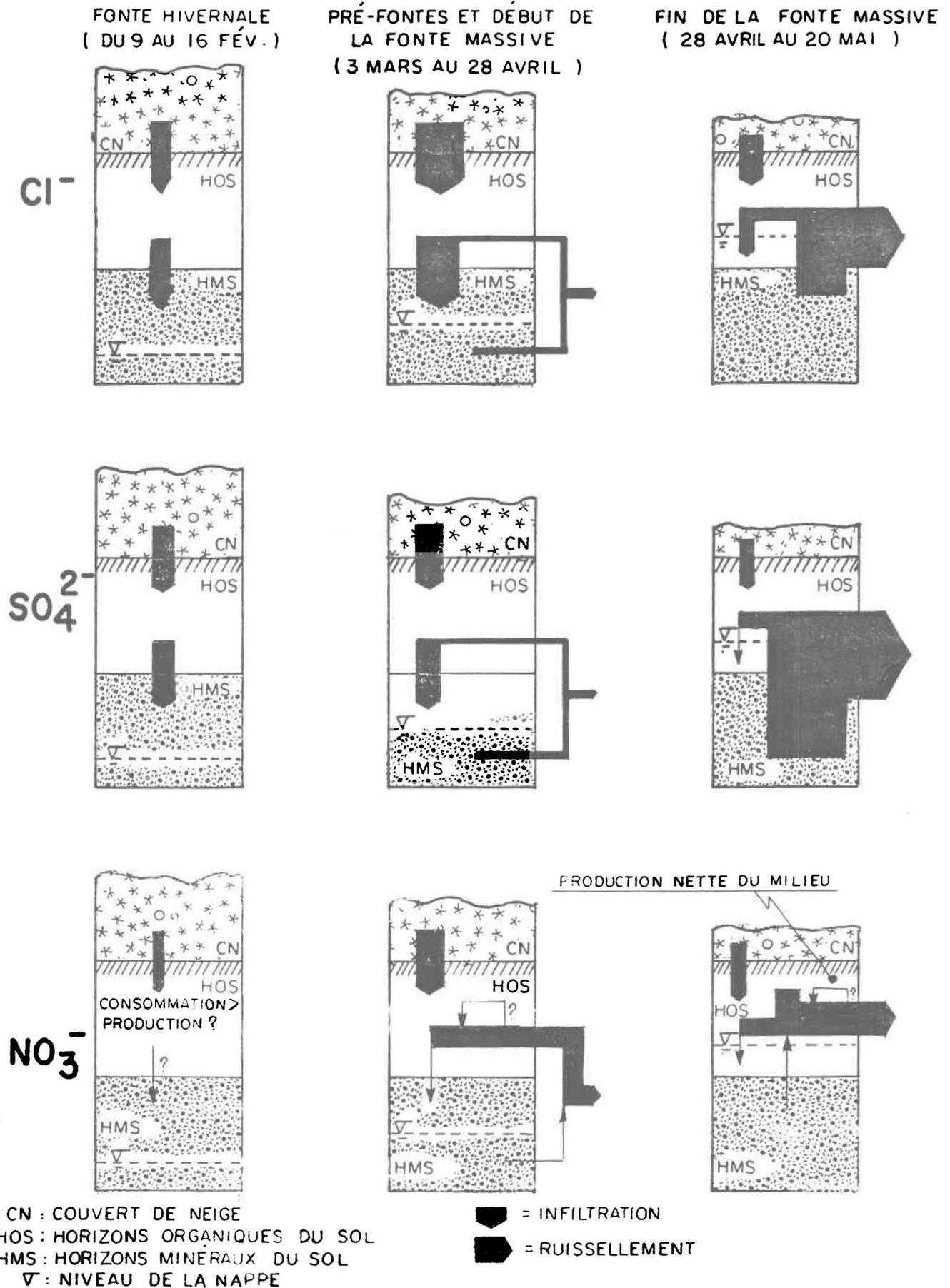


Figure 9: Flux estimés de chlorures, sulfates et nitrates dans la forêt boréale du bassin versant du lac Laflamme durant les différentes phases de la fonte printanière de 1984.