

Rapport de recherche préparé
pour
La Direction des eaux intérieures
Environnement Canada

**ÉVOLUTION DU CHEMINEMENT
DES APPORTS ACIDES SOUS
COUVERT DE GLACE
DURANT LA FONTE
PRINTANIERE**

par
H.G. Jones

Rapport Scientifique No 301

INRS-Eau (Université du Québec)
2700, rue Einstein
Sainte-Foy, Québec
G1V 4C7

15 novembre 1990

TABLE DES MATIERES

	Page
Liste des figures	ii
Résumé	1
Abstract	1
Introduction	3
Le site d'étude	6
La méthodologie d'étude	7
Résultat et discussion	8
La chronologie de l'hydrologie du lac	8
La composition géochimique des eaux	9
L'évolution concomitante de l'acidité et la composition ionique des eaux	13
Comparaison des résultats de cette étude avec ceux rapportés dans la littérature	19
Conclusions et Recommandations	20
Références	21

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1:	La méthodologie d'étude du flux géochimique dans le Lac Laflamme, printemps 1988. La figure démontre la bathymétrie du lac, les sites d'étude de profils chimiques de la colonne d'eau (Séries A-L), et les trois lieux d'entrée des ruisseaux (R5, R6 et écoulement hypodermique) dans le lac en face des séries H, I, J (reproduit de Roberge et Jones, 1990).	23
Figure 2:	La méthodologie de prélèvement des échantillons d'eau pour l'étude des profils chimiques de la colonne d'eau. a) (1) glace noire; (2) glace blanche; (3) eau de fonte de glace; (4) neige; (5); niveau hydrostatique; (6) puits d'accès de PVC; (7) capuchon de mousse synthétique (styrofoam); (8) support; (9) plaque de mousse synthétique (styrofoam). b) la seringue de prélèvement. c) la sonde de prélèvement (reproduit de Roberge et Jones, 1990).	24
Figure 3:	La chronologie de l'hydrologie et hydrogéochimie (conductivité, pH) du lac Laflamme, printemps 1988. La figure démontre (a) l'évolution du traceur de rhodamine; (b) l'évolution du pH et de la conductivité à la décharge du lac; et (c) la lame d'eau cumulative des eaux de fonte de neige et de la décharge du lac, et le débit journalier de l'écoulement hypodermique et la décharge du lac (reproduit de Roberge et Jones, 1990).	25
Figure 4:	Anions vs cations pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique et décharge du lac), Lac Laflamme, printemps 1988.	26
Figure 5:	Anions vs conductivité pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique et décharge du lac), Lac Laflamme, printemps 1988.	26
Figure 6:	Cations vs conductivité pour tous les échantillons (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge du lac) Lac Laflamme, printemps 1988.	27
Figure 7:	H ⁺ vs conductivité pour tous les échantillons (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge du lac) Lac Laflamme, printemps 1988.	27

Figure 8:	Distribution des cations parmi les eaux peu profondes < 40 cm, et plus profondes > 40 cm, Lac Laflamme, printemps 1988. Les figures démontrent l'étroite correspondance entre les tributaires (R5, R6 et ruissellement hypodermique) et les strates supérieures du lac pendant la période de fonte massive.	28
Figure 9:	Distribution des cations parmi les eaux de décharge du lac et les tributaires, Lac Laflamme, printemps 1988. Les figures démontrent l'étroite correspondance entre les tributaires (R5, R6 et ruissellement hypodermique) et les strates supérieures du lac pendant la période de fonte massive.	28
Figure 10:	Conductivité vs NO_3 pour les eaux du lac du Lac Laflamme sous couvert de glace, printemps 1988.	29
Figure 11:	Conductivité vs SO_4 pour les eaux du lac du Lac Laflamme sous couvert de glace, printemps 1988.	29
Figure 12:	H^+ vs SO_4 pour toutes les eaux du lac, tributaires et décharge, Lac Laflamme, printemps 1988.	30
Figure 13:	H^+ vs SO_4 pour toutes les eaux du lac, seulement les puits d'accès series B et C, Lac Laflamme, printemps 1988.	30
Figure 14:	H^+ vs NO_3 pour toutes les eaux du lac, tributaires et décharge, Lac Laflamme, printemps 1988.	31
Figure 15:	H^+ vs NO_3 pour toutes les eaux du lac seulement, Lac Laflamme, printemps 1988.	31
Figure 16:	Mg^{2+} vs Ca^{2+} pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge), Lac Laflamme, printemps 1988.	32
Figure 17:	Na^+ vs Ca^{2+} pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge), Lac Laflamme, printemps 1988.	32
Figure 18:	Évolution de H^+ et cations, décharge du Lac Laflamme, printemps 1988.	33
Figure 19:	Évolution de H^+ , NO_3^- et SO_4^{2-} , décharge du Lac Laflamme, printemps 1988.	33
Figure 20:	Concentration de H^+ , NO_3^- et SO_4^{2-} dans les eaux de ruissellement hypodermique, Lac Laflamme, printemps 1988.	34

Figure 21:	Puits d'accès, C10; 10 m de la rive. Profils de H ⁺ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 12-04, 1988.	35
Figure 22:	Puits d'accès, C20; 20 m de la rive. Profils de H ⁺ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 12-04, 1988.	35
Figure 23:	Profils de H ⁺ , NO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻ dans la colonne d'eau (puits d'accès C40 dans le couvert de glace, Lac Laflamme, 12-04 1988.	36
Figure 24:	Puits d'accès, B20; 20 m de la rive. Profils de H ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme 14-04 1988.	37
Figure 25:	Puits d'accès, B40; 40 m de la rive. Profils de H ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme 14-04 1988.	37
Figure 26:	Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B10; 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	38
Figure 27:	H ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ . Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B10; 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	38
Figure 28:	Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	39
Figure 29:	H ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ . Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	39
Figure 30:	Profils des cations dans la colonne d'eau (puits d'accès B40; 40 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	40
Figure 31:	Puits d'accès, C5 (5 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	41
Figure 32:	Puits d'accès, C10 (10 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	41
Figure 33:	Puits d'accès, C20 (20 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	42
Figure 34:	Puits d'accès, C40 (40 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	42

Figure 35:	Profils des cations dans la colonne d'eau (puit d'accès C60; 60 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.	43
Figure 36:	Puit d'accès B10; 10 m de la rive. Profils de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 25-04 1988.	44
Figure 37:	Puit d'accès B20; 20 m de la rive. Profils de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 25-04 1988.	44
Figure 38:	Profils des cations dans la colonne d'eau (puit d'accès B40; 40 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 25-04 1988.	45
Figure 39:	Puits d'accès B20 (20 m de la rive). Profils de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.	46
Figure 40:	Puits d'accès B40 (40 m de la rive). Profils de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.	46
Figure 41:	Puits d'accès C20; 20 m de la rive. Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.	47
Figure 42:	Puits d'accès C*20; 20 m de la rive, 10 m en aval de C20. Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.	47
Figure 43:	Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20; 20 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 06-05 1988.	48
Figure 44:	H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} . Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20; 20 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 06-05 1988.	48
Figure 45:	11:00 hrs. Profils de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} dans la colonne d'eau (puits d'accès HY; 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 09-05 1988.	49
Figure 46:	16:00 hrs. Profils de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} dans la colonne d'eau (puits d'accès HY; 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 09-05 1988.	49
Figure 47:	Profils chimiques dans la colonne d'eau (puit d'accès HY; 10 m de la rive) de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Lac Laflamme, 09-05 1988.	50
Figure 48:	Évolution chimique du ruissellement hypodermique de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Lac Laflamme, 09-05 1988.	50

Figure 49:	Ruisseau R5. Évolution de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Lac Laflamme, 09-05 1988.	51
Figure 50:	Ruisseau R6. Évolution de H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Lac Laflamme, 09-05 1988.	51
Figure 51:	Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès K20; 20 m de la rive), Lac Laflamme, 10-05 1988.	52
Figure 52:	H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} . Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès K20; 20 m de la rive), Lac Laflamme, 10-05 1988.	52

RÉSUMÉ

Une étude intensive et extensive des eaux de ruissellement, de la colonne d'eau et de la décharge du lac Laflamme, réserve faunique des Laurentides, Québec, au printemps 1988, a permis la caractérisation des facteurs déterminants dans l'acidification épisodique du milieu. Les accroissements d'acidité à la décharge du lac pendant la fonte sont dus en grande partie à la dilution des concentrations des cations par les eaux de fonte. De plus, le premier accroissement d'acidité est relié à l'arrivée dans le lac des premières eaux de fonte fortement chargées en NO_3 . Par contre, le deuxième accroissement d'acidité pendant la fonte massive comprend des concentrations minimales de NO_3 . Nous proposons que cette baisse de concentration soit le résultat de dénitrification dans le sol et/ou une assimilation de NO_3 dans la zone des racines, et, "en toute probabilité", l'activité planctonique 'in situ' et sous-jacente au couvert de glace. Afin de valider cette hypothèse, nous recommandons qu'une étude extensive et intensive de l'évolution des composés azotés pendant la fonte printanière soit entreprise. L'étude devrait comprendre une approche expérimentale; elle sera extensive de nature mais restreinte spatialement sur l'évolution physico-chimique de la colonne d'eau peu profonde et à l'interaction eaux de fonte - sol sur la rive connexe.

ABSTRACT

An intensive and extensive study of the chemical composition of stream μm and runoff waters, the water column and the lake discharge of Lac Laflamme, reserve faunique des Laurentides, Québec, in the spring of 1988, led to the characterisation of the main factors for the episodic acidification of lake sub-ice waters. Increase in the acidity of the waters at the lake discharge during the melt is due in large part to the dilution of base cation concentrations by meltwaters. In addition, the first pulse of acidity during the early melt is related to the entry into the lake of snow meltwaters with a relatively high concentration of NO_3 . Conversely, the second pulse of acidity during the main melt is accompanied by waters with a very low concentration of NO_3 . We suggest that this removal of NO_3 may be due to denitrification in the soil and NO_3 assimilation in the

rootzone during meltwater infiltration, and to plankton activity in the upper sub-ice waters. In order to validate these hypotheses we recommend that an extensive study of nitrogen dynamics in meltwaters, infiltrating meltwaters in the vegetative zone and upper soil horizons, sediment-water interactions and the water column be undertaken during the spring melt period. The study should be restricted to a small area in the shallow in-shore waters so that process studies may be facilitated by controlling the experimental conditions during the different phases of the melt season.

INTRODUCTION

L'acidité des eaux de surface de la forêt boréale atteint des valeurs maximales pendant la fonte printanière (Jones et al, 1986). A cette période du choc acide printanier, les flux hydrologiques et géochimiques imposent un stress écologique sur les diverses biotas aquatiques, et ceci, particulièrement dans les frayères lacustres et les lits de ruisseaux.

Le Lac Laflamme, un petit plan d'eau de la Forêt Momorency à 80 km au nord de la ville de Québec n'est pas épargné par ce phénomène annuel (Stein et al, 1990). Quoique le degré d'acidité varie d'année en année selon l'intensité de la fonte de neige (Papineau, 1989). L'acidité des eaux découle de plusieurs facteurs anthropiques (dépôts de SO_4 et de NO_3 des émissions de carburants fossiles) et naturels (émissions des composés de S et de N par la biota, les acides organiques du sol) et le comportement hydrologique (modification de la composition géochimique par des changements dans les voies d'écoulement) des eaux de surface et souterraines (Baker et al, 1990). On croit que les eaux naturelles peuvent subir des pertes d'alcalinité durant certaines périodes (ex. dérivation du flux hydrologique vers les lacs par ruissellement printanier dans le sol organique) mais que cette perte est considérablement aggravée par l'excès des dépôts anthropiques de S et de N associé aux fortes concentrations de SO_2 et SO_4 dans l'atmosphère et les précipitations (Wigington et al., 1990).

Depuis plusieurs années le taux d'émission des composés de S s'est stabilisé et même diminué, une conséquence probable des programmes fédéral et provincial de diminution des émissions de SO_2 . L'emphase de la problématique de l'acidité atmosphérique et aquatique s'oriente désormais davantage vers l'analyse de l'importance des émissions de NO_x , des dépôts de NO_3 , et le cycle de N dans les écosystèmes (Kelly et al, 1990).

Quoique S et N sont deux éléments nutritifs essentiels pour la productivité biologique, leur comportement biogéochimique respectif est différent; le N est surtout le facteur limitatif de la productivité, donc sujet à une demande biologique très forte, tandis que l'utilisation de S par la biota est peu importante par rapport à sa disponibilité dans les écosystèmes. Cet état de chose rend l'étude de l'importance de N comme précurseur

de l'acidité dans des bassins versants plus complexe. Les apports physiques de NO_3 par le flux hydrologique vers les plans d'eau peuvent être atténués par l'activité biologique, et ceci, surtout dans le sol forestier et les eaux lacustres.

Roberge et Jones (1990) ont étudié d'une façon intensive les flux hydrologique et géochimique des eaux de fonte de neige, les eaux de ruissellement, du lac, et de la décharge du lac Laflamme pendant la fonte de neige, 1988. Par une discrimination géochimique (pH et conductivité) de ces eaux les auteurs ont conclu que l'acidité des eaux à la décharge du lac a été le résultat de deux phénomènes. Le premier concerné l'arrivée directe des eaux de fonte d'acidité forte en provenance des congères de neige sur la rive dans le lac et le lent mouvement de ces eaux dans une strate discrète sous le couvert de glace vers l'exutoire du lac. La deuxième hausse d'acidité a été attribuée à l'arrivée des eaux de ruissellement de surface hypodermique plus turbulentes et ayant une vitesse de déplacement plus élevée. Ces dernières, qui se déchargent dans le lac tout le long de la rive, représentent des eaux ayant très peu de contact avec le sous-sol du bassin; elles possèdent des teneurs en acidité élevées et une composition géochimique "plus faible" que les eaux du lac et souterraines d'avant la fonte. Ces eaux hypodermiques ne sont présentes que durant une courte période quand le niveau de la nappe phréatique est élevé, elles sont, toutefois, le facteur dominant qui contrôle le niveau d'acidité des eaux lacustres pendant la période de fonte.

Ces deux phénomènes-précurseurs de l'acidité sont toutefois influencés par les apports substantiels des eaux de fonte du couvert de glace. Ces dernières peuvent modifier la composition chimique des strates supérieures des eaux du lac de deux façons. Les eaux en provenance de la glace noire sont peu minéralisées; elles peuvent réduire le niveau d'acidité par simple dilution. Par contre, les eaux de fonte provenant du couvert de neige agissent comme les eaux de fonte des congères de la rive. Les premières eaux peuvent être relativement concentrées en NO_3 et SO_4 mais pauvre en cations. Une telle combinaison d'ions peut, donc, éliminer l'alcalinité et provoquer les baisses de pH (Molot et al, 1989) sous le couvert de glace dans les strates supérieures des eaux du lac.

Roberge et Jones (ibid) ont souligné, de plus, le rôle physique déterminant que le couvert de glace joue dans l'évolution de l'acidité dans les strates supérieures du lac et,

en conséquence, l'influence du couvert sur l'acidité des frayères et les eaux du ruisseau à la décharge du lac. Le couvert assure la stabilité de strates qui s'écoulent un chemin vers l'exutoire du lac à une profondeur qui est déterminée par le profil de température de la colonne d'eau. La discrimination physico-chimique des eaux et les expériences 'in situ' avec le traceur rhodamine ont confirmé l'écoulement respectif des différents apports en eaux acides sous la glace. Les premières eaux de fonte coulent immédiatement sous la glace tandis que le flux des eaux hypodermiques se trouve à une profondeur intermédiaire entre les anciennes eaux lacustres et les eaux de fonte du couvert de glace. Le mélange des eaux est donc empêché par le couvert. La capacité de neutralisation des apports acides du lac s'en trouve ainsi considérablement diminuée.

Dans leur analyse des facteurs déterminants de l'acidité du lac Laflamme Roberge et Jones (ibid) ont discriminé les divers apports dans le lac par pH, conductivité et température. Ils n'ont pas étudié le comportement des anions de l'acidité forte et, de plus, ils ont considéré que l'acidité était le résultat du remplacement et/ou de la dilution conservatrice des anciennes eaux lacustres par des "nouvelles" eaux de fonte de neige et de glace ou des eaux hypodermiques. L'influence de l'activité biologique sur le NO_3^- , donc, été négligée sur la prémisse que l'activité biologique est peu importante dans les eaux froides pendant le délai nécessaire à ces eaux pour traverser le lac.

L'objectif de la présente étude a été de vérifier si le comportement des anions d'acidité forte (SO_4^{2-} , NO_3^-) pendant la fonte printanière dans le lac Laflamme a été compatible avec le modèle simple et purement physique de dilution proposé par Roberge et Jones. Cette étude est basée sur l'analyse des anions et cations de plusieurs échantillons recueillis dans les eaux du lac avant et pendant l'étude de traçage à la rhodamine. Les hypothèses du modèle de dilution sont ici vérifiées en comparant l'évolution des concentrations ioniques avec celles de l'acidité.

LE SITE D'ETUDE.

Le bassin versant du lac Laflamme est situé dans la réserve faunique des Laurentides à 80 km au nord de la ville de Québec. Le bassin versant du lac couvre une superficie de 0.68 km² dont 9% (0.061 km²) est occupé par le plan d'eau. Le volume du lac est ~ 125*10³ m³ et la profondeur maximale est 5.3 m. La latitude et la longitude sont de 47°19' et 71°07' et l'altitude varie de 777 à 884 m. La roche en place se compose de gneiss charnockitiques et de mangerite. Les dépôts meubles (till) sont un mélange de sable et de gravier et contiennent généralement les mêmes minéraux que la roche mère. L'épaisseur de ces dépôts atteint 5 m et aucun affleurement de roche mère est observé.

Le sol est un podzol ferro-humique. La litière (horizon LF) et l'humus (H) agissent comme source des acides humiques (pH, 3.3); l'horizon minéral supérieur (Ae) est très lessivé tandis que les horizons inférieurs (B, C) servent comme lieux de précipitation pour la matière organique.

Le bassin est essentiellement forestier (sapinière à bouleau blanc). La végétation aquatique comprend des hydro-macrophytes qui occupent jusqu'à 50% de la superficie du lac.

La température varie de 34°C à -41°C avec une moyenne de 0.2°. La précipitation est de l'ordre de 1 430 mm dont le tiers est sous forme de neige. La fonte majeure de neige (300-350 mm) s'étend entre la mi-avril et la mi-mai. Pendant cette période le flux hydrologique représente 50% du flux annuel (Papineau 1989). La glace quitte le lac vers la mi-mai.

LA MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE.

Pendant les périodes d'avant-fonte et de fonte, printemps 1988, nous avons échantillonné les eaux suivantes: les eaux de fonte, les eaux de surface (tributaires, écoulement hypodermique et décharge du lac), la fonte de glace lacustre. Les eaux de fonte de neige ont été récoltées à l'aide d'un lysimètre installé dans un lieu ouvert de la forêt. Les eaux de surface ont été recueillies dans des bouteilles à leurs points d'entrée dans le lac. Les eaux de fonte de glace lacustre ont été échantillonnées sur la surface de la glace. Au commencement de la fonte, ces dernières sont surtout un mélange d'eaux de fonte de la glace lacustre et de fonte de neige.

Pour échantillonner la colonne d'eau sous la glace, nous avons utilisé un réseau de puits d'accès (Figure 1) percés à travers le couvert de glace avant le commencement de la fonte. Un total de 25 trous a été préparé dont plusieurs ont servi à la récolte des échantillons pour des analyses de composition ionique. Chaque puits était construit d'un manchon de PVC pour éviter l'écoulement des eaux de fonte de neige superficielle vers les eaux du lac. Une plaque de mousse synthétique (styrofoam) entourait chaque puits afin d'éviter un réchauffement local des eaux autour du manchon (Figure 2). L'échantillonnage des strates discrètes sous-jacentes à la glace a été réalisé en utilisant une sonde conçue à cette fin à partir d'une seringue (60 cm³), d'un tube en plastique (tygon), et d'une règle ajustable portant une aiguille (Figure 2). La période de collecte des échantillons s'étend du jour Julien 88 (29 mars) au jour Julien 139 (18 mai, 1988).

Les échantillons ont été conservés à 2°C, lors du transport, chambrés à 25°C au laboratoire et analysés pour la conductivité, le pH, et tous les cations et anions majeurs (sauf pour NH₄, HCO₃). Les analyses ont été exécutées selon les méthodes décrites par Jones et al (1984). Les résultats d'analyse apparaissent à l'annexe 1.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour faciliter la présentation, nous avons divisé la discussion en trois parties. La première décrit la chronologie de l'hydrologie du Lac Laflamme pendant la période de fonte 1988. La deuxième donne un aperçu de l'acidité et la géochimie globale des eaux tandis que la troisième établit les rapports plus précis entre l'évolution concomitante de l'acidité et celle des anions NO_3 et SO_4 pendant les périodes d'acidité élevée à la décharge du lac.

La chronologie de l'hydrologie du lac

Aucune chute de pluie a été enregistrée durant la période de fonte. Pendant le mois d'avril, 61 cm de neige sont tombés; surtout du 15 au 17 avril, 11 cm et le 18 avril, 27 cm. Aucune chute de neige n'a été enregistrée pendant la période de fonte au début de mai.

Figure 3c (Roberge et Jones, 1990) montre l'évolution du flux hydrologique pendant la période de fonte, les premières eaux de fonte provenant du couvert de neige furent observées le 26 mars (jour 85) et la fonte s'est terminée le 18 mai (jour 139). La contribution totale des eaux de fonte à l'écoulement sur le bassin versant du lac Laflamme fut d'environ 534 mm. La période de fonte s'est déroulée en quatre étapes; une première fonte (189 mm du jour 85 au jour 106), une période de refroidissement (jour 106 au jour 116). Une étape de réchauffement graduel (19 mm, jour 116 au jour 123), puis une fonte massive (323 mm, jour 124 au jour 139). Le ruissellement de surface est apparu au jour 124 (3 mai) à persisté 11 à 12 jours seulement et a diminué considérablement par la suite.

Le couvert de glace a perdu entre 300 et 350 mm d'eau pendant la première fonte; l'épaisseur de glace est restée stable pendant la période froide mais a fondu complètement entre le 3 et le 13 mai (jours 124 et 134), contribuant pour une quantité additionnelle de 400 à 450 mm d'eau de fonte au lac.

Les apports vers le lac pendant la première période comprennent, outre les apports provenant des eaux souterraines et ceux du tributaire principal, les apports directs des

eaux de fonte de neige en provenance des congères de la rive; la fonte du couvert de glace est aussi un apport majeur durant cette première période. Après la période de refroidissement, les eaux de fonte de glace deviennent progressivement plus importantes comme apport dans les strates supérieures de la colonne d'eau par rapport aux eaux de fonte des congères de rive, ceci jusqu'au jour 124 où la montée de la nappe phréatique provoque l'arrivée massive des eaux de ruissellement de surface sur la longueur de la rive. La figure 3 montre l'évolution de l'acidité à la décharge du lac et les résultats de l'expérience avec le traceur de rhodamine. La chronologie de ces apports affecte la qualité des eaux superficielles du lac (0-1 m) mais non les eaux profondes du lac qui sont durant toutes ces périodes alimentées essentiellement par les eaux souterraines.

L'acidité des eaux à la décharge du lac est le résultat d'un mélange des eaux de fonte, de ruissellement, de surface et des eaux profondes du lac évacuées en réponse au niveau hydrostatique. Un modèle prédictif simple de l'acidité des eaux lacustres basé sur le principe du mélange conservateur de ces eaux peut donc être envisagé dans la mesure où la biota ne contribue pas significativement à la dynamique de la composition géochimique des eaux de fonte printanière.

En conclusion, la chronologie hydrologique observée se divise en quatre étapes. La première fonte de neige a été suivie par une période de refroidissement, puis une période de réchauffement lente suivie d'une fonte massive qui a provoqué l'infiltration directe des eaux hypodermiques dans le lac. Les deux maxima d'acidité observés à la décharge du lac ont comme origines respectives, les toutes premières eaux de fonte provenant des congères de la rive pendant la première période de fonte, et l'arrivée de l'écoulement hypodermique dans le lac pendant la période de fonte massive.

La composition géochimique des eaux

Papineau (1989) a discuté la géochimie des eaux du lac Laflamme d'une façon intensive. Son analyse fondée sur les bilans ioniques (entrées/sortie du lac) de 1981-1988 pour les différentes phases du cycle hydrologique annuel, permet de relier l'évolution des eaux

du lac à l'acheminement des eaux de précipitation et de fonte à travers les divers compartiments et réservoirs du bassin versant. Nous nous sommes basé sur ces connaissances et les données de la présente étude pour discriminer plus précisément les différents apports (eaux de fonte, eaux de ruissellement et hypodermique) sous la glace pendant les périodes de forte acidité.

La composition géochimique globale des eaux de ruissellement et lacustres sont typiques de celles du bouclier Canadien; c'est-à-dire peu minéralisées et de faible conductivité. La figure 4 montre le rapport entre les cations ($H+Ca+Mg+Na+K$, $\mu eq L^{-1}$) et les anions pour tous les échantillons recueillis pendant la fonte printanière. Le rapport cations-anions est différent du rapport 1:1 attendu à cause du fait que les ions NH_4 , HCO_3 et la matière organique dissoute (Lazerte et Dillon, 1984) n'y sont pas inclus. Il illustre bien, cependant, la grande étendue des valeurs des ions mesurés pendant cette période.

Le rapport anions: conductivité, figure 5, suggère fortement que le phénomène de dilution est omniprésent pendant la fonte. La régression droite est typique d'un système doté d'un mélange de deux composantes; une d'une forte teneur en matière soluble, l'autre d'une teneur faible. Ce phénomène de dilution est illustré d'une façon plus évidente par les rapports cations: conductivité pour les différentes eaux, c'est-à-dire les eaux de ruissellement, les eaux de la décharge du lac et les eaux du lac seulement (figure 6). Ces dernières (lac), démontrent un rapport cations:conductivité (équation 1) qui est similaire à celui d'un modèle de mélange de deux composantes dont une est peu minéralisée et l'autre est fortement minéralisée. La composition géochimique de la colonne d'eau du lac représente, donc, en grande partie un mélange des vieilles eaux du lac, et/ou des eaux souterraines, avec les eaux de fonte de neige et de glace. Ces dernières possèdent, à l'exception des toutes premières eaux de fonte de neige, une conductivité très faible. Les écarts de comportement démontrés par certains échantillons du lac à ce modèle de mélange des eaux sont associés à la présence des eaux de ruissellement de surface pendant la fonte massive; la composition de ces eaux diffère d'une façon appréciable de celle des eaux du lac et des eaux souterraines. Le rapport cations:conductivité est plus bas (figure 6) à cause de la quantité élevée de matière organique humique et fulvique qui se trouve lessivée de l'horizon organique du sol

pendant le ruissellement hypodermique. Ces eaux se déchargent dans le lac sans passer par les voies d'écoulement typiques du bassin versant, c'est-à-dire par les horizons inférieurs du sous-sol où la matière humique y est précipitée et remplacée par l'alcalinité bicarbonate.

$$\text{Cations } (\mu\text{eq L}^{-1}) = 10.1 * \text{Conductivité } (\mu\text{S cm}^{-1}) - 41.14. \quad n = 63; r^2 = 0.96 \quad \text{Équation 1}$$

La figure 7 démontre plus clairement l'association de quelques échantillons du lac avec les eaux de ruissellement par le regroupement d'acidité et de conductivité pour les mêmes eaux que celles de la figure 6. La majorité des eaux du lac et tous les échantillons de la décharge du lac ont des teneurs en $\text{H}^+ < 10 \mu\text{eq L}^{-1}$ tandis que les eaux d'écoulement hypodermiques et celles des ruisseaux intermittents (Ruisseaux, figure 7) démontrent un niveau d'acidité plus élevé ($\text{H}^+ > 10 \mu\text{eq L}^{-1}$). Les eaux du lac ayant aussi une teneur d'acidité élevée sont les strates supérieures et sous-jacentes au couvert de glace.

Les figures 8 et 9 reproduisent la distribution relative des concentrations de cations entre les eaux peu profondes et profondes du lac (figure 8) et les eaux de ruissellement et celles de la décharge du lac (figure 9). Quoique la distribution peut être biaisée par le nombre d'échantillons et la méthodologie d'échantillonnage, les deux figures semblent démontrer cette correspondance entre l'écoulement et les strates supérieures de la colonne d'eau. Il faudrait noter, toutefois, que la composition géochimique des strates supérieures du lac est surtout le résultat du processus de dilution par la fonte de glace (figure 6); ces strates ne sont fortement influencées par l'écoulement hypodermique que pendant la fonte massive (figure 3).

Les figures 10 et 11 illustrent les différents comportements des eaux profondes et peu profondes, ces dernières ayant généralement des valeurs de conductivité plus basses que les eaux plus profondes. Il faudrait, toutefois, signaler à cette étape de la discussion que le comportement respectif des eaux profondes et peu profondes dans la colonne d'eau ne peut être généralisée à tout point du lac. En effet, le lac est un système qui se trouve dans un état plus ou moins hétérogène pendant les différentes périodes de fonte.

Par exemple, les parties du lac situées à proximité des sillons d'écoulement hypodermique de la rive (ex. séries HY, figure 1) sont plus susceptibles de monter des niveaux d'acidité élevés que les parties plus éloignées du lac (séries B et C).

Une comparaison entre les figures 7, 12 et 13 illustre ce point. La figure 7 regroupe l'acidité de toutes les eaux du lac (séries des puits d'accès A, B, C, D et HY), la figure 12 démontre le rapport $H^+ : SO_4$ pour tous les échantillons d'eau de l'étude, tandis que la figure 13 reproduit le rapport $H^+ : SO_4$ des eaux profondes (> 40 cm) et peu profondes (< 40 cm) des séries B et C seulement. La proximité de sites HY relativement au ruissellement des tributaires R5, R6, et du ruisseau hypodermique a comme résultat que les strates supérieures de la colonne d'eau à cet endroit du lac sont fortement influencées par l'écoulement riverain (voir ci-dessous). Par contre, les sites de séries B et C apparaissent moins influencés par l'écoulement hypodermique même si ils se trouvent à la même distance de la rive que ceux des séries HY. Les concentrations de H^+ dans les eaux peu profondes de sites B et C sont relativement basses ($< 12 \mu\text{eq L}^{-1}$, Figure 13). Ceci démontre l'importance de l'effet direct de l'écoulement hypodermique dans l'acidité des différentes régions du lac et par conséquent le rôle de la topographie du sol et du sous-sol dans le phénomène d'acidification épisodique des parties du lac à proximité des rives (frayères) du lac en période de fonte massive.

Les figures 12 et 13 ($H^+ : SO_4$), et 14 et 15 ($H^+ : NO_3$) démontrent qu'il n'y a pas de rapport significatif entre l'acidité et les concentrations des anions d'acidité forte. Nous avons aussi observé très peu de relations significatives entre les ions, sauf entre le Mg^{2+} et Ca^{2+} et le Na^+ et Ca^{2+} (figures 16 et 17). Dans ces cas, les rapports sont attribuables à l'origine pédologique et lithologique commune des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ (r^2 , Ca:Mg, 0.92; Ca:Na, 0.81) et le processus de dilution des vieilles eaux du lac par celles de la fonte.

A titre de conclusion, la composition géochimique globale des eaux du lac pendant la fonte est le résultat du mélange des vieilles eaux lacustres avec les eaux très peu minéralisées de la fonte de neige et de la glace. Ce mélange des eaux se confine surtout dans les strates supérieures. En période de fonte massive, l'effet de dilution est contrecarré par l'arrivée des eaux du ruissellement hypodermique dont l'acidité est élevée. Les parties du lac à proximité des points d'entrée de l'écoulement hypodermique montrent, donc, des niveaux d'acidité plus élevés que les parties éloignées.

L'évolution concomitante de l'acidité et la composition ionique des eaux

La figure 18 reproduit l'évolution de l'acidité et de la concentration des cations à la décharge du lac des jours 105 à 138. Les deux maxima d'acidité (jour 107 et jours 120-130) sont accompagnés ou précédés par des réductions significatives dans les concentrations cationiques. Entre ces deux périodes, le froid empêche la fonte, les eaux récupèrent partiellement le niveau initial de minéralisation, et les concentrations des cations restent relativement stables.

La dilution, toutefois, des eaux des strates supérieures du lac par les eaux de fonte pendant la première période d'acidité est beaucoup moins marquée que la dilution pendant la deuxième période. Ceci s'explique par un taux de fonte plus important durant la seconde période (figure 3) et par l'arrivée dans le lac des eaux de ruissellement d'une concentration en cations plus faible que celle des eaux lacustres (figure 6). La figure 19 démontre que les concentrations de SO_4 subissent aussi des baisses que l'on associe aux mêmes phénomènes de dilution par les eaux de fonte (SO_4 de la fonte < SO_4 , $\sim 100 \mu\text{eq L}^{-1}$, eaux pré-fonte du lac) et, dans une moindre mesure, à l'écoulement hypodermique dont la teneur en SO_4 est de $70\text{-}80 \mu\text{eq L}^{-1}$ (figure 20).

Par contre, l'évolution de NO_3 est plus complexe. Le maximum d'acidité du jour 107 est associée avec un pic de NO_3 que nous avons attribué à l'arrivée à la sortie du lac d'une charge des toutes premières eaux de fonte en provenance des congères de neige de la rive (Roberge et Jones, 1990). Suite à cet événement, le comportement de NO_3 devient plus complexe et ne se conforme pas au modèle de dilution proposé ci-haut. En effet, pendant la période de refroidissement, les concentrations de NO_3 ne se stabilisent pas comme celles des cations et du SO_4 ; au contraire, les concentrations de NO_3 oscillent entre 0 et des valeurs qui diminuent progressivement jusqu'à l'arrivée des eaux d'écoulement hypodermique dans le lac. A ce moment-là, les eaux à la décharge contiennent très peu ou pas du tout de NO_3 . En se basant sur les valeurs de SO_4 et en assumant que le modèle simple de dilution s'applique, on s'attendrait à des concentration de NO_3 de $5\text{-}8 \mu\text{eq L}^{-1}$ et de H^+ de $15\text{-}20 \mu\text{eq L}^{-1}$ pendant la période de dilution maximale de la fonte massive. La plupart des valeurs de NO_3 sont voisines de 0 et l'acidité n'excède pas $10 \mu\text{eq L}^{-1}$.

Les résultats de l'évolution de NO_3 avant et pendant la deuxième période d'acidité (la fonte massive) nous conduisent à envisager la possibilité d'une assimilation biotique de NO_3 par les organismes planctoniques et/ou benthiques dans le lac ou à la décharge du lac. Afin d'évaluer l'envergure de ce phénomène, nous avons examiné les profils chimiques dans la colonne d'eau au jour 103 (à la fin de la première fonte et au commencement de la période froide) au jour 131 (pendant la fonte massive et les dernières heures de l'existence du couvert de glace).

Le profil (figure 21) de H, NO_3 et SO_4 le 12 avril (jour 103) au site C10 (10 m de la rive) est représentatif d'eaux de fonte relativement diluées ($\text{NO}_3 \sim 10 \mu\text{eq L}^{-1}$) qui ont remplacé les premières eaux de fonte en provenance des congères de neige riveraines de la première semaine d'avril. Ces eaux ne progressent que très lentement sous la glace (1 m heure^{-1}); par exemple, le délai requis pour le déplacement de masse de la strate d'eau, responsable de l'acidité au jour 107 à la décharge du lac, aurait été d'environ 8 jours si son origine se situait dans le secteur B et C (les secteurs les plus exposés au rayonnement solaire).

Plus loin de la rive au site C20 (figure 22) le profil d'eau montre des concentrations de SO_4 et NO_3 et de H plus élevées dans les strates supérieures ($\text{SO}_4 \sim 70 \mu\text{eq L}^{-1}$; $\text{NO}_3 \sim 20 \mu\text{eq L}^{-1}$) que celle que l'on retrouve en C10. Les profils respectifs de SO_4 et de NO_3 en C20 sous-jacentes à la glace ont comme origines les eaux de fonte; il est difficile de distinguer la contribution relative des eaux de fonte de neige en provenance de la rive (qui ont précédé les eaux de fonte en C10), et les eaux de la fonte du couvert de glace à la composition chimique des eaux en C20. Le profil chimique (figure 23) de NO_3 en C40 (40 m de la rive) montre aussi un profil de NO_3 dont les valeurs de concentration sont plus élevées ($\sim 25 \mu\text{eq L}^{-1}$) encore que celles de C20, et dont la strate de concentration élevée de NO_3 est aussi plus épaisse ($\sim 30 \text{ cm}$ contre 20 cm pour C20). L'acidité est, toutefois, plus basse ce qui suggère un mélange progressif des eaux de fonte avec des vieilles eaux du lac en s'éloignant de la rive.

La situation n'a guère changée deux jours plus tard au commencement de la période froide en B20 et B40 dont les profils (figures 24 et 25) sont similaires à ceux de C20 et

C40 sauf que dans le cas de sites B le degré de dilution des eaux sous-jacentes à la glace est plus élevé qu'aux sites C.

Les figures 26-35 reproduisent les profils soit cationiques et anioniques ou cationiques des sites B et C le 18 avril en pleine période de refroidissement quand la fonte s'arrête et qu'aucune décharge des bancs de neige ou de glace n'est enregistrée. Les profils cationiques des sites B10, B20 et B40 (figures 26, 28 et 30) et des sites C5, C10, C20, C40 et C60 (figures 31, 32, 33, 34, 34 et 35) démontrent que des eaux en provenance des horizons inférieurs du sol et du sous-sol remplacent alors progressivement les eaux de fonte dans cette partie du lac. On peut noter, par exemple, la minéralisation accrue des eaux (figures 26, 28, 30) en B10 (Ca^{2+} 120 $\mu\text{eq L}^{-1}$, 0 m) par rapport à B20 (95 $\mu\text{eq L}^{-1}$, 0 m) et B40 (62 $\mu\text{eq L}^{-1}$, 0 m). Dans le cas des sites C la minéralisation progressive par la contribution de l'écoulement souterrain donne comme résultat des concentrations de Ca^{2+} à 0 m de 153, 107, 74 et 56 $\mu\text{eq L}^{-1}$ aux sites C10, C20, C40 et C60 respectivement (figures 32, 33, 34, 35). Cette eau de remplacement s'infiltré dans le lac à un lieu qui se situe à plus de 5 m de la rive; ceci explique les eaux "résiduelles" relativement diluées (Ca^{2+} , 72 $\mu\text{eq L}^{-1}$) et d'apparence plus stagnante du site C5 par rapport aux sites C10 et C20

Une comparaison des profils de H, NO_3 et de SO_4 au site B20 le 14 avril (figure 24) et le même profil le 18 avril (figure 29) démontre aussi le processus de remplacement des eaux de fonte sous-jacentes à la glace par des eaux plus chargées en SO_4 . On observe, de plus, sur cette figure la diminution de NO_3 entre 10 et 20 cms. Quoique cette baisse de concentration est plus grande que celle attendue en comparaison avec le profil de SO_4 , il est difficile de juger si cette perte apparente de NO_3 est significative. Toutefois, le profil de NO_3 au site B20 (figure 37) le 25 avril (jour 116, encore en période froide) est remarquable par l'absence de NO_3 entre les profondeurs de 10-20 cm. Une comparaison similaire des profils de SO_4 et de NO_3 au site B10 le 18 avril (figure 27) et le 25 avril (figure 36) ne démontre aucun changement significatif tandis qu'une comparaison des profils des cations dans le même secteur du lac (B40) le 18 avril (figure 30) et le 25 avril (figure 38) ne sont guère différents. Nous reconnaissons les limites de la comparaison des profils dans le temps dans un système qui démontre une hétérogénéité à la fois spatiale et temporelle. Cependant, pendant cette période froide le

lac a été relativement statique et nous considérons qu'une telle comparaison peut permettre d'élucider la source de changements réels. Ces résultats nous amènent, donc, à proposer que la baisse de NO_3 est bien réelle et reliée avec l'activité microbiologique du milieu.

Le 2 mai (jour 123) le réchauffement commence et la fonte redémarre. Une dilution des eaux sous-jacentes à la glace aux sites B20 (figure 39) et B40 (figure 40) est observée, les eaux au site B40 étant plus diluées que celles de B20. La figure 39 démontre, de plus, que le profil de NO_3 s'est rétabli puisqu'il apparaît relativement homogène (13-19 $\mu\text{eq L}^{-1}$). Comparativement aux profils observés en période froide (18-25 avril) les eaux du lac sont plus dynamiques; il est cependant difficile de se prononcer sur les changements chimiques 'in situ' vu le mouvement concomitant des eaux à travers le lac.

La difficulté d'interpréter ces profils relève entre autres du fait que la variabilité spatiale est relativement grande quand les eaux se déplacent sous couvert de glace. Les figures 41 et 42 montrent les profils cationiques de deux sites, C20 et C*20, chacun 20 m de la rive mais séparés de 10 m le 2 mai (jour 123). La différence entre le degré de dilution des eaux sous-jacentes à la glace (Ca^{2+} , 55 $\mu\text{eq L}^{-1}$, C20; 115 $\mu\text{eq L}^{-1}$, C*20) est le résultat, soit des écoulements préférentiels sous la glace, soit des entrées d'eau de fonte privilégiées à travers le couvert de glace (Gunn et Keller, 1984).

Le 6 mai (jour 127) la fonte massive est en plein essor avec écoulement direct des eaux hypodermiques dans le lac (figure 3) et fonte très rapide du couvert de glace. Les eaux sous-jacentes au couvert de glace en B20 sont, donc, très diluées (figure 43). L'acidité est alors relativement élevée mais les concentrations de NO_3 sont encore très faibles (figure 44). Dans leur étude de la discrimination des eaux, Roberge et Jones (1990) ont souligné la grande influence de l'écoulement hypodermique sur la chimie des eaux à 20-40 cm de profondeur entre la strate d'eau supérieure de fonte de glace et les strates inférieures des eaux souterraines. L'expérience de traçage à la rhodamine révèle que le site B20 est influencé par l'écoulement hypodermique (figure 1); il est donc fortement possible que les faibles concentrations de NO_3 soient reliées autant à la composition chimique des eaux hypodermiques qu'à l'assimilation biotique du milieu.

Les figures 45-50 qui reproduisent le profil anionique (figures 45 et 46) du site HY (H10 de la figure 1), du site HY+ (figure 47) situé à 10 m à l'est de HY le 9 mai, et de l'évolution de la composition chimique des ruisseaux en face de ces sites pour le même jour (figures 48-50) appuient cette thèse. Le matin (11:00 hr), les eaux sous-jacentes à la glace au site HY (figure 45) sont fortement diluées par les eaux de fonte de la glace (SO_4 , 0 m, $32 \mu\text{eq L}^{-1}$; 10 cm, $65 \mu\text{eq L}^{-1}$). À 16:00 hr l'entrée massive des eaux de fonte domine le profil de HY (figure 46) et de HY+ (figure 47). L'acidité et la concentration de SO_4 dans les eaux sous-jacentes à la glace sont alors similaires à celles de l'écoulement hypodermique (figure 48) et à celles de ruisseaux R5 (figure 49) et R6 (figure 50). Par exemple, HY à 0 m, 16:00 hr, H atteint $20 \mu\text{eq L}^{-1}$; SO_4 , $55 \mu\text{eq L}^{-1}$ (Figure 46) et R6 à 16:00 hr, H atteint $22 \mu\text{eq L}^{-1}$; SO_4 , $56 \mu\text{eq L}^{-1}$ (Figure 50).

Toutefois, l'analyse est plus difficile à établir pour le NO_3 . Au site HY et HY+ les concentrations de NO_3 sont essentiellement $0 \mu\text{eq L}^{-1}$ en avant-midi et en après-midi, tandis que les concentrations de NO_3 sont stables dans l'écoulement qui effleure la surface (hypodermique) ($10 \mu\text{eq L}^{-1}$, 11:00 et 16:00 hrs, figure 48) mais fluctuent davantage ($0-30 \mu\text{eq L}^{-1}$) dans les ruisseaux plus canalisés R5 (figure 49) et R6 (figure 50). Les valeurs minimales de NO_3 sont dues, soit, à la dénitrification des eaux de percolation dans les horizons de sol sous l'horizon organique, soit, à l'assimilation de NO_3 dans la zone racinaire par la végétation proche du lac. Les eaux ayant moins de contact avec ces zones (e.g. les eaux d'écoulement rapide de surface et hypodermique) retiennent plus facilement leurs charges d'azote durant leur cheminement vers le lac. Cette hypothèse d'une forte rétention de NO_3 dans les horizons sous-jacents à l'horizon organique concorde avec la composition connue des eaux souterraines (Papineau, 1989) et les résultats des travaux sur l'évolution de la composition chimique des eaux de fonte pendant l'infiltration dans le sol forestier (Thomassin, communication personnelle).

Finalement, les figures 51 et 52 donnent un aperçu des phénomènes en jeu dans le lac (site K20) pendant la fonte massive. Les eaux immédiatement sous-jacentes à la glace (0-10 cm) sont des eaux de fonte de glace, très peu minéralisées, d'une acidité moyenne ($9 \mu\text{eq L}^{-1}$). Les eaux entre 10 et 40 cm ont comme origine le ruissellement de surface et hypodermique ayant une acidité élevée (vu le mélange restreint avec les eaux supérieures peu tamponnées) et une concentration de NO_3 de $0-10 \mu\text{eq L}^{-1}$. Au dessous

de 40/60 cm les eaux proviennent des horizons supérieurs du sol, l'acidité est basse (vu le mélange restreint avec les anciennes eaux plus profondes) et les concentrations de NO_3 très minimes.

A la profondeur de 20 cm, où on trouve des concentrations de NO_3 et de H les plus élevées, il est possible que la concentration de NO_3 représente le mélange des eaux relativement plus riche en écoulement hypodermique (qui retient sa charge en azote, figure 48) que celui ayant traversé les horizons du sol plus profondément avant d'atteindre le lac (Ruisseaux R5 et R6, figures 48 et 49). Il est aussi possible que cette concentration de NO_3 provienne des eaux de fonte des chutes de neige (et de glace) en provenance du couvert de glace qui ont précédé les eaux moins chargées de la même origine. En effet, les cycles diurnes de température provoquent le dégel et le regel de eaux de fonte sur le couvert de glace qui est mis en évidence par le cycle diurne de concentrations des ions que l'on observe dans les strates supérieures des eaux du lac.

Cette dernière explication n'est cependant que partielle puisque la concentration de NO_3 à 0 m est plus basse que la valeur attendue à partir du rapport de concentrations de $\text{SO}_4:\text{NO}_3$ à 20 cm. Si les processus de contrôle des concentrations de SO_4 et de NO_3 ne sont que physiques (dégel-regel et lessivage ionique du couvert) la concentration de NO_3 à 0 m (figure 51) aurait dû être $5-6 \mu\text{eq L}^{-1}$ et non 0. On pourrait invoquer l'activité biologique comme le facteur pouvant ainsi modifier la distribution de l'azote, mais les données d'étude ne nous permettent de déterminer l'envergure de ce phénomène pendant la fonte massive. Il est à noter que la prise en charge de NO_3 est accompagnée par une réduction concomitante de l'acidité. Les processus biologiques, soit, dans le sol, soit, dans les eaux du lac ont, donc, un rôle important à jouer dans le comportement de l'acidité dans le lac au printemps.

En conclusion, l'évolution physico-chimique à la décharge du lac et les profils chimiques de la colonne d'eau démontrent que l'acidité pendant la première étape de la fonte est le résultat d'un pulse de eaux de fonte de neige dont la composition comprend une teneur en NO_3 élevée accompagnée par une dilution des cations. Par contre, l'acidité des eaux pendant la fonte massive est accompagnée par une teneur très faible en NO_3 et un taux de dilution des cations plus élevé. La diminution de NO_3 est due croyons nous, aux processus biologiques dans le sol et, en toute probabilité, 'in situ' dans les eaux du lac.

Comparaison des résultats de cette étude avec ceux rapportés dans la littérature

Il y a une profusion d'études rapportées dans la littérature sur l'acidification épisodique des eaux de ruissellement et des lacs pendant la fonte printanière (ex. Jeffries et al, 1979; Galloway et al, 1987; Molot et al, 1989). Toutefois, il n'y a que peu d'études dont les données peuvent fournir assez d'information pour comparer le comportement de NO_3 avec celui du Lac Laflamme. Le problème principal relève du fait que la méthodologie des autres études n'est pas assez précise pour établir une discrimination spatiale et temporelle des eaux durant les différentes étapes de la fonte.

Contrairement à la présente étude où les profils chimiques ont été établis à partir d'un échantillonnage à tous les 5, 10 ou 20 cm et des collectes journalières multiples, les autres études réfèrent à la collecte d'échantillons par mètres ou tranches de mètres à une fréquence hebdomadaire ou mensuelle. Molot et al (1989) ont, toutefois, échantillonné des apports de ruisseaux dans trois bassins d'Ontario, tous les jours (ou deux et trois jours) pendant les fontes de 1984-1986, et Gunn et Keller (1984) ont récolté des échantillons dans les eaux peu profondes du lac Whitepine (Ontario) à tous les quatre ou cinq jours pendant la fonte de 1982.

Tous ces auteurs ont observé l'augmentation de NO_3 dans les lacs (et/ou les ruisseaux) au commencement de la fonte. Ceci est attribué à la décharge des eaux concentrées en NO_3 par les bancs de neige, quoique Galloway et al (1987) ont proposé que la nitrification dans les horizons du sol aurait pu aussi contribuer aux teneurs élevées en NO_3 dans le cas du lac Panther dans l'état de New York. Par la suite, les baisses de concentrations de NO_3 rapportées dans tous les cas ont été attribuées soit aux dernières eaux de fonte diluées soit à l'assimilation biotique 'in situ'. La thèse de dénitrification et son rôle dans l'acidification épisodique n'a pas été abordée. Il est possible que ce processus puisse être plus important au lac Laflamme (et/ou dans tous les lacs de la forêt boréale) qu'ailleurs. Ceci reste à vérifier.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les pointes d'acidité au lac Laflamme pendant la fonte de 1988 sont dues en grande partie à la dilution des concentrations des cations par les eaux de fonte. De plus, la première pointe d'acidité est reliée à l'arrivée dans le lac des premières eaux de fonte fortement chargées en NO_3 . Par contre, la deuxième pointe d'acidité pendant la fonte massive comprend des concentrations minimales de NO_3 . Nous suggérons que cette baisse de concentration est le résultat de dénitrification dans le sol et, en toute probabilité, d'une assimilation de NO_3 dans la zone des racines et 'in situ' dans le lac.

Afin de valider cette hypothèse, nous recommandons qu'une étude extensive et intensive de l'évolution des composés azotés pendant la fonte printanière soit entreprise. L'étude devrait comprendre une étude extensive de nature mais restreinte spatialement sur l'évolution physico-chimique de la colonne d'eau proche de la rive complétée par des travaux intensifs sur l'écoulement dans des eaux dans les horizons du sol à l'aide de traceurs et par analyse de la composition chimique. L'étude devrait comprendre des expériences hydrologiques de contrôle (rideaux de séparation de eaux) et des expériences de mesure de l'activité biologique par l'utilisation de ^{15}N .

En restreignant l'étude à une partie du lac et à sa rive connexe seulement, nous serons en mesure de mieux comprendre les processus d'interaction eaux-sol-sédiments-lac et de prédire les arrivées respectives des eaux de fonte et des eaux des horizons du sol dans le bassin. Le peu de connaissance du cycle de N dans le sol et les eaux de la forêt boréale exige une approche expérimentale. Afin de comprendre et de prédire l'évolution de l'acidité des eaux due aux dépôts de N, il nous faut des données quantitatives sur la dynamique de N. Par la suite, les connaissances déjà acquises lors des études antérieures sur les modèles de fonte de neige et de glace, de mélange des eaux et de comportement hydraulique du lac, nous permettons de simuler les pointes d'acidité à la décharge du lac.

RÉFÉRENCES

Baker, J.P., Gherini, S.A., Christensen, S.W., Munson, R.K., Driscoll, C.T., Newton, R.M., Gallagher, J., Reckhow, K.H. et Schofield, C.L. (1990) Adirondack lakes survey: An interpretive analysis of fish communities and water chemistry, 1984-1987. Adirondack Lakes Survey Corporation, Ray Brook, New York, 12977. 280 pages et 4 annexes.

Galloway, J.N., Henrey, G.R., Schofield, C.L., Peters, N.E. et Johannes, A.H. (1987) Processes and causes of lake acidification during spring snowmelt in the West-central Adirondack Mountains, New York. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44: 1595-1602.

Gunn, J.M. et Keller, W. (1984). Spawning site water chemistry and lake trout (*Salvelinus namaycush*) sac fry survival during spring snowmelt. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 41: 319-329.

Jeffries, D.S., Cox, C.M. et Dillon, P.J. (1979) Depression of pH in lakes and streams in central Ontario during snowmelt. *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 640-646.

Jones, H.G., Sochanska, W., Gauthier, J.M., Bougie, R. et Charette, J.Y. (1984). Développement d'une méthodologie d'étude sur les facteurs controlant la qualité des eaux de fonte et des eaux de ruissellement printanier au Lac Laflamme, Québec. INRS-Eau, RS 165, Pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures, Région de Québec, 145 pp.

Kelly, C.A., Rudd, J.W.M. et Schindler, D.W. (1990) Acidification by nitric acid -future considerations. *Water, Air, and Soil Pollution* 50: 49-61.

LaZerte, B.D. et Dillon, P.J. (1984) Relative importance of anthropogenic versus natural sources of acidity in lakes and streams of central Ontario. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 41: 1664- 1677.

Molot, L.A., Dillon, P.J. et Booth, G.M. (1990) Whole-lake and nearshore chemistry in Bowland lake, before and after treatment with CaCO_3 . *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47: 412-421.

Molot, L.A., Dillon, P.J. et LaZerte, B.D. (1989) Factors affecting alkalinity concentrations of streamwaters during snowmelt in central Ontario. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1658-1666.

Papineau, M. (1989) Bilans ioniques et changements dans la qualité de l'eau au bassin calibré du lac Laflamme de 1981 a 1988. Rapport d'activité, Environnement Canada, Région de Québec, Conservation et Protection, Direction des eaux intérieures. 156 pages avec annexes.

Roberge, J et Jones, H.G.(1990) Sub-ice layering and origin of acidic waters in a small boreal lake during the spring runoff. *Water Resour. Res.* (accepte, aout 1990).

Wigington, P.J., Davies, T.D., Tranter, M. and Eshelman, K.N. (1990). Episodic acidification of surface waters due to acidic deposition. State-of-Science Technology, Report 12. National Acid Precipitation Assessment Program, Washington, D.C.

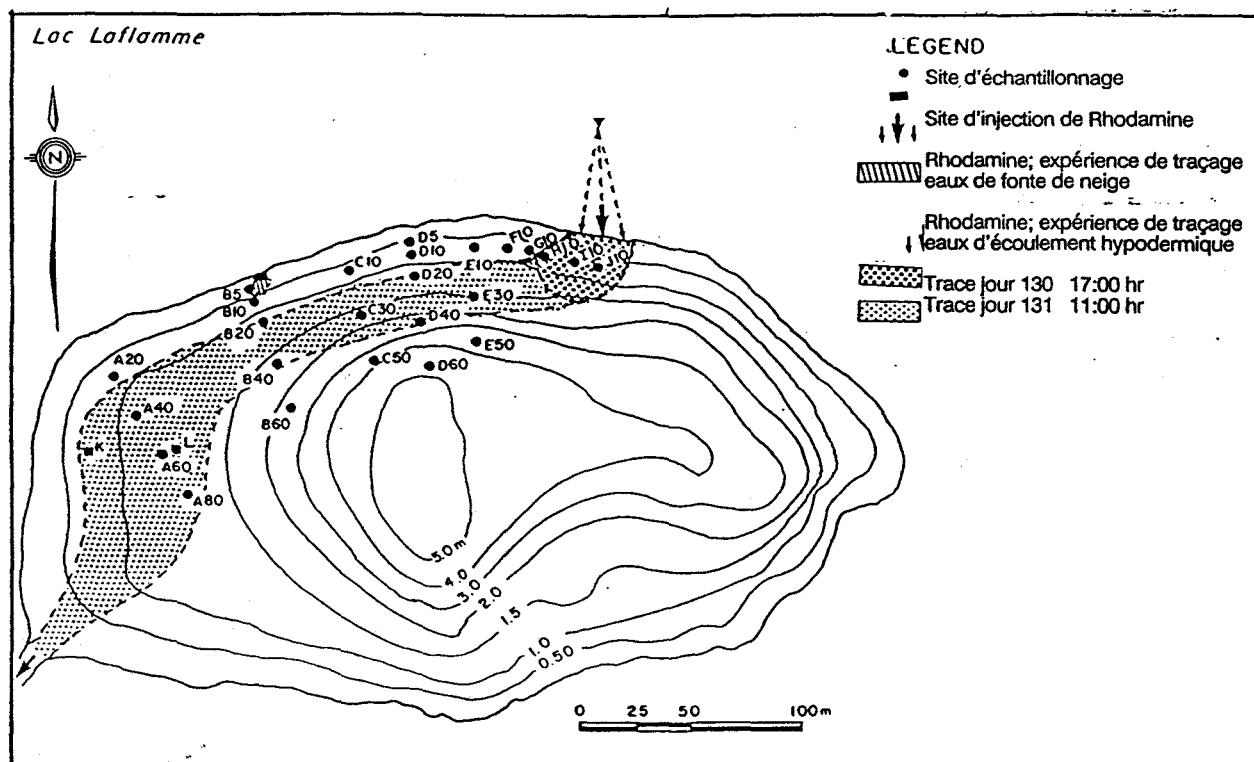


Figure 1: La méthodologie d'étude du flux géochimique dans le Lac Laflamme, printemps 1988. La figure démontre la bathymétrie du lac, les sites d'étude de profils chimiques de la colonne d'eau (Séries A-L), et les trois lieux d'entrée des ruisseaux (R5, R6 et écoulement hypodermique) dans le lac en face des séries H, I, J (reproduit de Roberge et Jones, 1990).

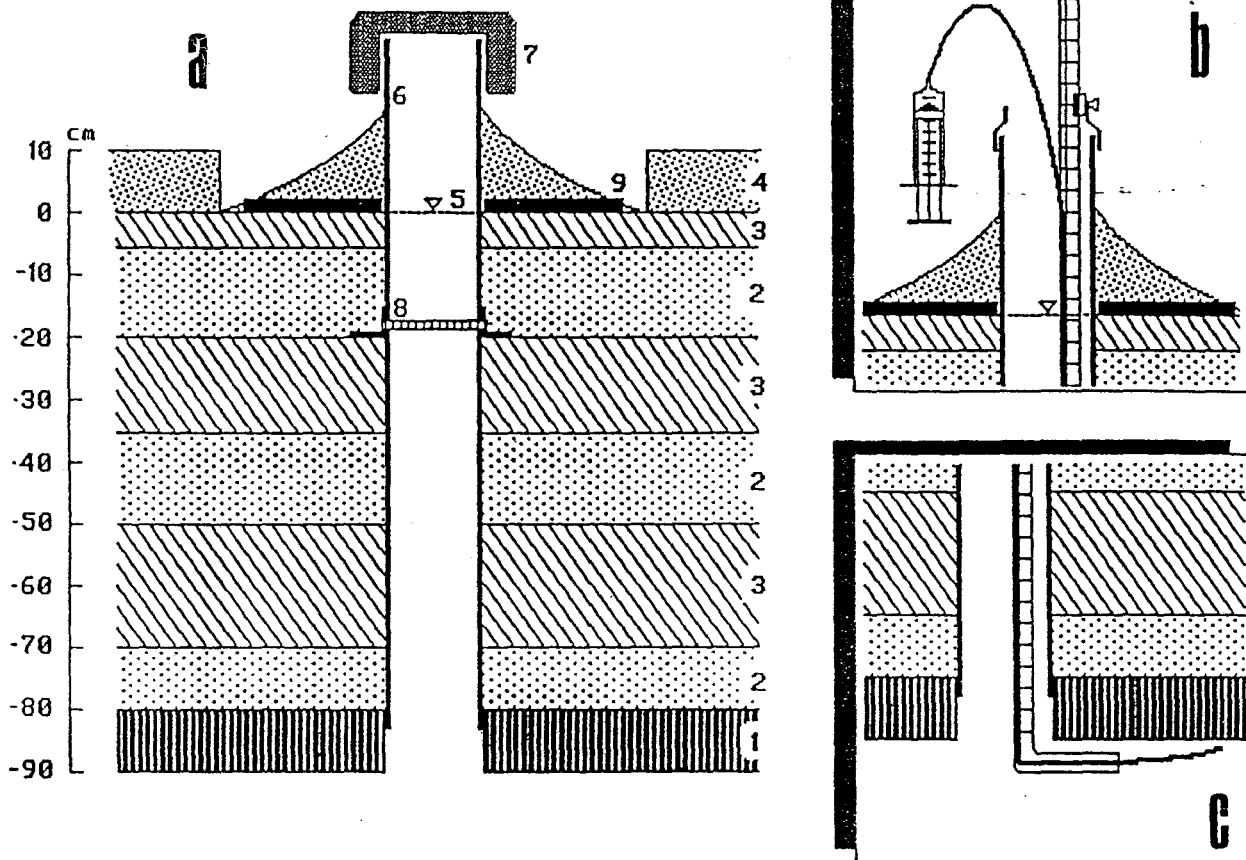


Figure 2:

La méthodologie de prélèvement des échantillons d'eau pour l'étude des profils chimiques de la colonne d'eau. a) (1) glace noire; (2) glace blanche; (3) eau de fonte de glace; (4) neige; (5); niveau hydrostatique; (6) puits d'accès de PVC; (7) capuchon de mousse synthétique (styrofoam); (8) support; (9) plaque de mousse synthétique (styrofoam). b) la seringue de prélèvement. c) la sonde de prélèvement (reproduit de Roberge et Jones, 1990).

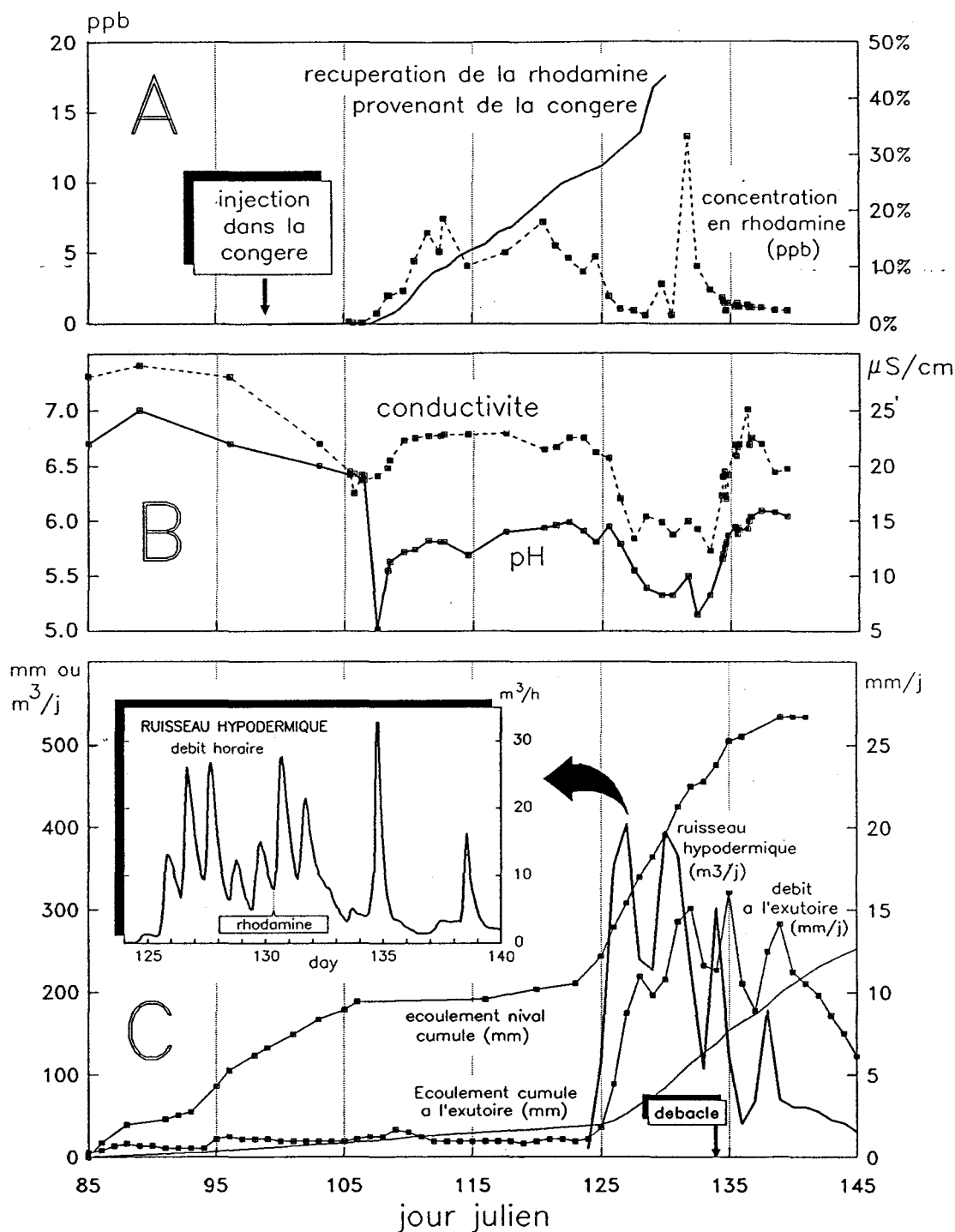
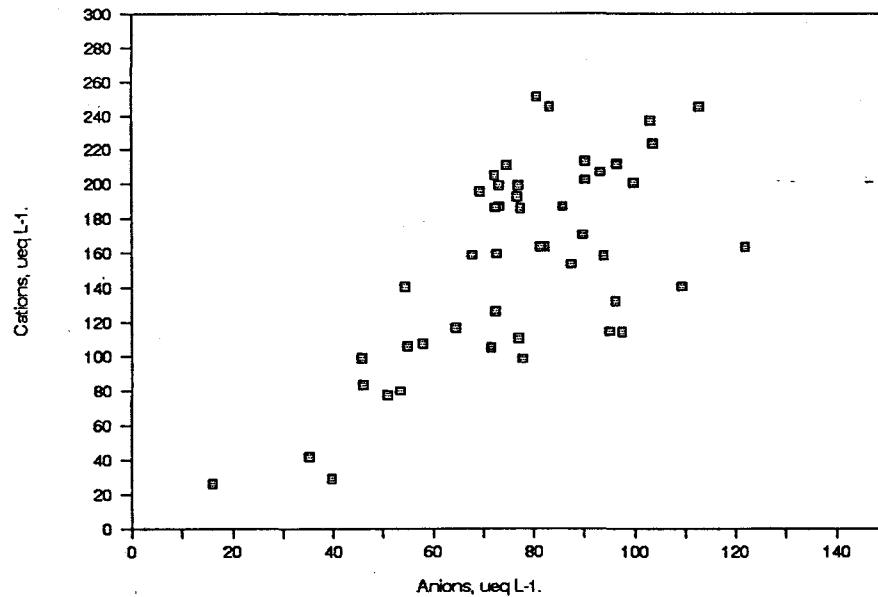


Figure 3: La chronologie de l'hydrologie et hydrogéochimie (conductivité, pH) du lac Laflamme, printemps 1988. La figure démontre (a) l'évolution du traceur de rhodamine; (b) l'évolution du pH et de la conductivité à la décharge du lac; et (c) la lame d'eau cumulative des eaux de fonte de neige et de la décharge du lac, et le débit journalier de l'écoulement hypodermique et la décharge du lac (reproduit de Roberge et Jones, 1990).

Eaux adjacentes à la glace: Anions v. Cations.



Eaux adjacentes à la glace: Anions v. Cond.

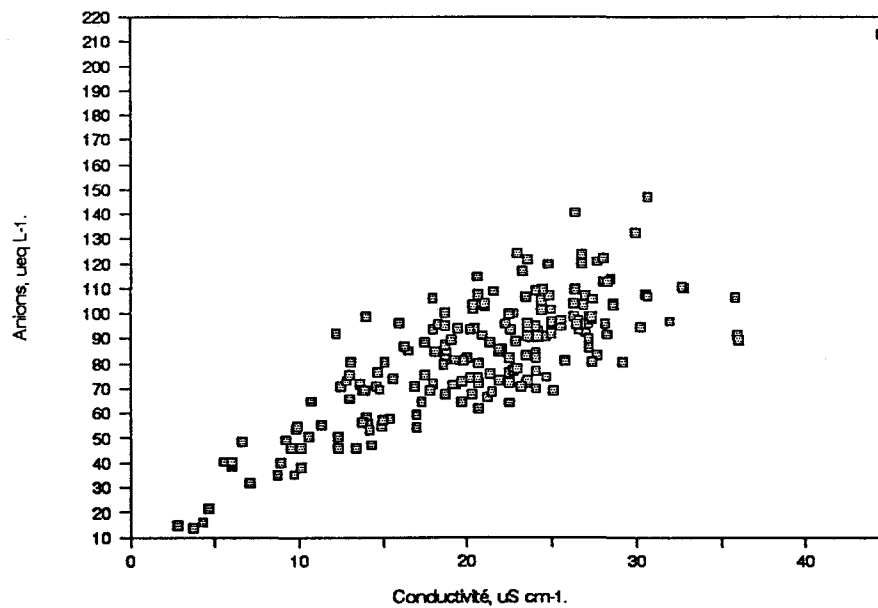
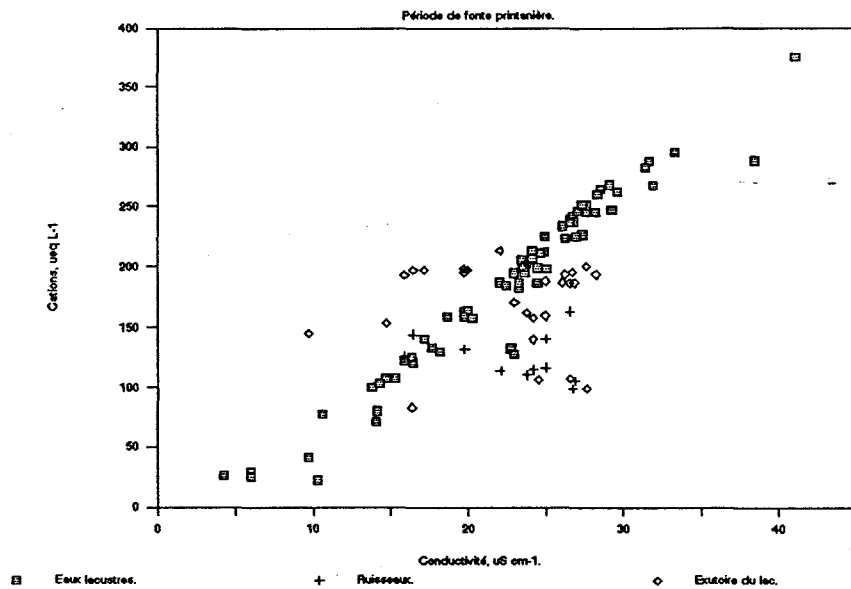


Figure 4: Anions vs cations pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique et décharge du lac), Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 5: Anions vs conductivité pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique et décharge du lac), Lac Laflamme, printemps 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v Cond.



Eaux adjacentes à la glace: H+ v Cond.

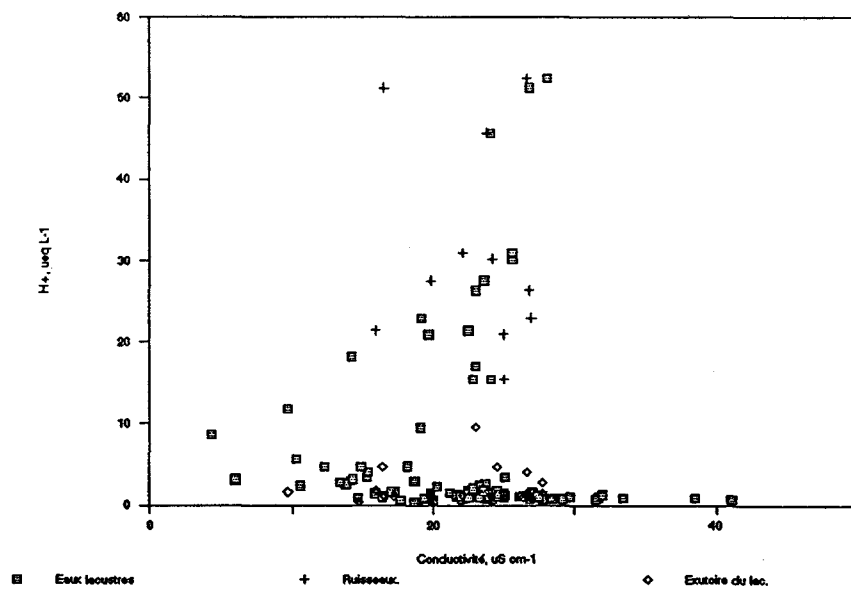
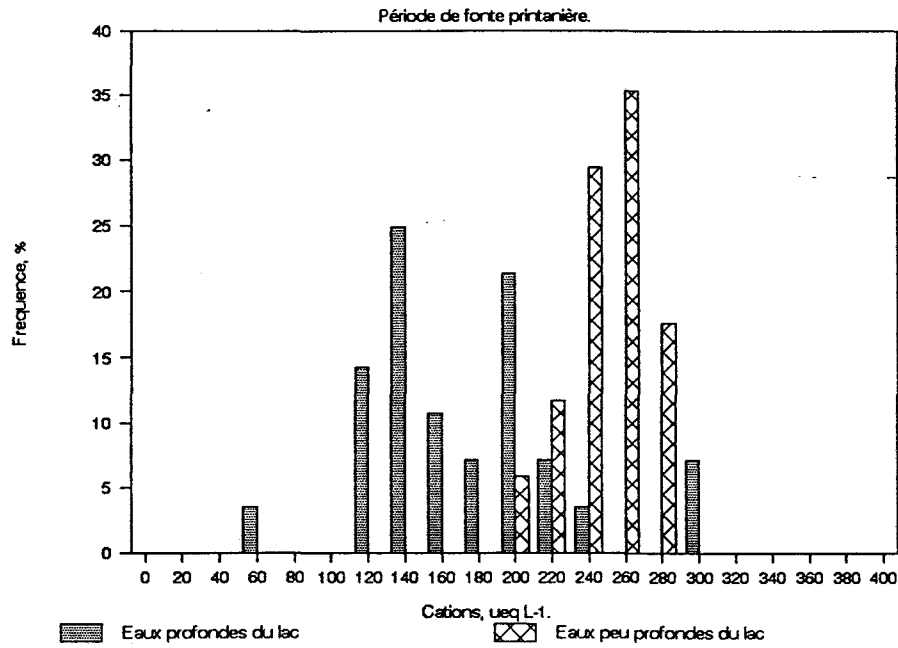


Figure 6: Cations vs conductivité pour tous les échantillons (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge du lac) Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 7: H⁺ vs conductivité pour tous les échantillons (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge du lac) Lac Laflamme, printemps 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Distribution de fréquences.



Eaux adjacentes à la glace: Distribution de fréquences.

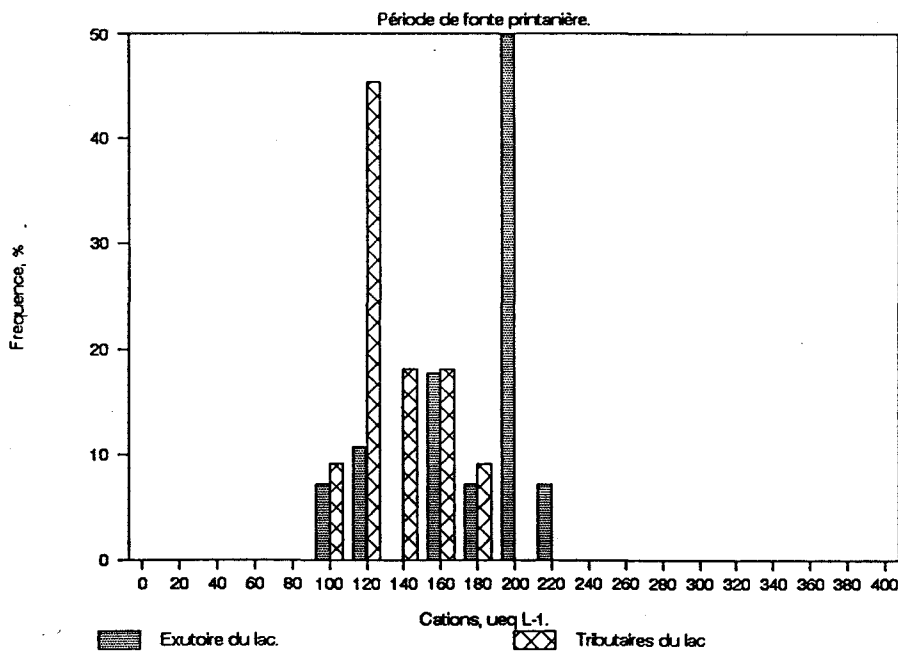


Figure 8: Distribution des cations parmi les eaux peu profondes < 40 cms, et plus profondes > 40 cm, Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 9: Distribution des cations parmi les eaux de décharge du lac et les tributaires, Lac Laflamme, printemps 1988. Les figures démontrent l'étroite correspondance entre les tributaires (R5, R6 et ruissellement hypodermique) et les strates supérieures du lac pendant la période de fonte massive.

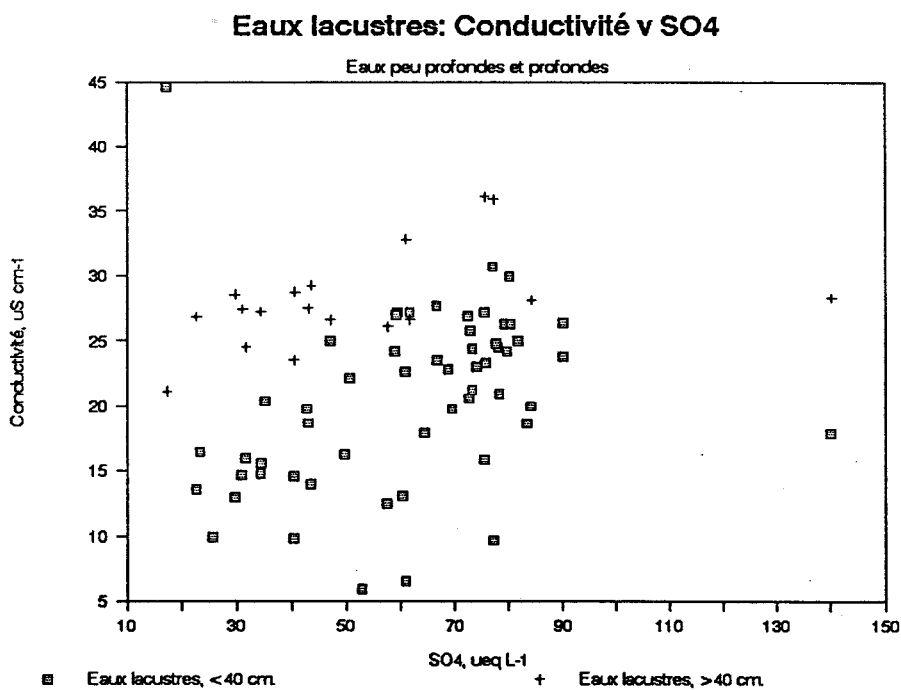
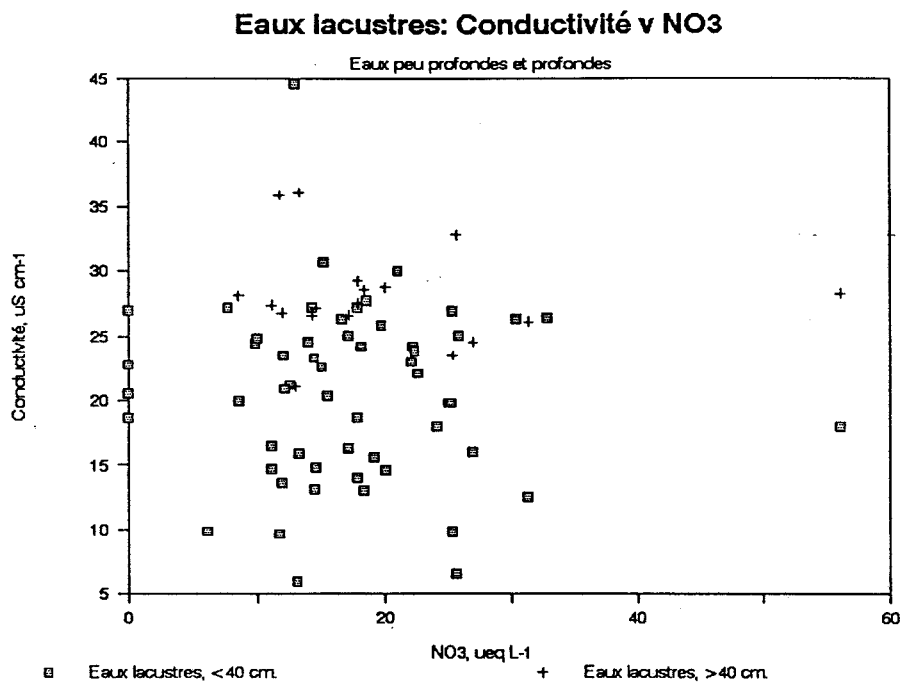
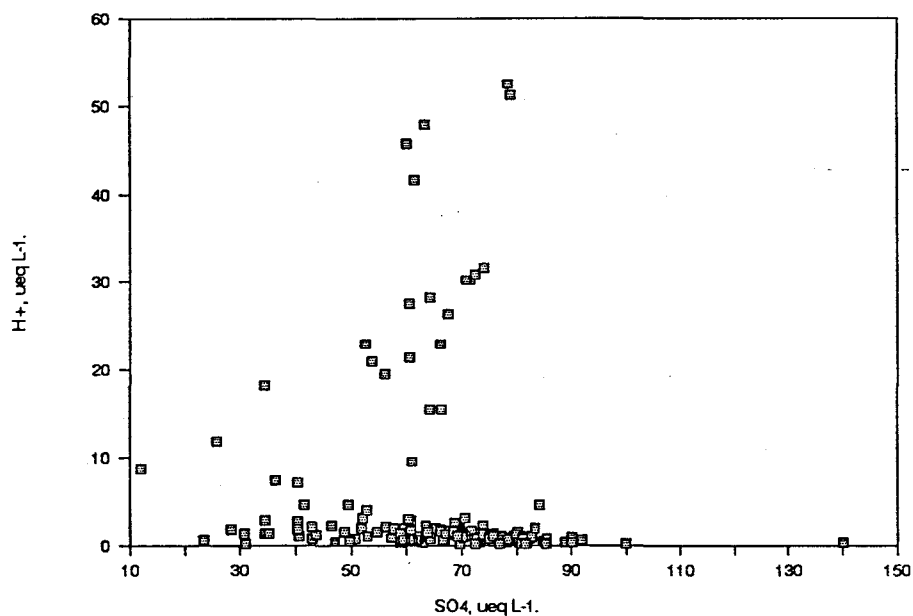


Figure 10: Conductivité vs NO₃ pour les eaux du lac du Lac Laflamme sous couvert de glace, printemps 1988.

Figure 11: Conductivité vs SO₄²⁻ pour les eaux du lac du Lac Laflamme sous couvert de glace, printemps 1988.

Eaux adjacentes à la glace: H+ v. SO4



Eaux lacustres: H v SO4

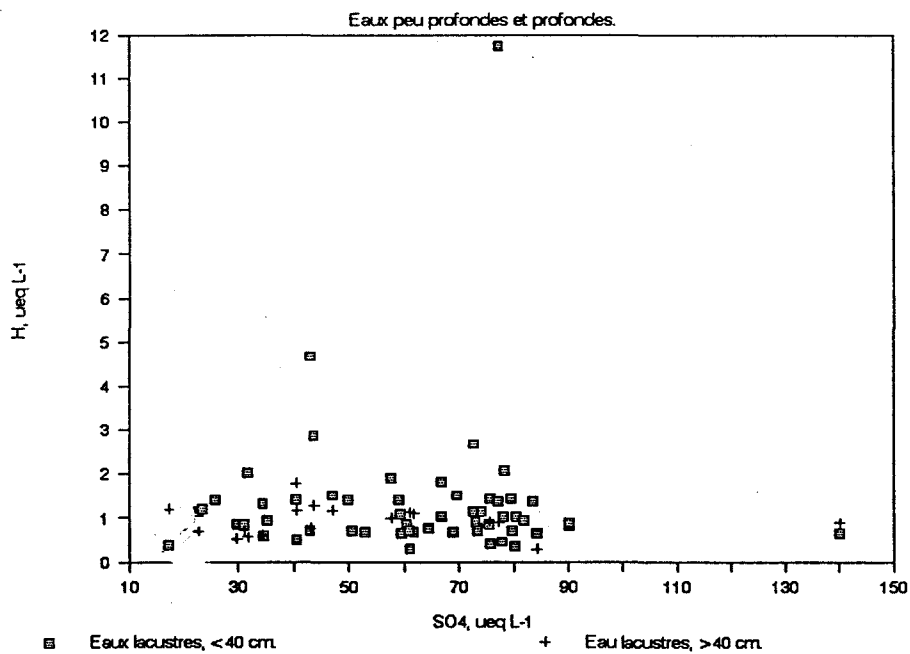


Figure 12: H^+ vs SO_4^{2-} pour toutes les eaux du lac, tributaires et décharge, Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 13: H^+ vs SO_4^{2-} pour les eaux du lac, puits d'accès series B et C, Lac Laflamme, printemps 1988.

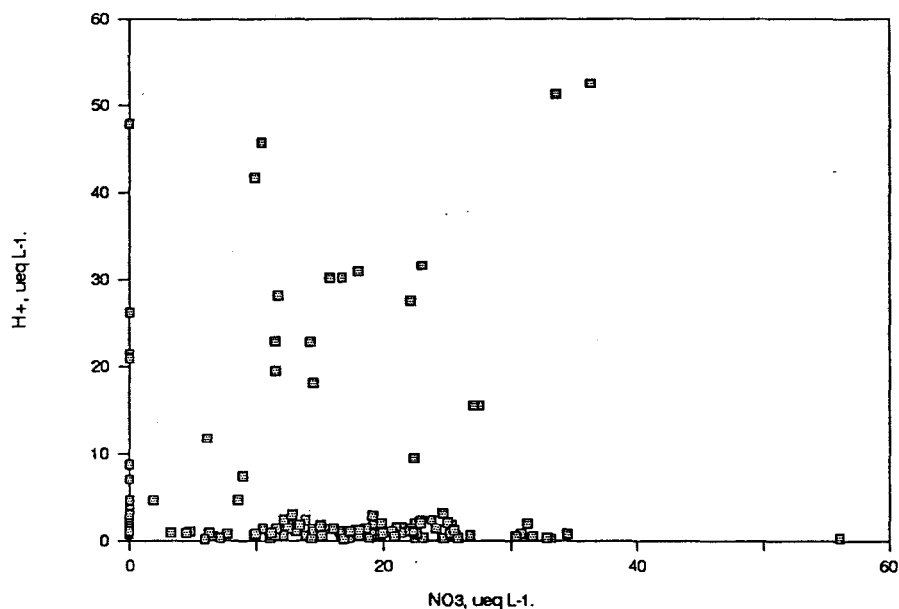
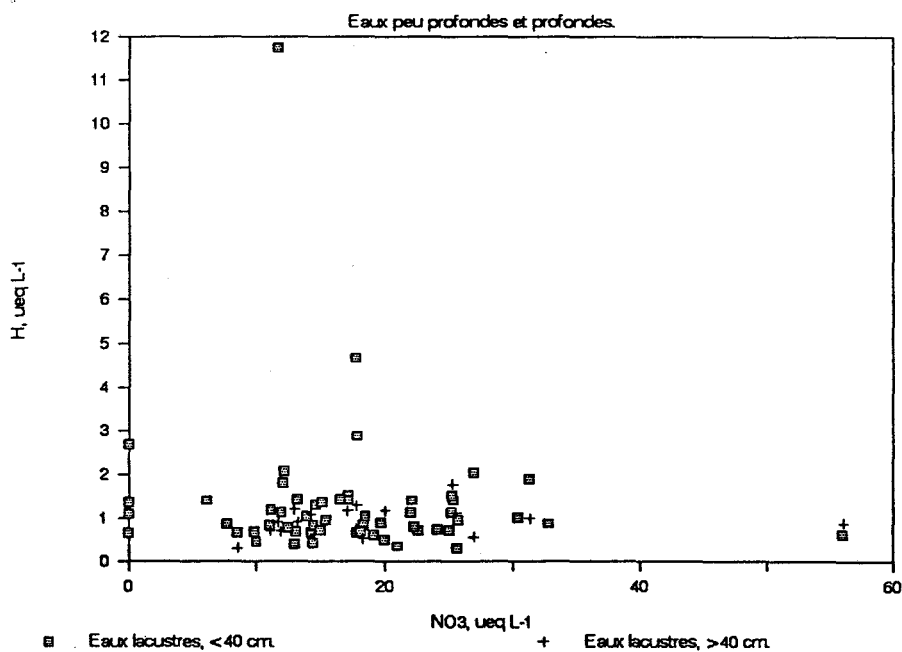
Eaux adjacentes à la glace: H+ v. NO₃Eaux lacustres: H v NO₃

Figure 14: H⁺ vs NO₃ pour toutes les eaux du lac, tributaires et décharge, Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 15: H⁺ vs NO₃ pour les eaux du lac, puits d'accès séries B et C, Lac Laflamme, printemps 1988.

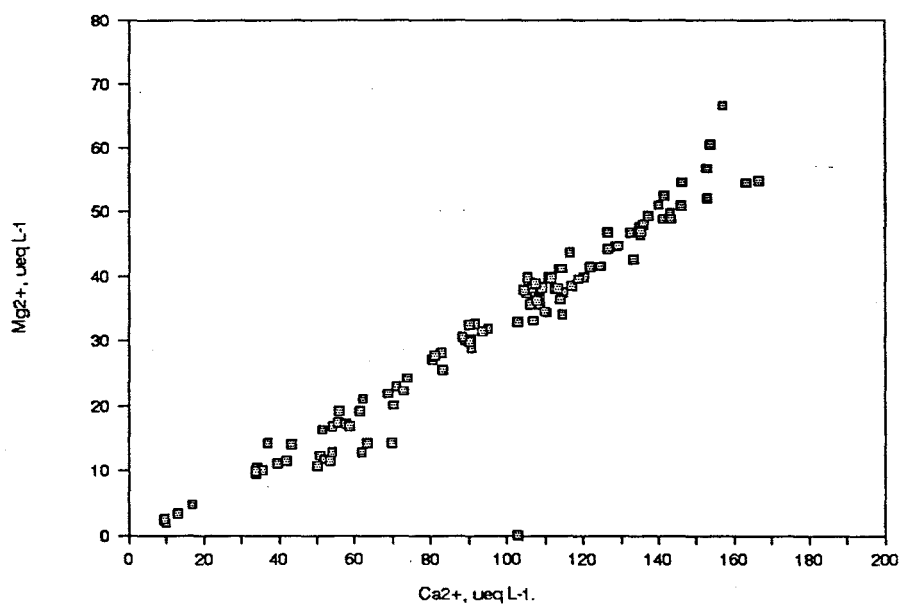
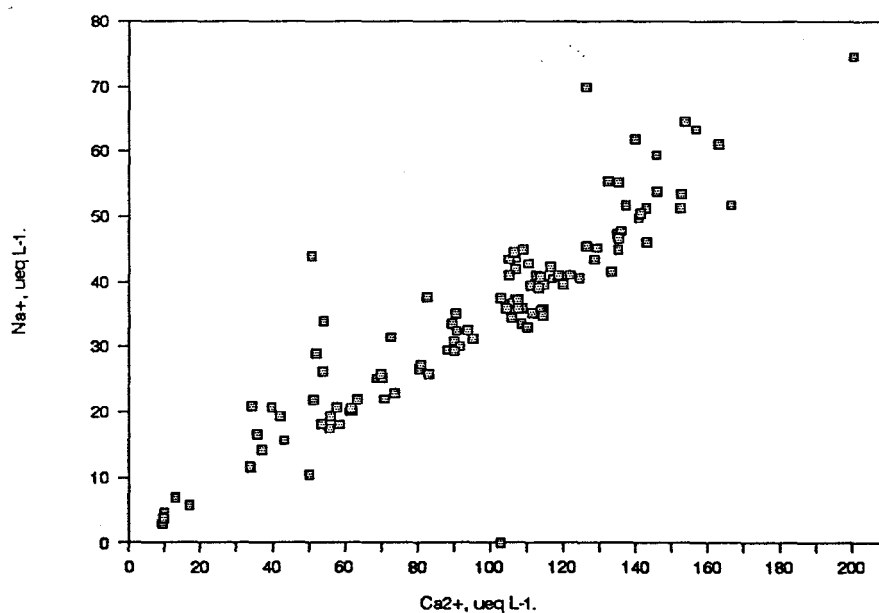
Eaux adjacentes à la glace: Ca^{2+} v. Mg^{2+} .Eaux adjacentes à la glace: Na^{+} v. Ca^{2+} .

Figure 16: Mg^{2+} vs Ca^{2+} pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge), Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 17: Na^{+} vs Ca^{2+} pour tous les échantillons d'eau (lac, tributaires, ruissellement hypodermique, décharge), Lac Laflamme, printemps 1988.

Décharge du lac: H, Cations.

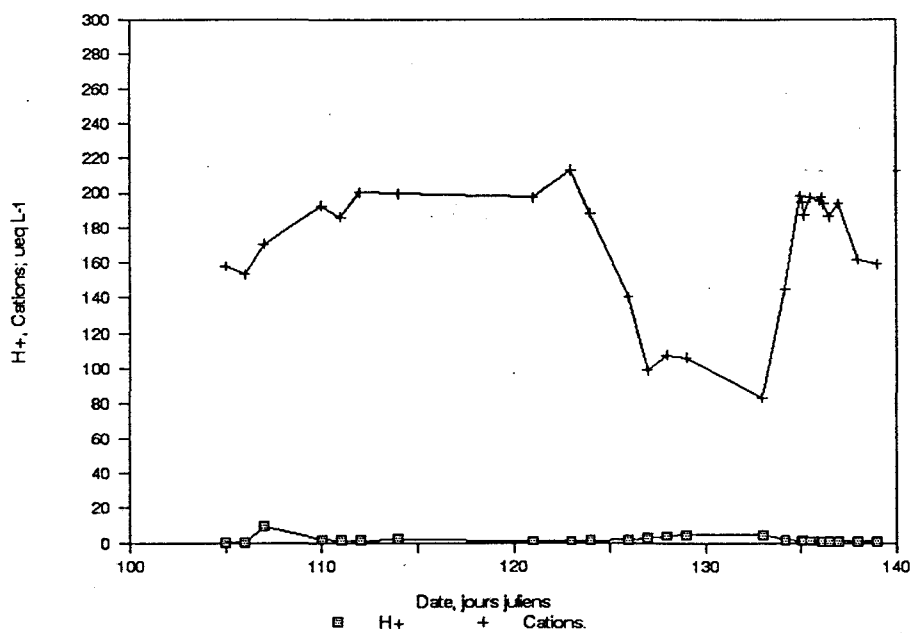
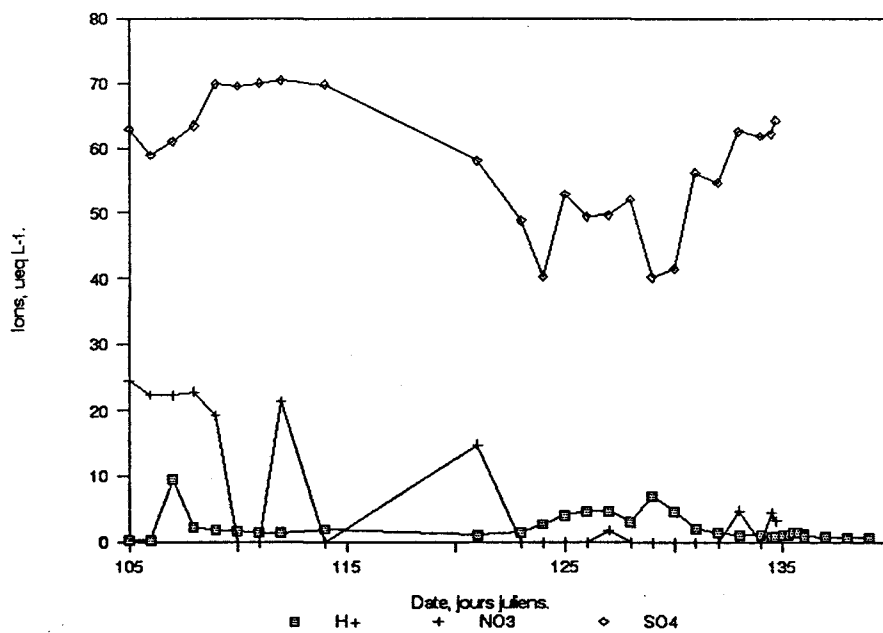
Décharge du lac: H+, NO₃, SO₄.

Figure 18: Évolution de H⁺ et cations, décharge du Lac Laflamme, printemps 1988.

Figure 19: Évolution de H⁺ NO₃⁻ et SO₄²⁻, décharge du Lac Laflamme, printemps 1988.

Écoulement de surface: H, NO₃, SO₄.

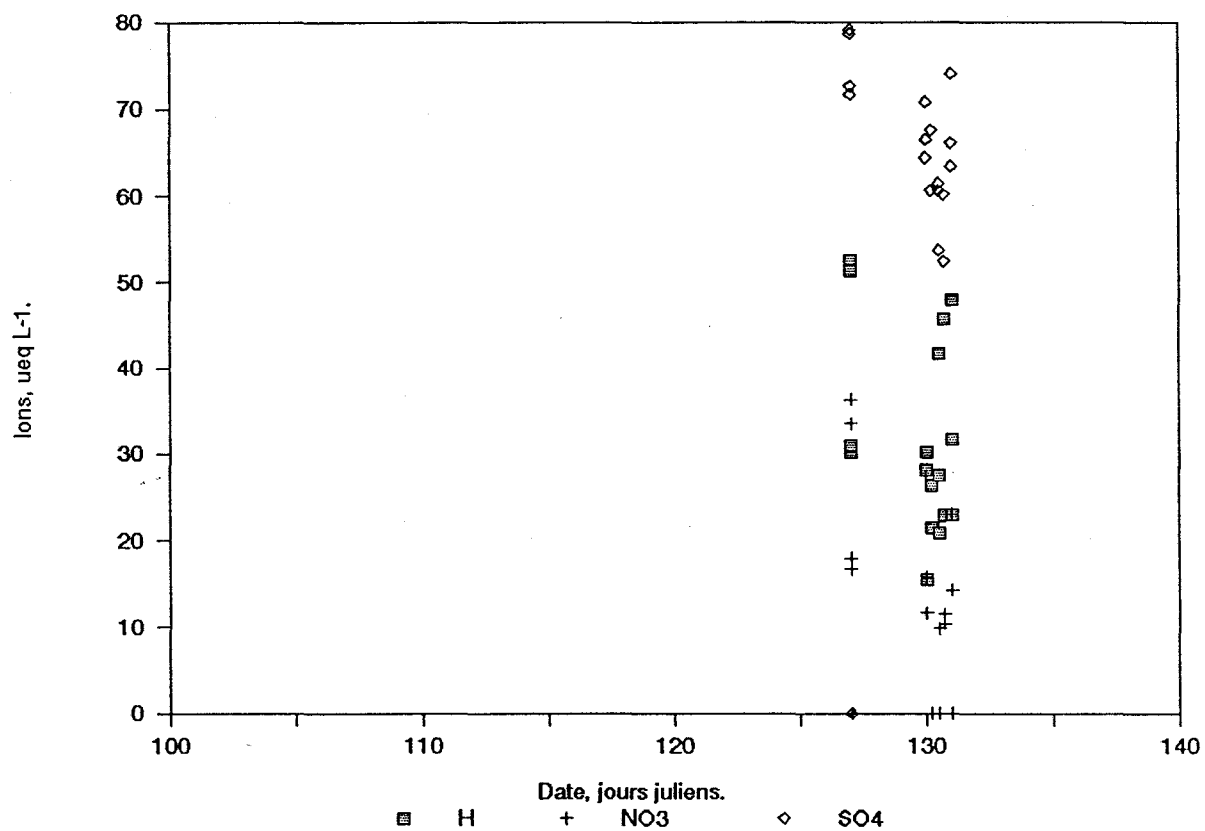


Figure 20: Concentration de H⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻ dans le ruissellement hypodermique, Lac Laflamme, printemps 1988.

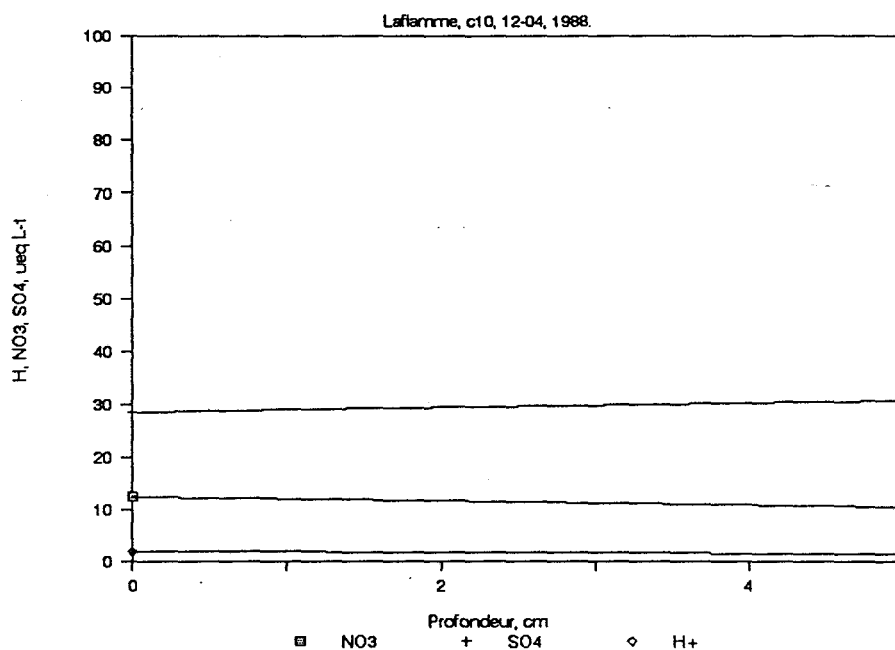
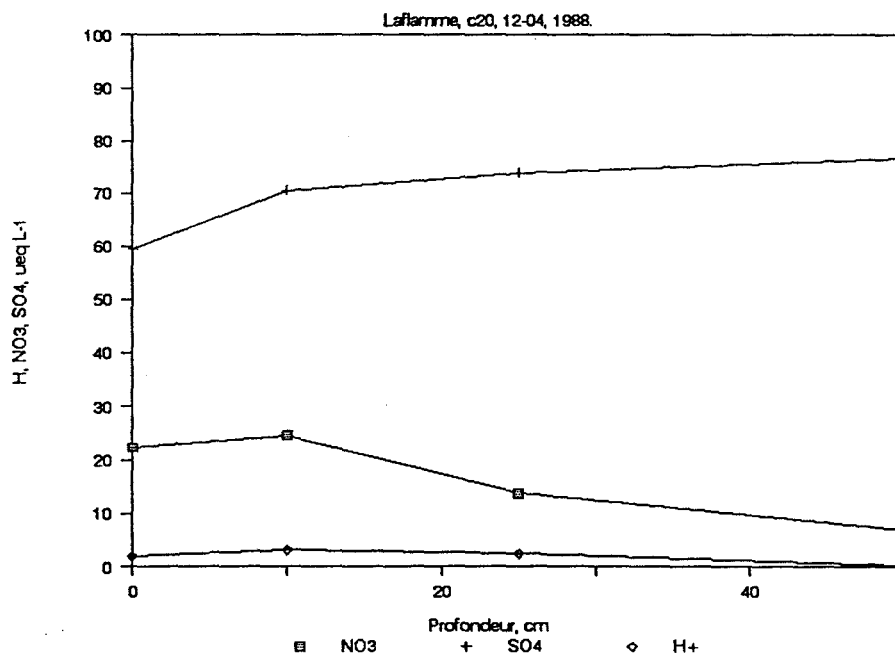
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 21: Puits d'accès, C10 10 m de la rive. Profils de H⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 12-04, 1988.

Figure 22: Puits d'accès, C20 20 m de la rive. Profils de H⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 12-04, 1988.

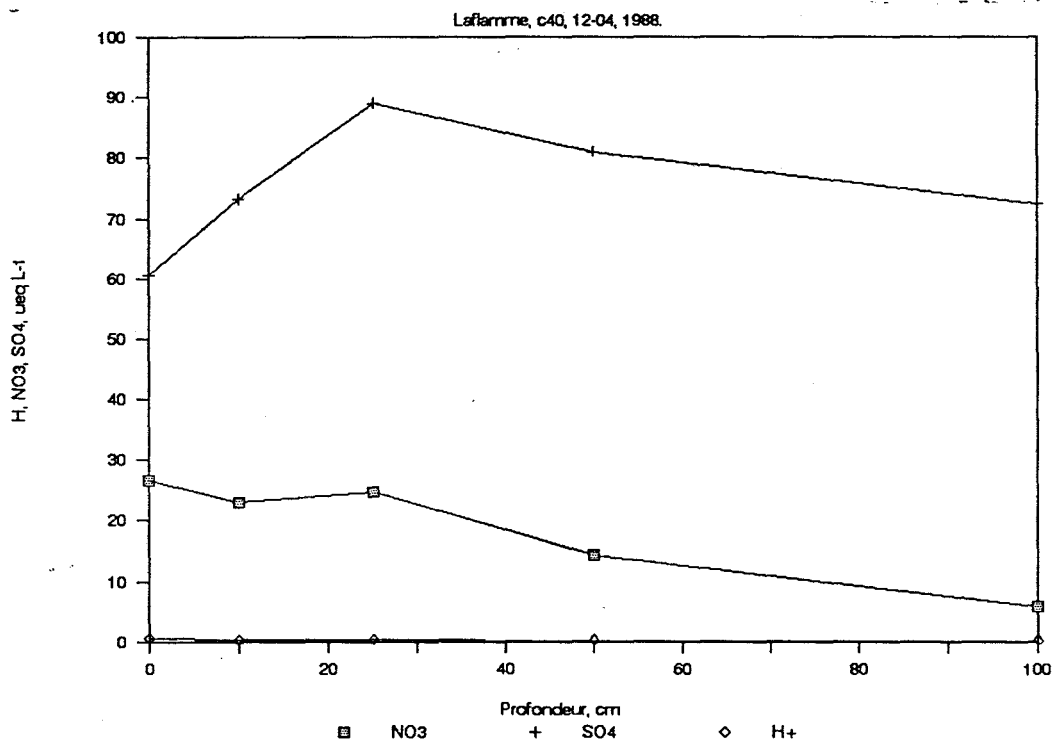
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 23: Profils de H⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻ dans la colonne d'eau (puits d'accès C40 dans le couvert de glace, Lac Lafamme, 12-04 1988.

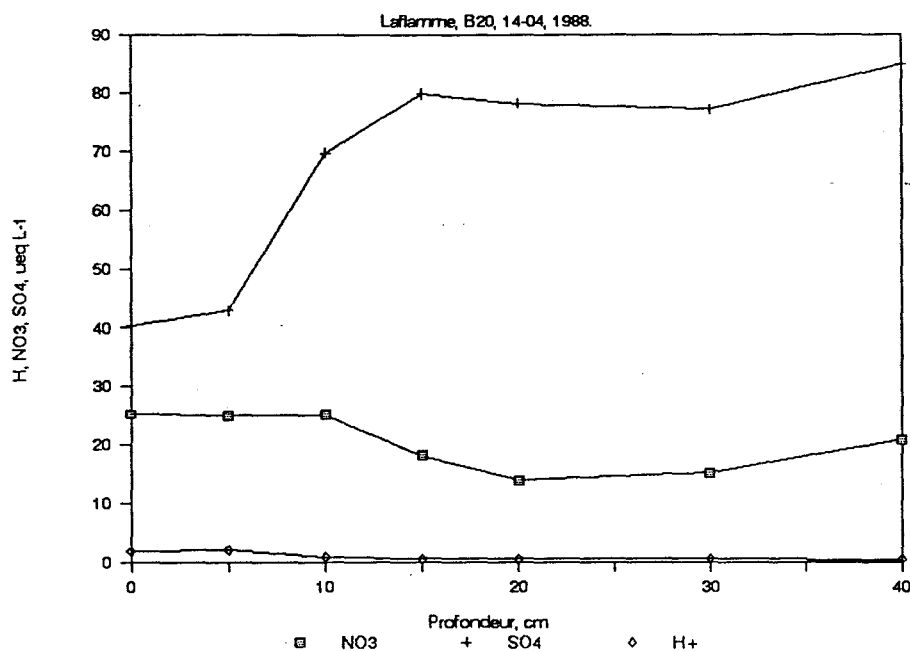
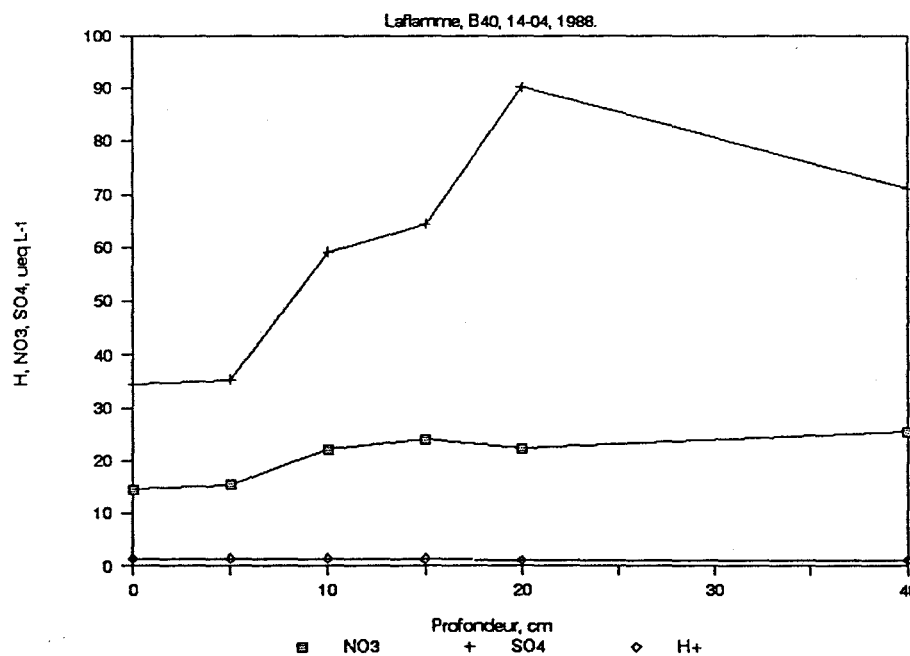
Eaux adjacentes à la glace: NO₃, SO₄ v. Profondeur.Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 24: Puits d'accès, B20; 20 m de la rive. Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme 14-04 1988.

Figure 25: Puits d'accès, B40; 40 m de la rive. Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme 14-04 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

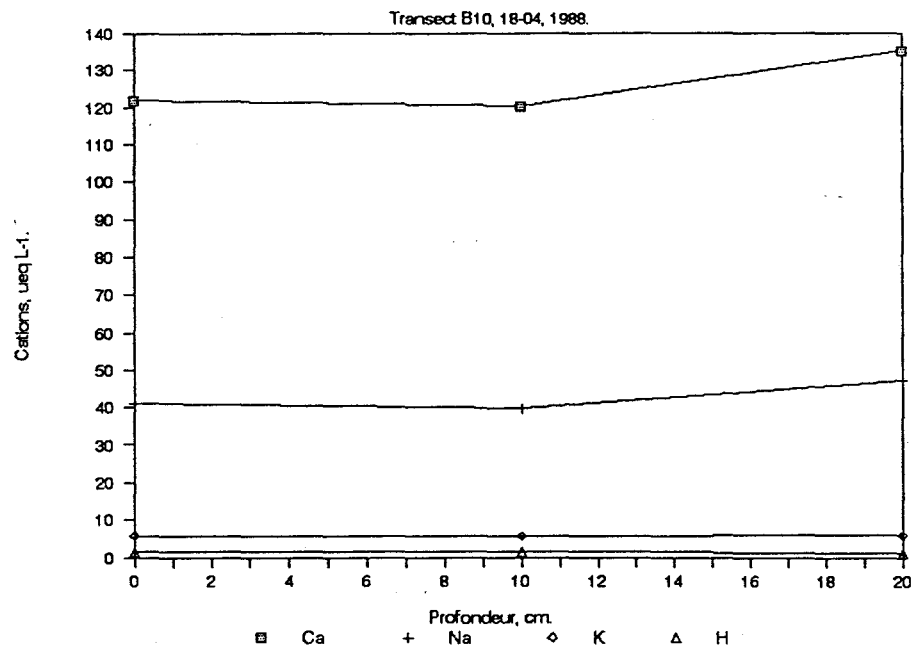
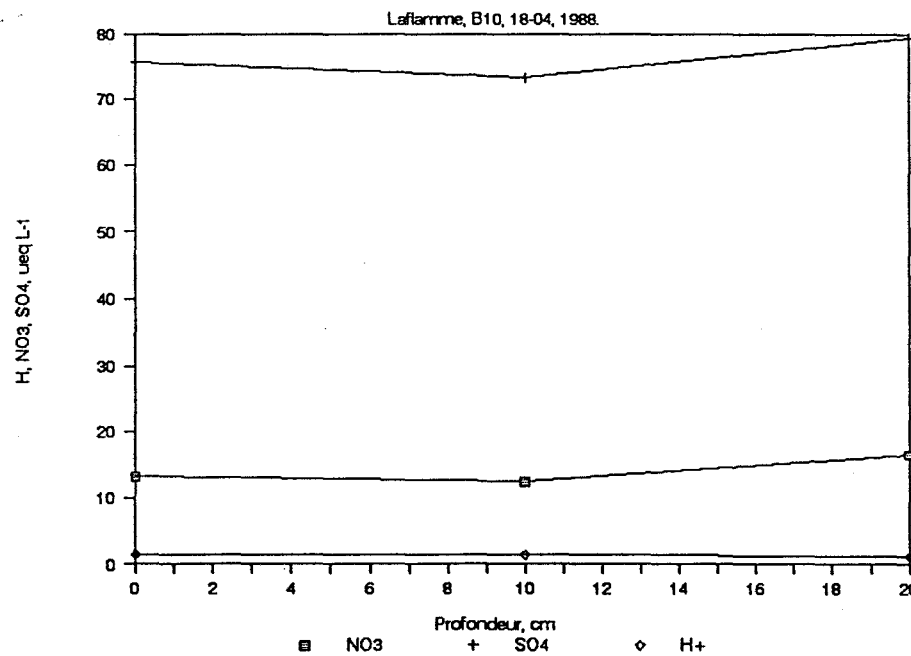
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 26: Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B10 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Figure 27: H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B10 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

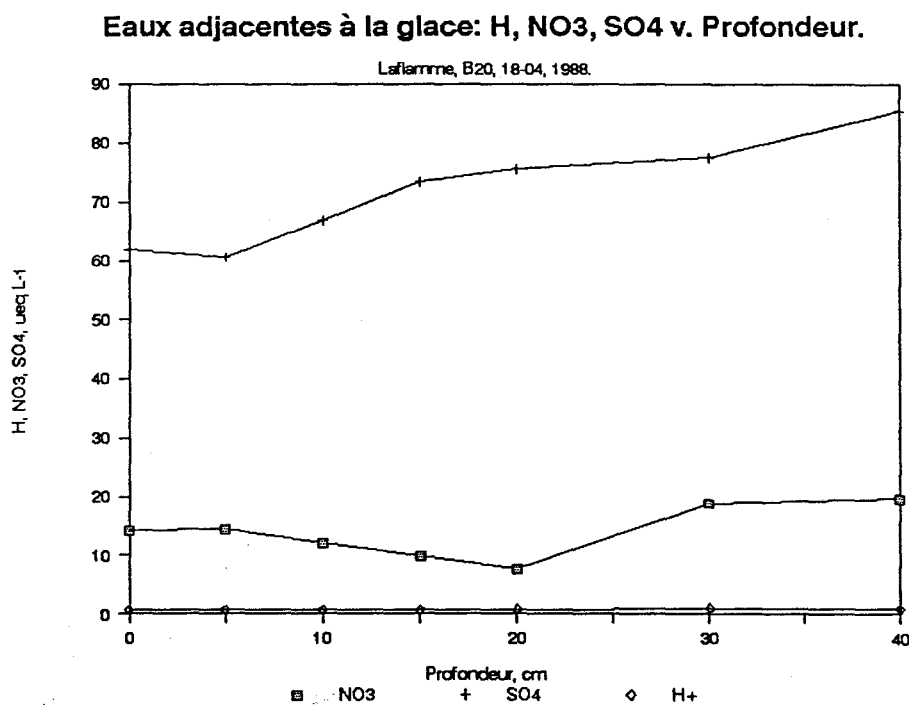
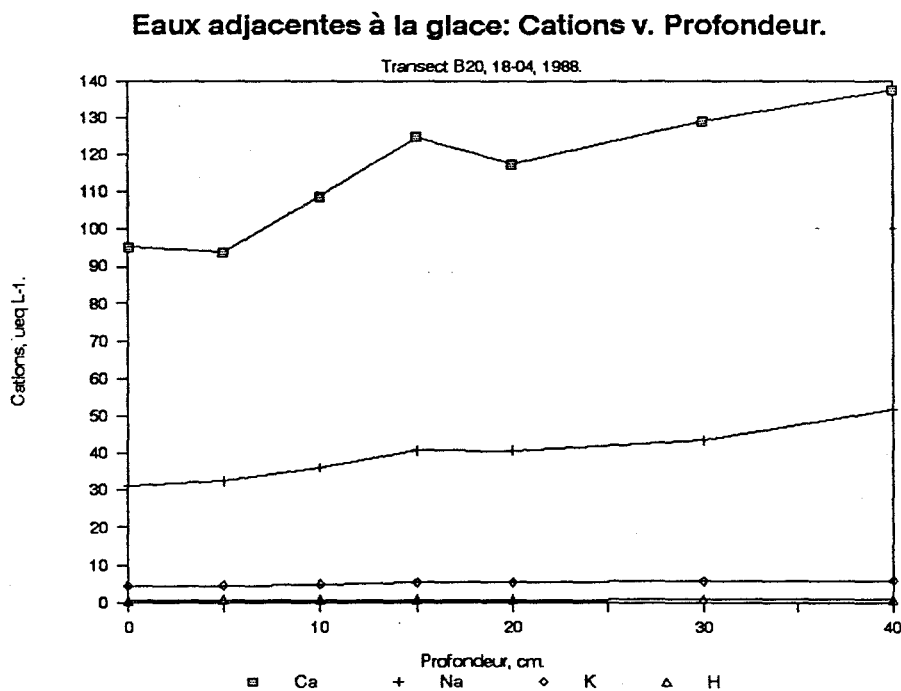


Figure 28: Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Figure 29: H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

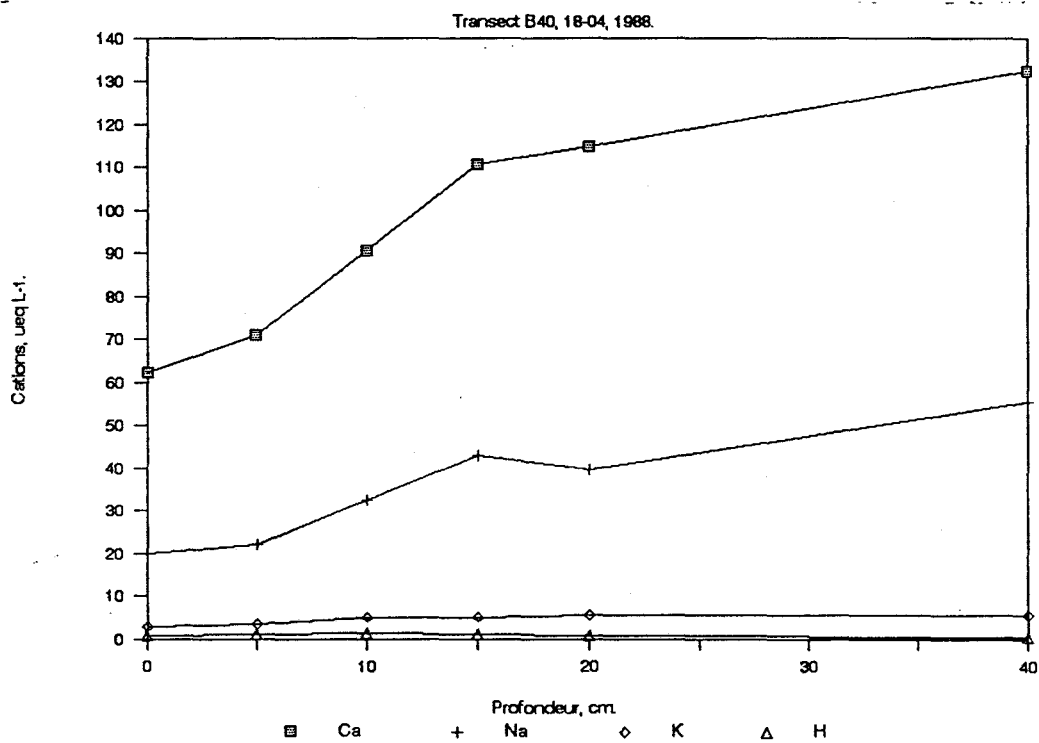


Figure 30: Profils des cations dans la colonne d'eau (puits d'accès B40, 40 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

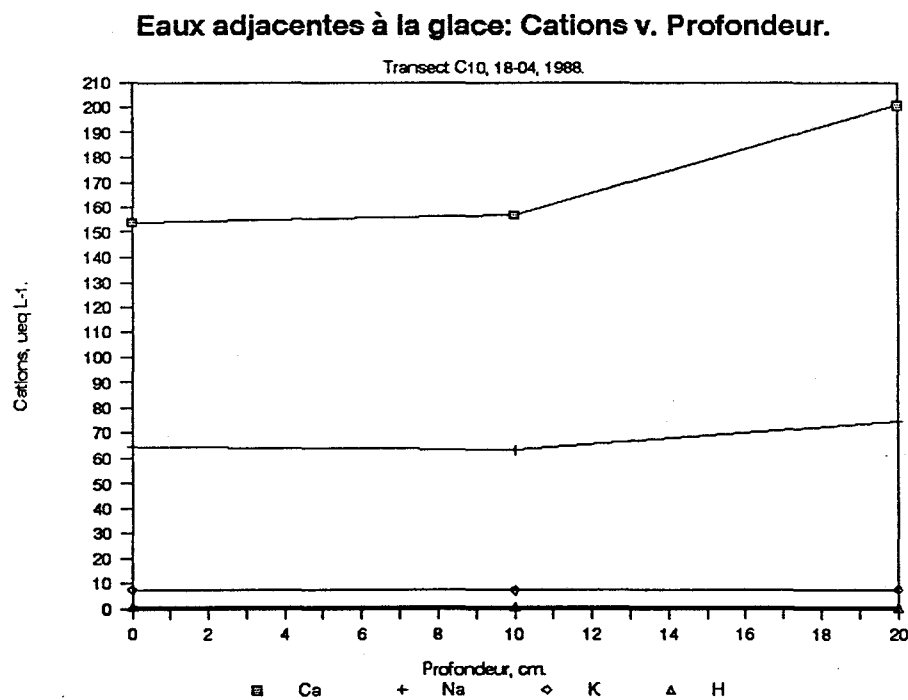
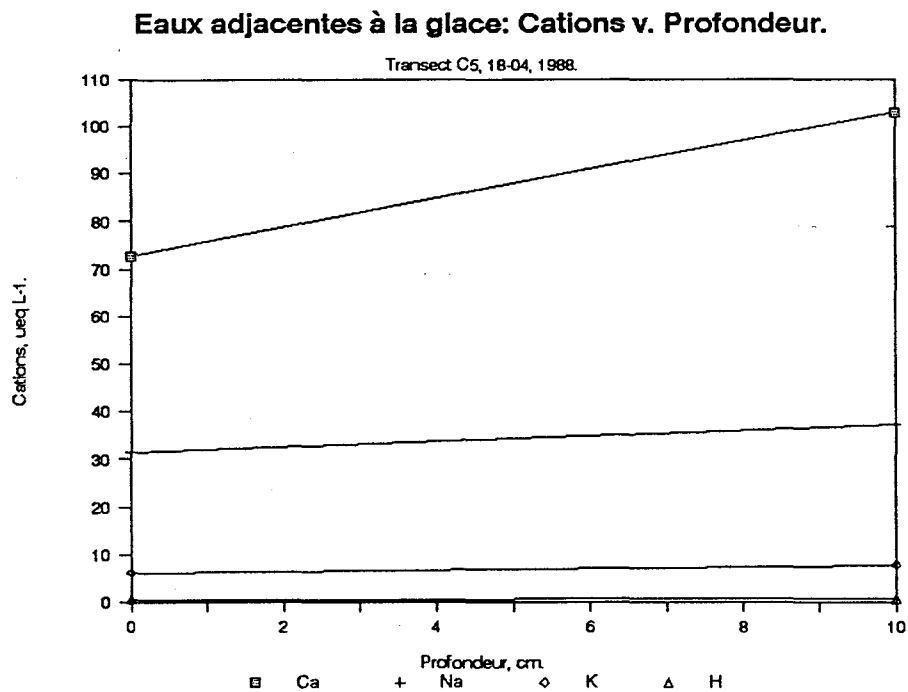
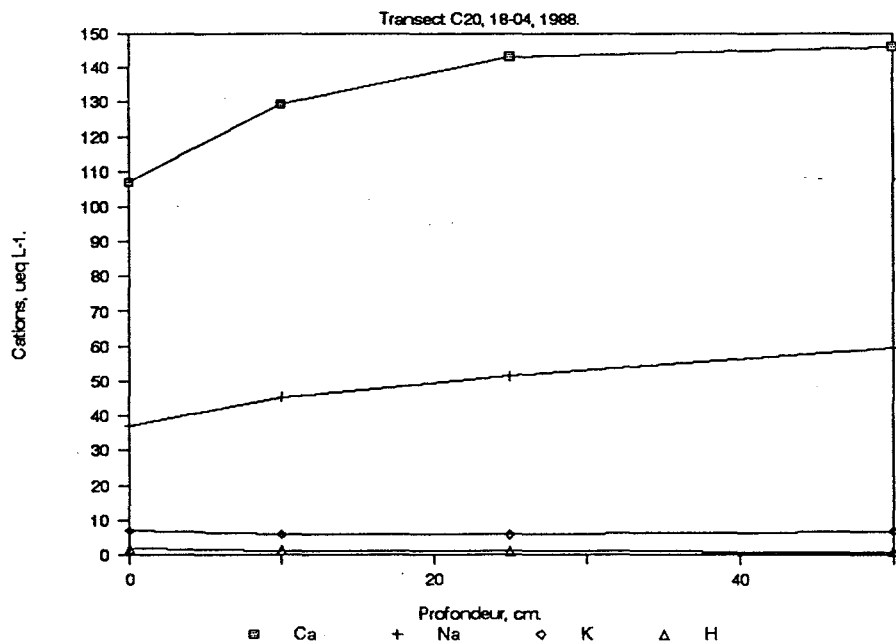


Figure 31: Puits d'accès, C5 (5 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Figure 32: Puits d'accès, C10 (10 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.



Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

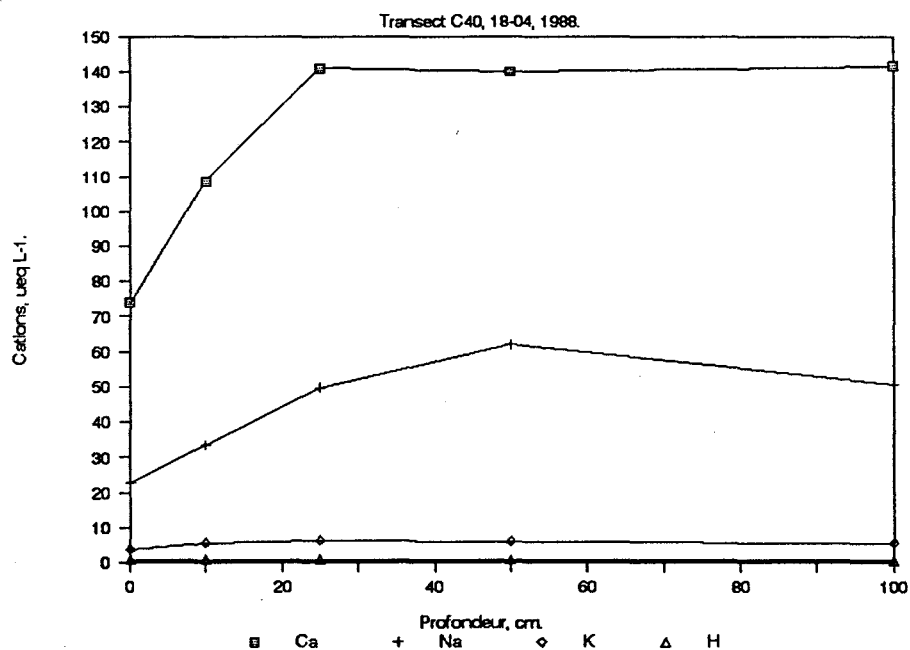


Figure 33: Puits d'accès, C20 (20 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Figure 34: Puits d'accès, C40 (40 m de la rive). Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

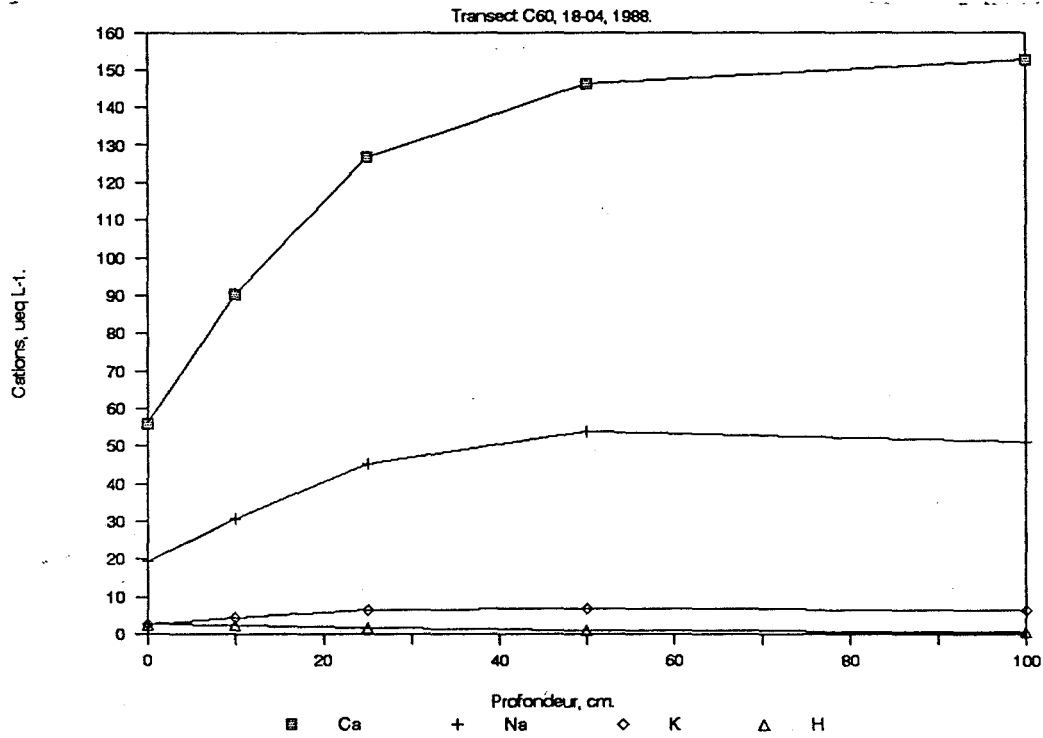


Figure 35: Profils des cations dans la colonne d'eau (puits d'accès C60, 60 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 18-04 1988.

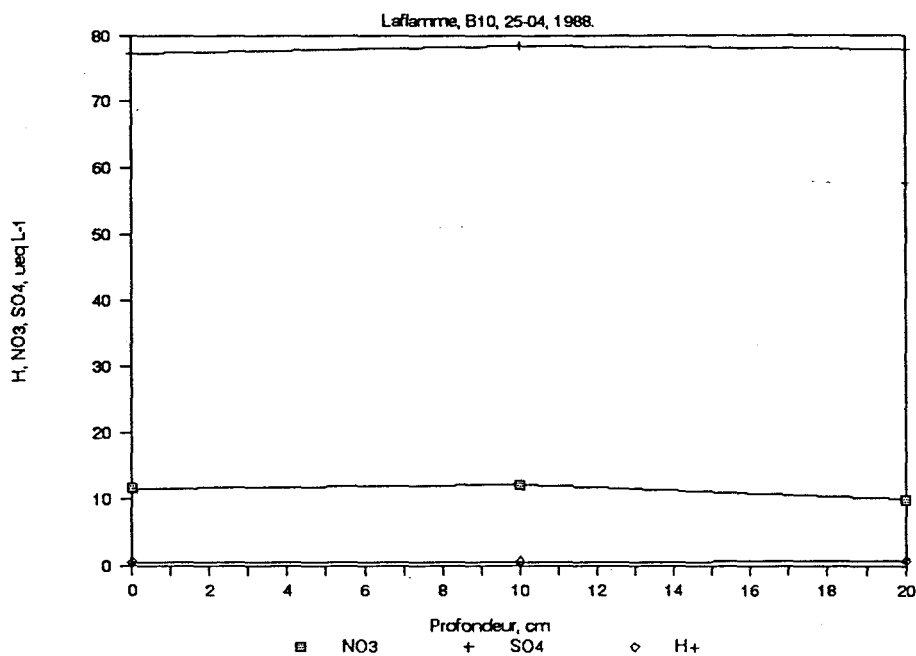
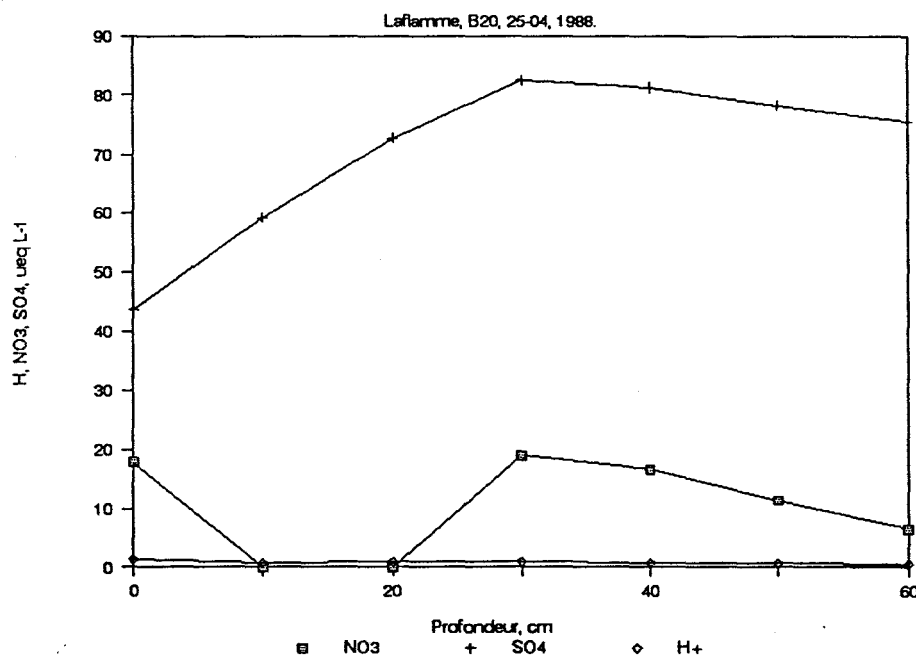
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 36: Puits d'accès B10, 10 m de la rive. Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 25-04 1988.

Figure 37: Puits d'accès B20, 20 m de la rive. Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 25-04 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

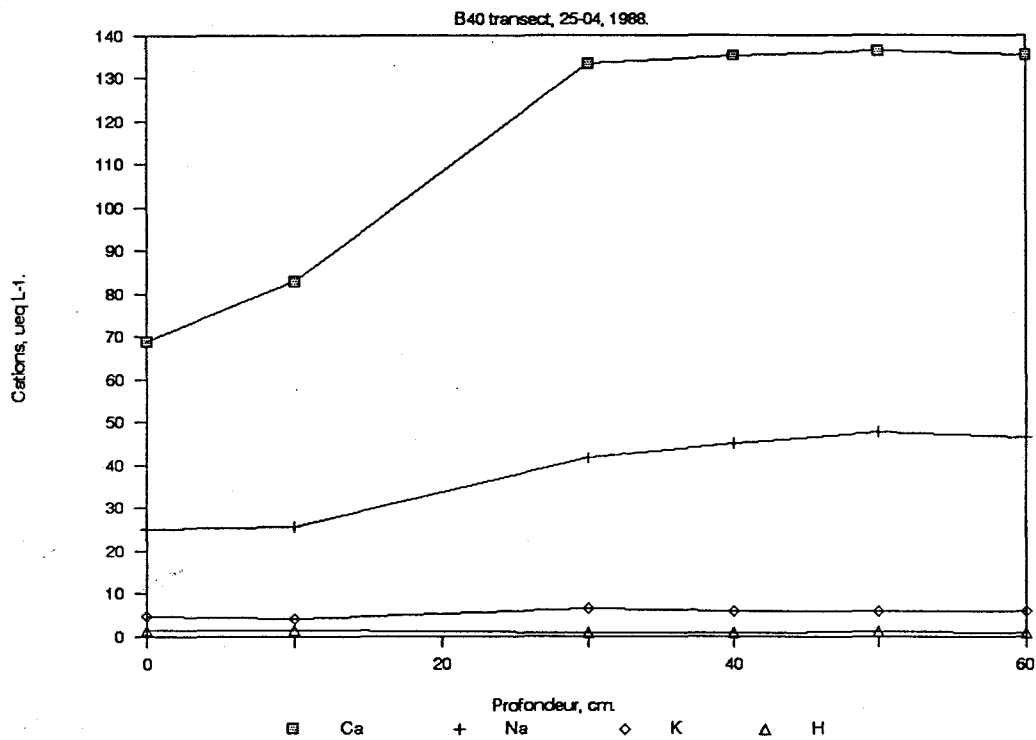


Figure 38: Profils des cations dans la colonne d'eau (puits d'accès B40, 40 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 25-04 1988.

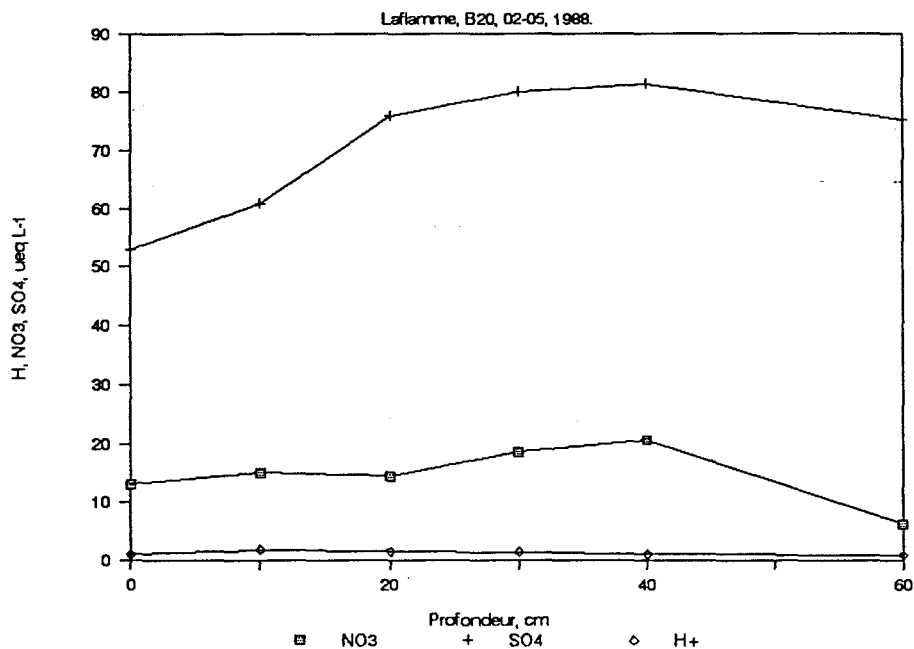
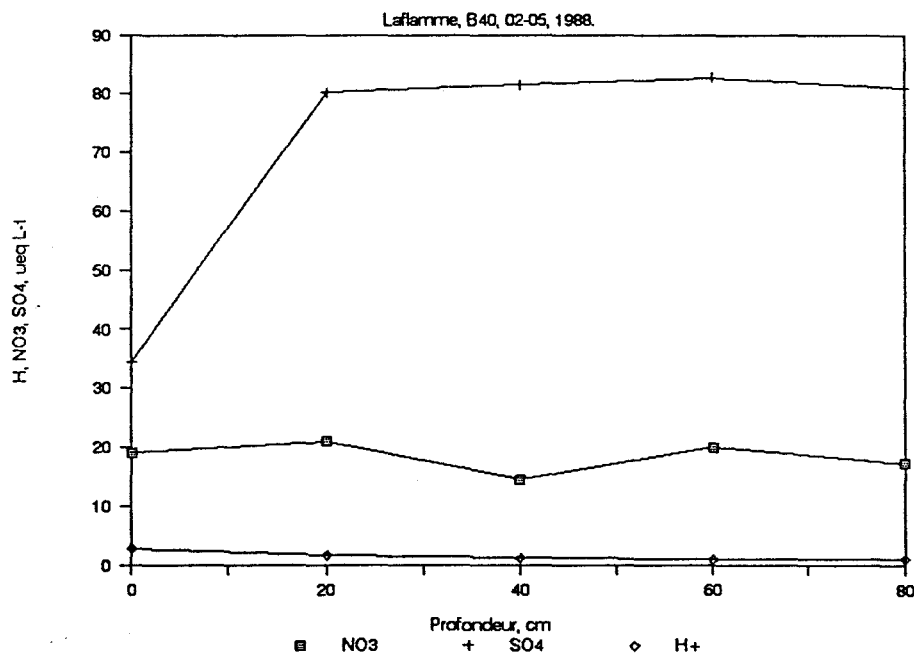
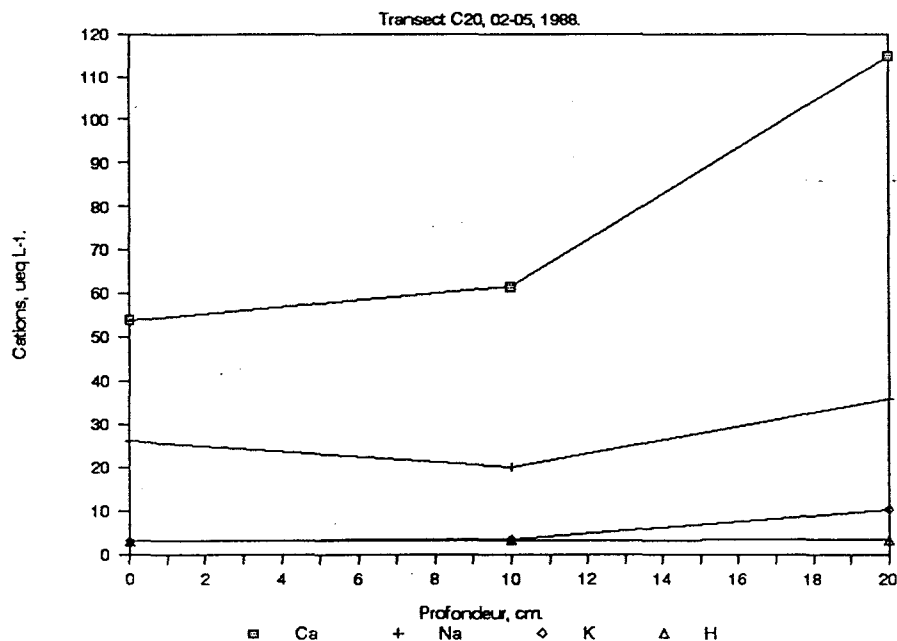
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 39: Puits d'accès B20 (20 m de la rive). Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.

Figure 40: Puits d'accès B40 (40 m de la rive). Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.



Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

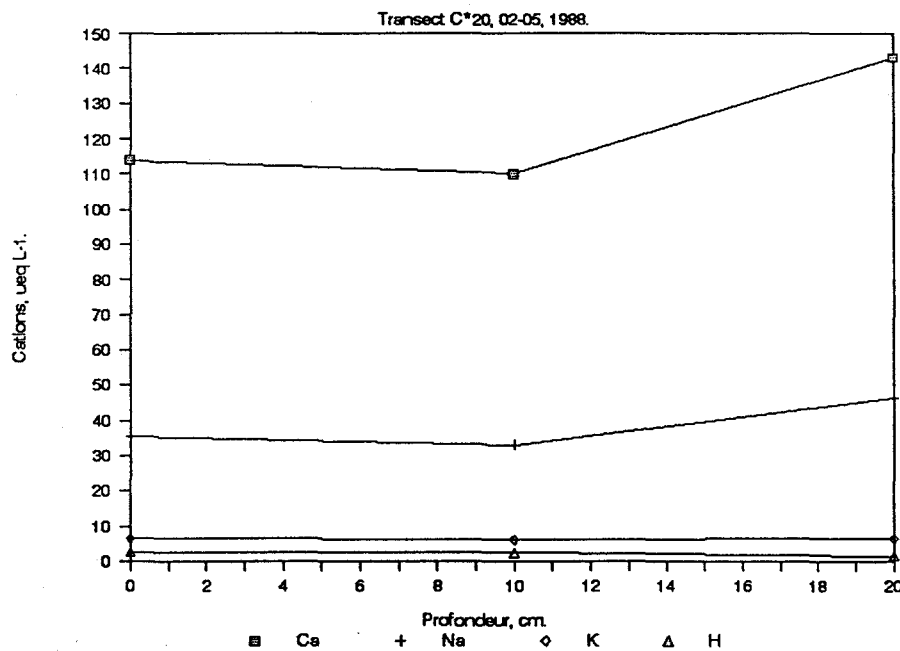


Figure 41: Puits d'accès C20, 20 m de la rive. Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.

Figure 42: Puits d'accès C*20. Profils des cations dans la colonne d'eau sous couvert de glace, Lac Laflamme, 02-05 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

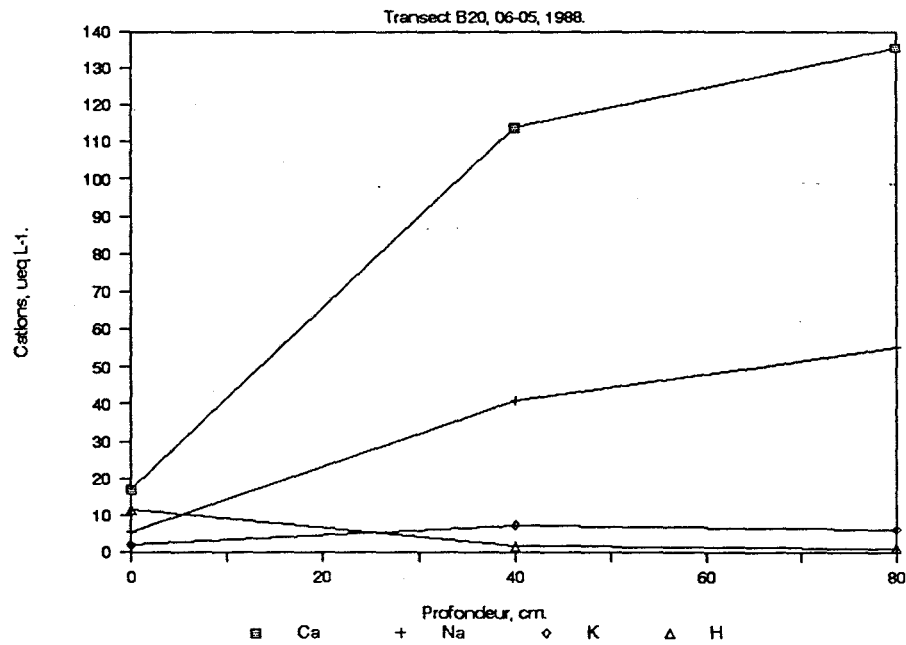
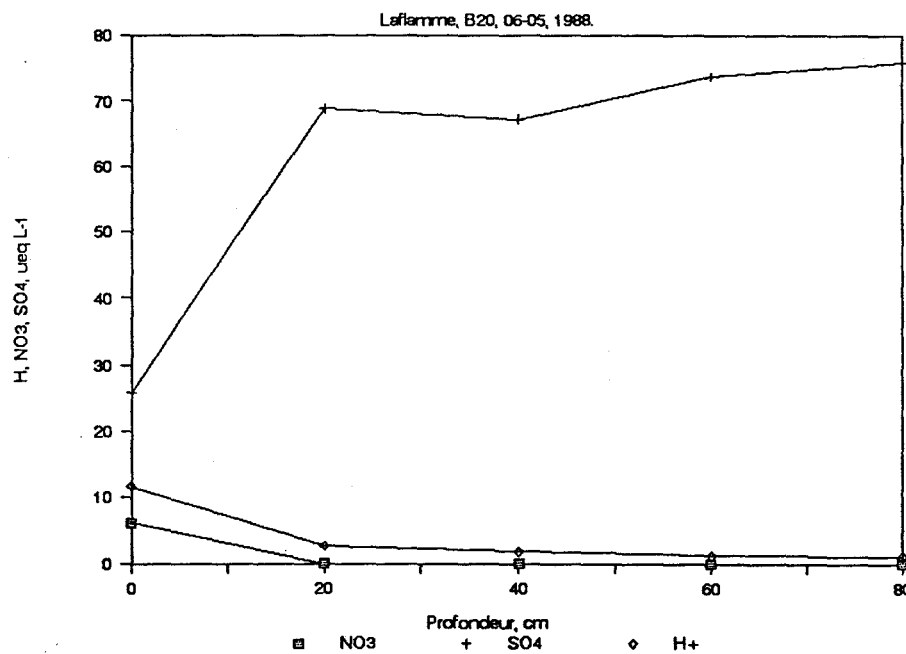
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 43: Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20, 20 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 06-05 1988.

Figure 44: H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès B20, 20 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 06-05 1988.

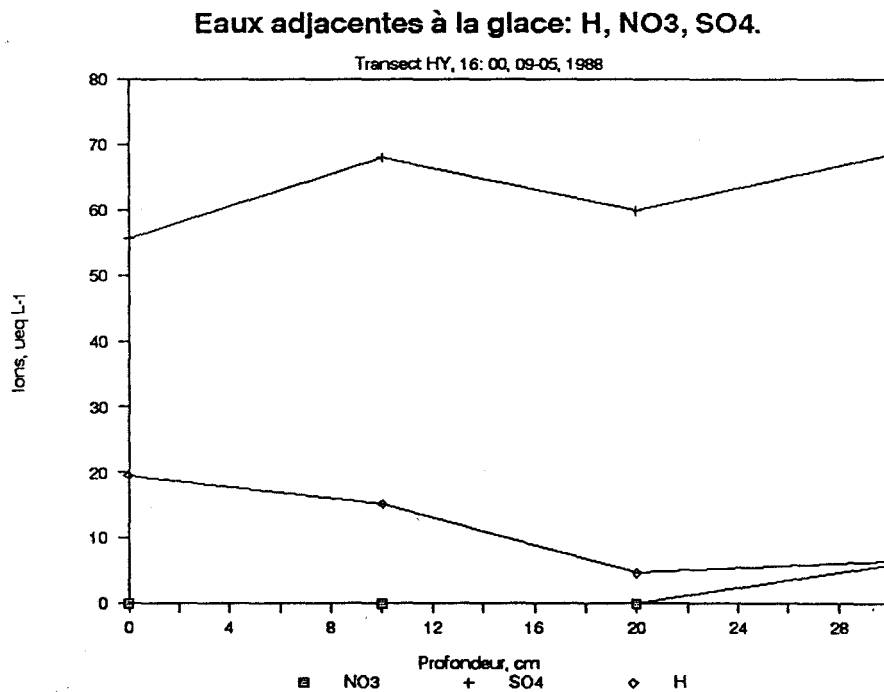
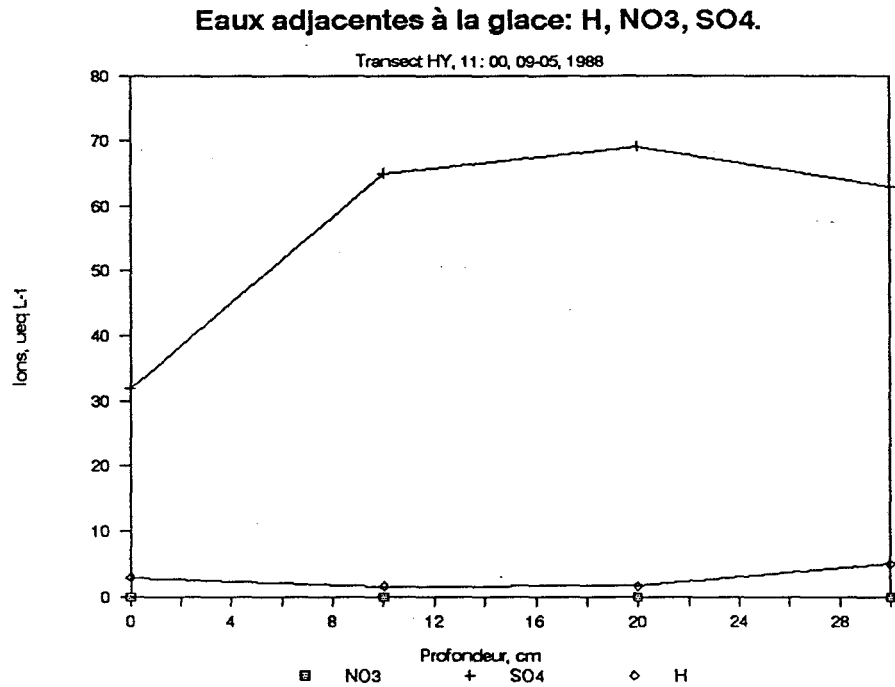


Figure 45: 11:00 hrs. Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau (puits d'accès HY, 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 09-05 1988.

Figure 46: 16:00 hrs. Profils de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ dans la colonne d'eau (puits d'accès HY, 10 m de la rive) sous couvert de glace, Lac Laflamme, 09-05 1988.

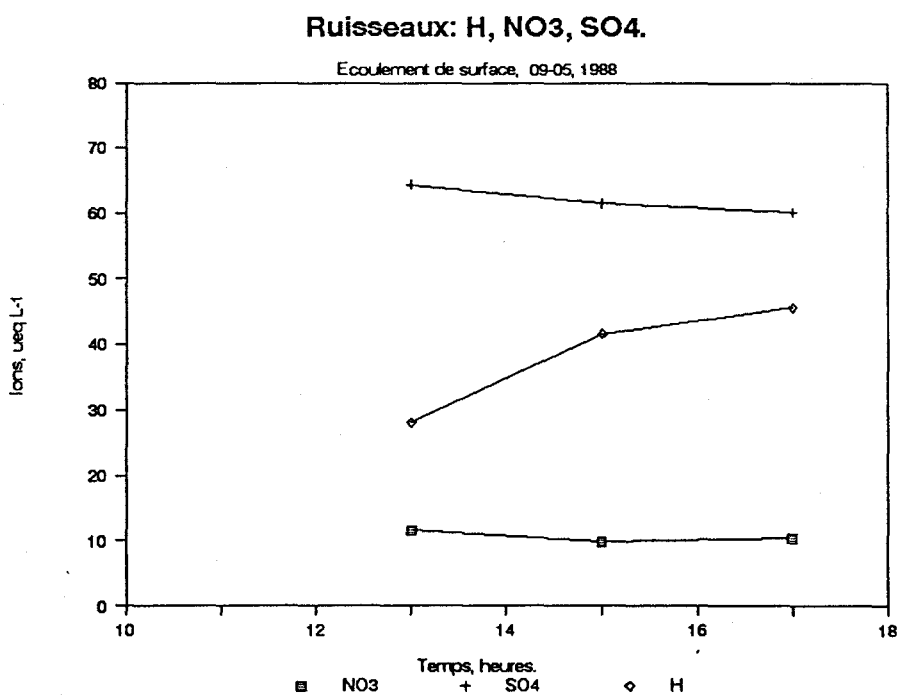
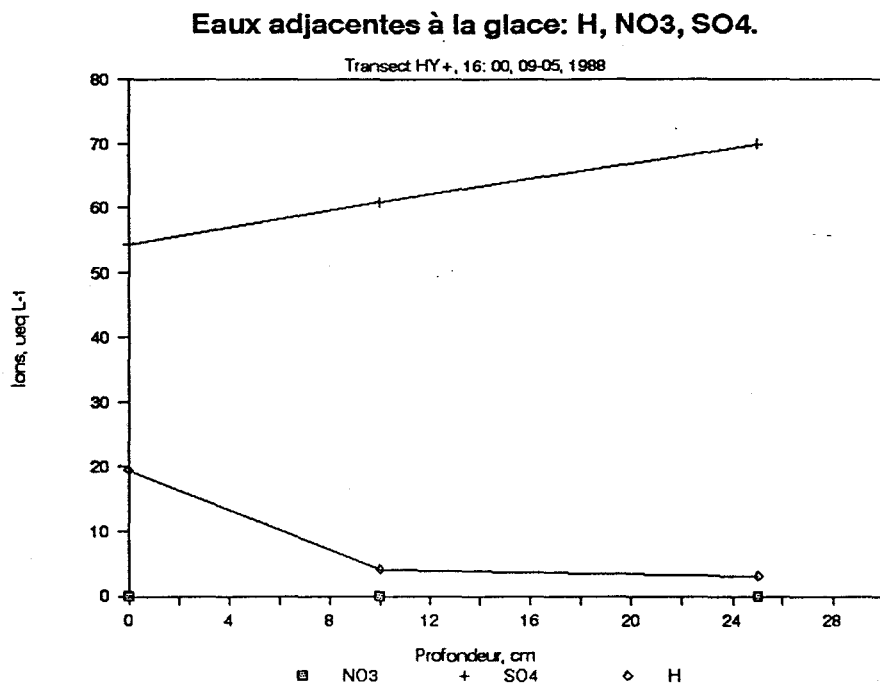


Figure 47: Profils chimiques dans la colonne d'eau, puits d'accès HY, 10 m de la rive) de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, Lac Laflamme, 09-05 1988.

Figure 48: Évolution chimique du ruissellement hypodermique de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, Lac Laflamme, 09-05 1988.

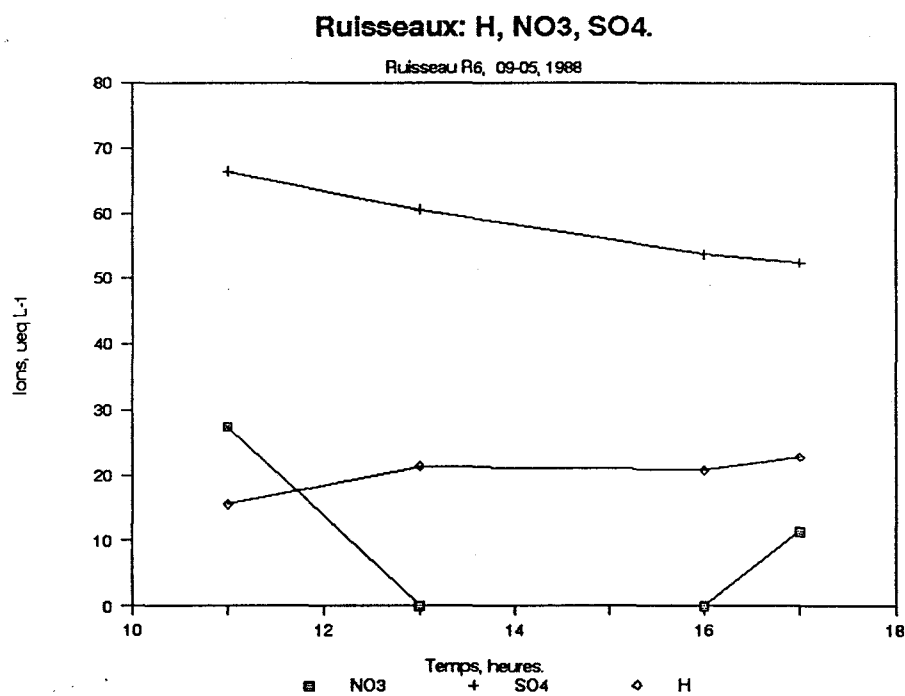
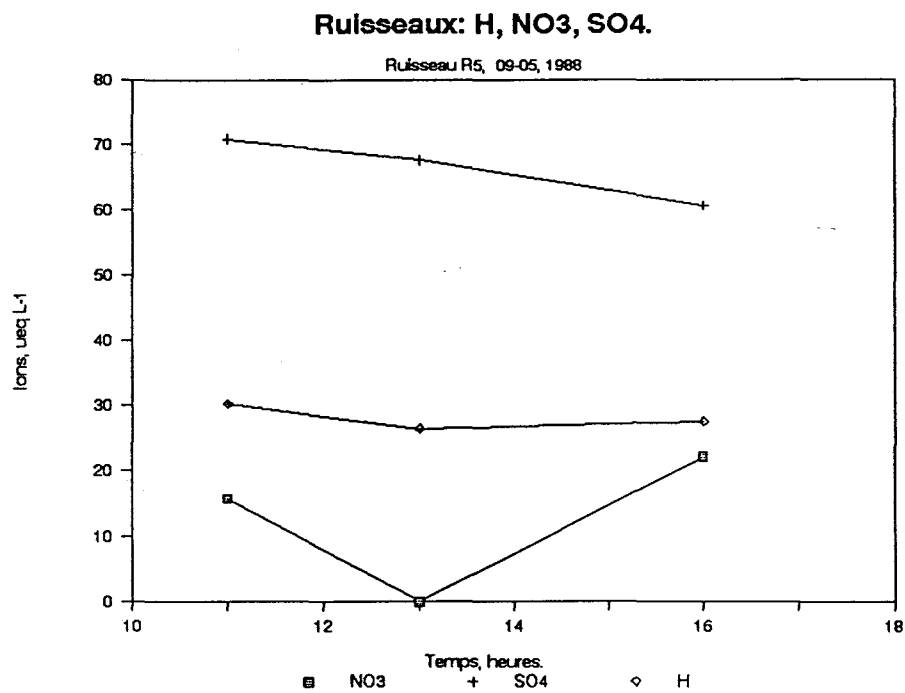


Figure 49: Ruisseau R5. Évolution de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, Lac Laflamme, 09-05 1988.

Figure 50: Ruisseau R6. Évolution de H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, Lac Laflamme, 09-05 1988.

Eaux adjacentes à la glace: Cations v. Profondeur.

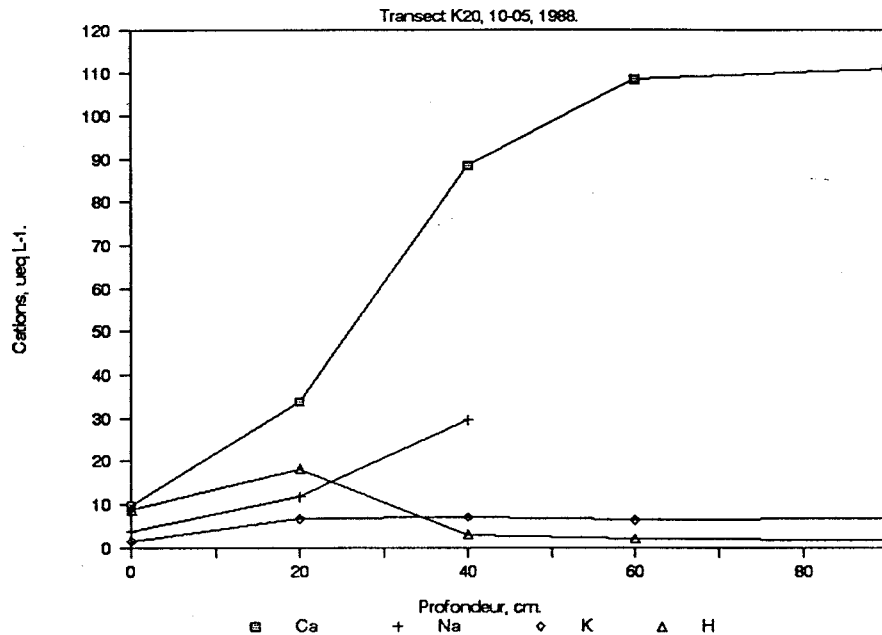
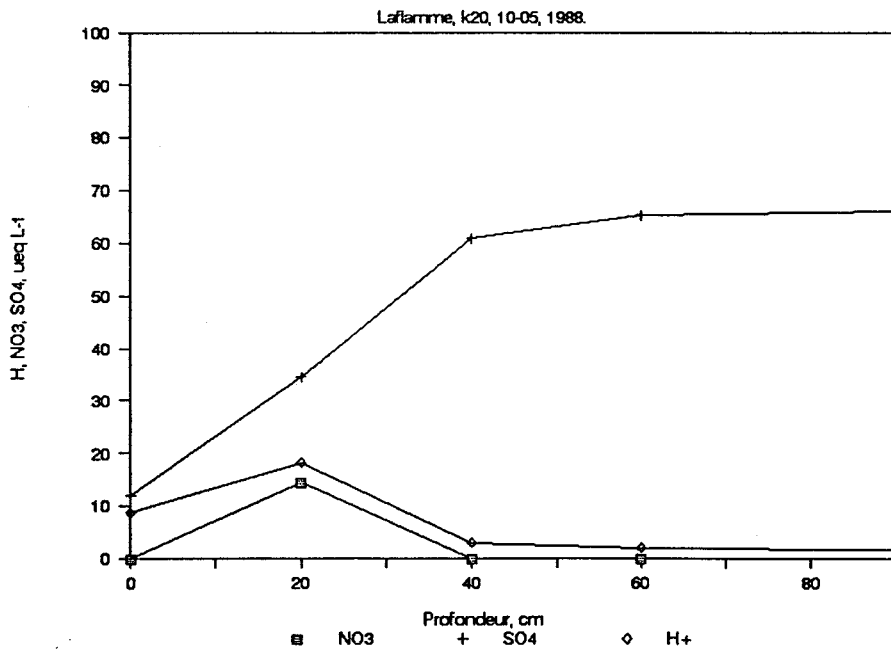
Eaux adjacentes à la glace: H, NO₃, SO₄ v. Profondeur.

Figure 51: Cations. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès K20, 20 m de la rive), Lac Laflamme, 10-05 1988.

Figure 52: H⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻. Profils chimiques dans la colonne d'eau (puits d'accès K20, 20 m de la rive), Lac Laflamme, 10-05 1988.