

Importance du transport atmosphérique du soufre dans la composition chimique des rivières de la Côte-Nord du fleuve Saint-Laurent (Québec)

INRS-Eau

Rapport scientifique no 231

par

Marius Lachance¹

Denis Brouard²

Gordon Walsh³

pour

Ministère des Pêches et des Océans
Direction des sciences biologiques
Division de l'habitat du poisson

Juin 1987

¹ INRS-Eau

² Gilles Shooner et Ass. Inc.

³ Pêches et Océans Canada

RÉSUMÉ

La région de la Côte Nord du fleuve Saint-Laurent, qui recèle de nombreuses rivières à saumons, est exposée à des précipitations acides dont les apports en sulfates ($20 \text{ kg SO}_4^{2-} / \text{ha-an}$) constituent une menace pour les écosystèmes aquatiques sensibles. Des inventaires physico-chimiques (effectués en 1982-1983) ont mis en évidence la haute sensibilité du territoire en raison de la faible minéralisation des eaux (alcalinité de $55 \mu\text{eq/L}$ et conductivité de $17 \mu\text{s/cm}$).

Le calcul des charges annuelles de soufre exporté par 21 rivières réparties sur l'ensemble du territoire montre que les apports atmosphériques sont la principale source de sulfates dans les eaux de surface de cette région. Un gradient décroissant d'ouest en est dans les concentrations est interprété en terme d'influence du transport atmosphérique à longue distance quoique certaines sources locales d'émission de soufre ne soient pas négligeables.

L'étude de la variation saisonnière du bilan des charges en sulfates, effectuée sur un petit bassin versant (40 km^2) a révélé que l'anion sulfate joue un rôle important dans les phénomènes de baisse du pH des eaux au cours du printemps. Le choc printanier serait accentué par un apport supplémentaire de sulfates qui proviendrait d'une libération de cet élément accumulé sur le bassin versant au cours des saisons d'été et d'automne.

Les acides organiques jouent un rôle non négligeable dans l'équilibre chimique des eaux de surface de la région spécialement dans la partie est où les retombées atmosphériques de soufre sont moins grandes. Les faibles niveaux de pH qu'on y retrouve ($5,5-6,0$) indiquent la présence d'une certaine acidification organique.

INTRODUCTION

Au cours des cinq dernières années, de nombreuses études ont mis en évidence que le transport atmosphérique des polluants acides affectait les écosystèmes aquatiques sensibles de l'est du Canada (Harvey et al., 1981; États-Unis - Canada, 1983; Jeffries et al., 1986; Linthurst et al., 1986; Dupont et Grimard, 1986; Lachance et al., 1985; Minns et Kelso, 1986; Watt et al., 1983). Ces effets se traduisent principalement par une baisse du pH et une diminution de l'alcalinité accompagnée par une augmentation des sulfates. Jusqu'à date cependant, on sait encore peu de choses sur l'étendue spatiale des régions affectées et menacées par cette forme de pollution. La région de la Côte-Nord du fleuve Saint-Laurent fait partie de cette zone sur laquelle les effets du transport atmosphérique des composés de soufre sont peu connus. Cette vaste région située sous la latitude de 52°N s'étend sur environ 1000 km de largeur. On y retrouve des précipitations dont le pH annuel moyen se situe entre 4,2 et 5,0 (Barrie et Sirois, 1982; Grimard, 1984, 1985). En outre, les retombées humides de sulfates sont de l'ordre de 17-22 kg SO₄²⁻/ha-an (Brouard et Lachance, 1986; Grimard, 1984, 1985). Ces dépôts sont du même ordre de grandeur que le seuil de 20 kg SO₄²⁻/ha-an au delà duquel les milieux aquatiques modérément sensibles sont menacés (États-Unis - Canada, 1983).

Ce vaste territoire, qui repose sur le bouclier canadien, constitue l'une des zones qui a la plus faible capacité de neutralisation des apports acides atmosphériques au Canada (Shilts, 1981; Harvey et al., 1981). Cette haute sensibilité provient essentiellement de la nature peu altérable de l'assise rocheuse, comprenant principalement des gneiss et du granite. Les dépôts de surface formés par l'action des glaciers sont peu abondants et généralement de même composition géologique que le substrat rocheux. Par conséquent, les eaux de surface drainant ces régions sont très peu minéralisées. Une étude récente (Walsh et al., 1987) a mis en évidence cette haute sensibilité du territoire. On y obtient des valeurs moyennes régionales pour l'alcalinité de 55 µeq/L et de 17 µS/cm pour la conductivité.

Le transport atmosphérique des composés acides constitue une menace pour de nombreuses rivières à saumons de cette région dont le potentiel est inestimable. En Nouvelle-Écosse, Watt et al. (1983) ont montré que la

disparition des stocks de saumons était attribuable à l'acidification par les précipitations. La région de la Côte-Nord du Saint-Laurent, bien que située plus loin des sources majeures d'émissions des oxydes de soufre et d'azote, n'en constitue pas moins une zone menacée (Van Coillie et al., 1982, 1984; Brouard et al., 1982).

Cette étude vise à montrer l'importance du transport atmosphérique dans la modification de la composition chimique des eaux de surface de rivières à saumons de la Côte-Nord du Saint-Laurent. L'approche utilisée peut se résumer en deux étapes. La première a consisté à caractériser les eaux de surface en examinant la répartition des principaux paramètres physico-chimiques, particulièrement celle des sulfates. La seconde étape a conduit à la caractérisation temporelle des rivières en examinant la variation saisonnière du bilan des charges exportées pour un petit bassin de drainage.

TERRITOIRE À L'ÉTUDE

Le territoire à l'étude (figure 1) est exposé à des précipitations totales annuelles qui varient de 102 à 132 cm avec une fraction nivale de 35 à 40% (Ferland et Gagnon, 1967). Le substrat rocheux est principalement constitué de roches cristallines comprenant, entre autres, des gneiss granitiques, des paragneiss et de la migmatite. On retrouve également des roches granitiques et des gneiss d'origine plutonique. La composition géologique des dépôts de surface est peu connue. Ces dépôts de surface sont surtout représentés par du till et des matériaux fluvioglaciers. Les cartes de sensibilité du groupe États-Unis - Canada (1983) montrent que cette région comprend généralement des zones dont le sol a une faible épaisseur (25 à 100 cm) et une texture sablonneuse.

Bassin versant expérimental

Le bassin versant de la rivière Casette (superficie de 40 km²), qui a fait l'objet d'une étude plus approfondie, est un sous-bassin de la rivière des Escoumins. Sa composition géologique a été décrite par Brouard et Lachance (1986). De façon générale, la géologie des roches de ce bassin est

relativement similaire à celle retrouvée sur l'ensemble de la Côte-Nord. On y retrouve principalement des gneiss gris dont la composition chimique montre une nette dominance des silicates (60%), suivie des oxydes d'aluminium (15%), puis des oxydes de fer, de magnésium, de calcium, de sodium et de potassium. Les sols qu'on y retrouve sont surtout des podzols (humu-ferriques et ferro-humiques).

MÉTHODES

Pour la caractérisation spatiale, les données utilisées proviennent de six campagnes d'échantillonnage effectuées sur 21 rivières de la Côte-Nord (Figure 1). Ces tournées d'échantillonnage ont été réalisées au cours des mois suivants: septembre et octobre 1982, mars, mai, juin et août 1983. Les échantillons d'eau ont été prélevés près de l'embouchure des cours d'eau, en amont de la zone d'influence des marées. Le protocole d'échantillonnage et les méthodes analytiques employés ont été décrits par Brouard (1984). Le pH et la conductivité étaient mesurés in situ. Les autres déterminations ont été effectuées au laboratoire sur des échantillons non filtrés (moins de 24 h après leur prélèvement). L'alcalinité était obtenue par la méthode de Gran modifiée par Kramer (1980). Les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ étaient mesurés par spectrophotométrie à l'absorption atomique, SO_4^{2-} et Cl^- par colorimétrie (bleu de méthyl-thymol pour SO_4^{2-} et nitrate mercurique pour Cl^-) et la couleur vraie par comparaison visuelle. Le carbone organique et inorganique dissous ont été déterminés par spectrophotométrie à l'infra-rouge après combustion. Les anions organiques ont été calculées à partir du pH et du carbone organique dissous selon la méthode développée par Oliver et al. (1983).

Les données obtenues pour la caractérisation temporelle proviennent d'une étude effectuée en 1983-84 sur un petit affluent (rivière Cassette) de la rivière des Escoumins (Figure 1). Au cours de cette étude (Brouard et Lachance, 1986), les eaux de la rivière Cassette ont été échantillonnées à une fréquence variable: bi-mensuelle (1er novembre 1983 au 15 mars 1984), bi-hebdomadaire (du 15 mars au 1er juin 1984) et mensuelle (du 1er juin au 30 octobre 1984). On a mesuré également la qualité des précipitations sur des échantillons prélevés à l'aide d'un collecteur de type Sangamo installé sur le bassin à l'étude. Les méthodes

analytiques employées sont semblables à celles décrites précédemment à l'exception de celles pour les sulfates et les chlorures, qui ont été obtenues par chromatographie ionique.

Les charges en substances dissoutes (saisonnnières ou annuelles) exportées du bassin versant à l'étude ont été obtenues en multipliant les concentrations moyennes (pondérées par le débit) par le débit spécifique moyen saisonnier ou annuel. Les débits utilisés proviennent de stations hydrométriques opérées par le ministère de l'Environnement du Québec. Sur le bassin versant expérimental, les apports atmosphériques (saisonniers ou annuels) sont calculés à partir des concentrations moyennes (pondérées par le volume de précipitation recueillie) multipliés par la quantité de précipitation mesurée par un collecteur standard (pluviomètre ou écran Nipher).

CARACTÉRISTIQUES SPATIALES

La composition physico-chimique des eaux de surface des rivières de la Haute, Moyenne et Basse Côte-Nord (Tableau 1) montre que celles-ci sont hautement sensibles à l'acidification par les précipitations. En effet, les faibles valeurs de conductivité (16-18 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et d'alcalinité (34-72 $\mu\text{eq}/\text{L}$), présentées au tableau 1, indiquent que les bassins versants compris dans les trois zones possèdent une faible capacité de neutralisation des ions H^+ .

Évolution spatiale des concentrations

L'examen de l'évolution selon la longitude des valeurs moyennes des variables physico-chimiques examinées révèle une diminution de l'ouest vers l'est pour les paramètres suivants: somme des cations, bicarbonates, pH et sulfates (Figure 2). Les relations vis-à-vis de la longitude sont hautement significatives ($p < 0,001$).

La diminution selon la longitude de la somme des cations (Figure 2a) et des bicarbonates (Figure 2b) indique une baisse de la minéralisation d'ouest en est. Cette diminution de la minéralisation des eaux indique une augmentation concomitante de la sensibilité du milieu aux apports atmosphériques acides.

Cette augmentation de la vulnérabilité peut difficilement être expliquée à partir de l'information obtenue des cartes de Shilts (1981) ou de celles du groupe États-Unis-Canada (1983). En effet, ces cartes montrent que toute la région de la Côte-Nord est relativement homogène du point de vue géologique.

Parmi les paramètres examinés, les sulfates (Figure 2d) ont la plus forte dépendance vis-à-vis de la longitude ($R^2 = 0,48$), leurs teneurs décroissant de l'ouest vers l'est du territoire. Cette distribution des sulfates pourrait s'expliquer, soit par un apport naturel d'origine géologique, soit par le transport à longue distance des polluants aéroportés. On sait toutefois que la présence de sulfites dans les roches d'un bassin peut être une source importante de sulfates dans les eaux et ce, même si cet élément est présent à l'état de trace. Cependant, aucune indication fournie par la géologie de la région ne permet de confirmer cette hypothèse. Par contre, le gradient décroissant d'ouest en est des sulfates, observé sur la région, indique que le transport atmosphérique à longue distance est plutôt le facteur explicatif des teneurs en sulfates dans les eaux de surface. Cette région de la Côte Nord en effet, est dans la trajectoire des vents dominants en provenance de l'ouest et du sud-ouest, là où on trouve des sources majeures d'émission d'oxydes de soufre (Noranda, Sudbury, Mid-West américain).

Les teneurs en sulfates (corrigées pour les sels marins) de l'ordre de 20-30 µeq/l, observées dans le secteur est de la Côte-Nord, représentent probablement des concentrations naturelles minimales. Cette évaluation est considérablement inférieure à celle réalisée pour des rivières du secteur ontarien du bouclier précambrien (moyenne de 76 µeq/L; Johnson, 1985). Dans des lacs de la région septentrionale du Nouveau-Québec, loin des sources d'émission de soufre, une moyenne régionale de 33 µeq/L a été observée (Bobée et al., 1982). Des niveaux similaires (moyenne de 37 µeq/L) ont également été relevés pour des lacs situés à l'extrémité est de la Côte-Nord (Langlois et al., 1985).

On observe une diminution significative des valeurs moyennes du pH (de 6,5 à 6,0) d'ouest en est (Figure 2 c). Les valeurs relativement plus élevées pour la Haute Côte-Nord peuvent s'expliquer par une minéralisation plus élevée, et conséquemment par une capacité de neutralisation plus grande des apports

atmosphériques acides. La diminution du pH pour la Basse Côte-Nord est concomitante avec celle des bicarbonates, puisque dans un milieu aquatique le produit $[\text{HCO}_3^-] [\text{H}^+]$ tend à demeurer constant (Stumm et Morgan, 1981). Ce surplus d'ions H^+ , conséquent à une minéralisation plus faible, est accentuée par une contribution relativement plus importante des acides organiques dans cette partie du territoire. En effet, le rapport $[\text{RCOO}^-]/\Sigma [\text{anions}]$ passe de 0,2 sur la Haute Côte-Nord à 0,5 sur la Basse Côte-Nord (Figure 2e).

On peut déduire de ce qui précède que les niveaux d'acidité relativement plus élevés sur la Basse Côte-Nord sont principalement attribuables à la faible minéralisation des eaux de surface. Le fait que le rapport $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ soit constant à l'échelle de la longitude (Figure 2f) indique que les variations spatiales du pH ne sont pas expliquées par les sulfates. Les acides organiques jouent un rôle non négligeable, leur présence contribuant à accentuer le gradient du pH selon la longitude.

Évolution spatiale des charges exportées

Pour vérifier si le gradient des sulfates est explicable en termes de transport atmosphérique des composés de soufre, on a procédé au calcul des charges exportées de 21 rivières de la Côte-Nord (Figure 1). Selon les rivières, les charges annuelles exportées varient entre 8 et 26 kg/ha-an, la moyenne pour l'ensemble se situant autour de 17 kg/ha-an. Les apports atmosphériques de sulfates sur la région de la Côte-Nord ne sont pas connus avec beaucoup de précision à cause de la faible densité du réseau canadien d'échantillonnage des précipitations (CANSAP) et de l'absence de stations du réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec (REPQ). Cependant, les données calculées par le groupe États-Unis-Canada (1983) indiquent que les apports atmosphériques de sulfates sont du même ordre de grandeur (15-20 kg/ha-an) que les charges exportées (Figure 1). Les résultats de cette comparaison montrent que sur l'ensemble du territoire de la Côte-Nord, l'altération géochimique exerce un rôle négligeable dans les teneurs de sulfates des eaux de surface. Les apports atmosphériques constituent donc la principale source de sulfates.

Malgré des fluctuations importantes d'un cours d'eau à un autre, la masse exportée des sulfates diminue de l'ouest vers l'est. Cette évolution devient plus apparente si l'on examine les moyennes régionales. En effet, si l'on regroupe les rivières selon la Haute, la Moyenne et la Basse Côte-Nord, la répartition de la charge exportée de sulfates ($\text{kg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) est la suivante:

Zone	Haute Côte-Nord	Moyenne Côte-Nord	Basse Côte-Nord
moyenne	21,3	16,6	12,6
médiane	22,6	16,0	11,2

En passant de la Haute à la Basse Côte-Nord, la charge exportée de sulfates diminue en moyenne de 40 à 50%. Ce gradient peut s'expliquer par la diminution des retombées atmosphériques du soufre en fonction de la distance des sources majeures d'émission situées plus au sud-ouest.

CARACTÉRISTIQUES SAISONNIÈRES

La composition physico-chimique des eaux du bassin versant expérimental de la rivière Cassette est légèrement différente de la composition moyenne obtenue pour la Haute, Moyenne et Basse Côte-Nord (Tableau 1). La minéralisation des eaux, indiquée par l'alcalinité et le calcium, y est plus élevée que sur les rivières de la Haute Côte-Nord.

Sur le bassin versant de la rivière Cassette, les apports atmosphériques et les charges exportées à l'exutoire (Tableau 2) ont été calculés pour la période du 1er novembre 1983 au 31 octobre 1984. Les apports atmosphériques en ions majeurs calculés sur ce bassin sont comparables à ceux obtenus par le réseau REPQ pour des stations voisines (Grimard, 1984; 1985). La charge exportée à l'exutoire du bassin est trois fois plus élevée que les apports atmosphériques, le calcium, les sulfates et les bicarbonates représentant 86% de cette masse chimique. L'apport atmosphérique est plus élevée que l'exportation en surface pour H^+ , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NH_4^+ alors qu'il est plus faible pour HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} (Tableau 2).

L'étude du bilan hydro-chimique du bassin de la rivière Cassette permet de classer les ions majeurs en trois catégories:

- les substances dont l'apport atmosphérique est plus grand que la masse exportée: H^+ , NO_3^- , NH_4^+ ;
- les substances dont l'apport atmosphérique est approximativement égal à la masse exportée: Cl^- , SO_4^{2-} ;
- les substances dont l'apport atmosphérique est beaucoup plus faible que la masse exportée: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- .

Précisons cependant que les éléments Na^+ et K^+ sont parfois classés dans la deuxième catégorie (Christophersen et al., 1982).

Afin de mieux suivre la dynamique chimique du bassin, on a calculé la répartition saisonnière des apports atmosphériques et des charges exportées à l'exutoire pour les nitrates, les sulfates et le calcium (Figure 3).

La comparaison des charges saisonnières présentées montre qu'une quantité relativement importante de nitrates s'accumule au cours de l'hiver (48,4% des apports atmosphériques annuels). La crue printanière (61,8% du volume d'eau annuel) favorise la libération d'une quantité appréciable de nitrates (69% de la charge annuelle), mais cette charge libérée est encore inférieure à la charge atmosphérique accumulée au cours de l'hiver et du printemps. La charge exportée est relativement faible au cours de l'été et de l'automne; l'activité biologique et la présence de végétation favoriseraient la rétention des nitrates sur le bassin.

Les apports atmosphériques de calcium sont généralement négligeables par rapport à la charge exportée. En effet, dans les processus d'altération, les ions H^+ , qui proviennent de la dissociation de l'acide carbonique ou de l'acide sulfurique, réagissent avec les minéraux, selon des mécanismes de dissolution, d'échange ou d'adsorption, causant ainsi une libération des cations tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ . Lorsque de grandes quantités d'eau sont en circulation,

comme au printemps, la concentration de ces éléments dans les eaux de surface a tendance à diminuer par effet de dilution par les eaux de précipitation.

En ce qui concerne les sulfates, la situation est différente de celle observée pour les deux autres variables. Comme pour les nitrates, on observe en hiver un apport atmosphérique plus grand que le charge exportée indiquant une accumulation possible dans le manteau nival. Au cours du printemps, la charge exportée devient plus de deux fois plus grande que l'apport atmosphérique (Figure 3). Le surplus de sulfates accumulé au cours de l'hiver n'est pas suffisamment grand pour expliquer cette libération massive printanière. Une partie relativement importante de sulfates libérés dans les eaux de surface au printemps proviendrait donc des sulfates accumulés dans les sols au cours de l'été et de l'automne.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Le gradient décroissant d'ouest en est des concentrations de sulfates des rivières de la région à l'étude indique que le transport à longue distance des composés de soufre est le principal responsable des teneurs en sulfates des eaux de surface de la Côte Nord du Saint-Laurent. Les déviations par rapport à la tendance générale peuvent facilement être expliquées en tenant compte des caractéristiques biophysiques propres à chacun des bassins versants considérés: superficie du bassin, pente, temps de rétention, régime hydrologique, écoulement souterrain, géologie de la roche en place, épaisseur et granulométrie des dépôts de surface, végétation, sols, tourbières, etc.

Une contribution non négligeable des apports atmosphériques en soufre serait d'origine locale. Selon la banque des données d'émission des sources canadiennes et américaines pour l'année 1980 fournies par l'Environmental Protection Agency (EPA) et rapportées par Fortin *et al.* (1986), on note la présence de sources non négligeables d'émission de SO₂ (plus de 10000 tonnes de SO₂/an en 1980) dans la région qui s'échelonne de Baie Comeau à Sept-Iles (Figure 1). En outre, une source ponctuelle d'importance (Mines Gaspé, Murdochville), située dans la péninsule Gaspésienne au sud de la région à l'étude (150 km environ), rejette dans l'atmosphère plus de 90000 tonnes de SO₂/an (données de 1980) par une cheminée de plus de 200 mètres. Il est

difficile d'évaluer présentement les contributions respectives de chacune de ces sources. Une étude de simulation des retombées atmosphériques sur l'est du Canada (Lelièvre et al., 1985) a montré que pour la région de la Côte Nord du Saint-Laurent, les contributions en retombées humides de sulfates des sources américaines, ontariennes et québécoises s'élevaient respectivement à 40-50%, 10-15% et 30-40%.

Les résultats du bilan des apports atmosphériques et des charges exportées de sulfates ont montré que l'anion sulfate est un élément qui peut être considérée comme mobile sur une base annuelle, mais non sur une base saisonnière. Dans cette région de la Côte Nord soumise à d'importantes accumulations de neige au cours de l'hiver et à des crues printanières prononcées, les charges de sulfates exportées par les bassins au cours du printemps ne sont pas explicables uniquement par les apports atmosphériques de sulfates accumulées au cours de l'hiver et du printemps, mais également par ceux accumulés lors des saisons précédentes d'été et d'automne. La présence de végétation et de matière organique dans les sols favoriseraient une rétention de cet élément au cours des saisons de croissance de la végétation (Rochelle et al., 1987). Le lessivage printanier libérerait donc une partie de cet élément accumulé dans les sols. Cet apport supplémentaire de sulfates contribuerait ainsi à accentuer le choc printanier. Des valeurs printanières de pH inférieures à 6,0 sont fréquemment rencontrées dans les eaux de la région à l'étude (Walsh et Vigneault, 1986).

De ce qui précède, on doit conclure que les teneurs en sulfates dans ces eaux ont augmenté suite à l'augmentation des émissions de SO₂ au cours des dernières décades. Cette augmentation aurait été plus importante dans celle de la Haute Côte Nord (partie ouest de la région) que dans celle de la Basse Côte Nord. On peut alors se demander de quelle façon cette augmentation des apports atmosphériques de sulfates s'est répercutée sur l'équilibre ionique des eaux de ces régions.

Le gradient décroissant d'ouest en est observé pour les variables de minéralisation (alcalinité, somme des cations, conductivité; figure 2) peut être expliqué de deux façons:

- Les régions de la Haute Côte Nord et à un moindre degré de la Moyenne Côte Nord seraient des régions moins sensibles en raison de différences dans l'abondance et le type de dépôts qui favoriseraient l'altération des minéraux.
- L'augmentation des apports atmosphériques d'acide sulfurique aurait résulté en un accroissement équivalent du taux de lessivage des cations de telle sorte que les niveaux de pH et d'alcalinité se maintiennent aux mêmes niveaux que précédemment.

Il est difficile présentement de départager l'importance de chacun des phénomènes en cause. La deuxième hypothèse n'a pas toujours reçu l'attention méritée. Il est généralement admis que l'augmentation de l'acidité des précipitations se traduit par un lessivage accru des cations facilement lessivables. Cependant, l'augmentation du taux de lessivage, suite à une augmentation des apports atmosphériques, pourrait n'être que temporaire (Galloway et al., 1983; Cosby et al., 1985). À un stade d'acidification plus avancé, le taux de lessivage des cations redeviendrait au niveau initial avant acidification. L'augmentation des sulfates se traduirait alors par une diminution équivalente d'alcalinité. Quant au pH, sa valeur atteindrait des niveaux autour de 5,0 lorsque l'alcalinité serait nulle ou pratiquement inexistante.

On constate, en outre, la présence d'une certaine acidification d'origine organique. En effet, les anions organiques jouent un rôle important dans

l'équilibre chimique des rivières de la Côte Nord, spécialement celles de la Basse Côte Nord et de l'est de la Moyenne Côte Nord. Cette contribution des substances humiques et fulviques est suffisante pour expliquer les niveaux d'acidité légèrement plus élevés dans cette partie de la Côte-Nord où les retombées de sulfates sont relativement faibles. Conséquemment, on peut se demander si cette acidification d'origine organique ne rend pas cette région encore plus vulnérable à une acidification par les précipitations.

En résumé, il ressort que la région de la Côte Nord du fleuve Saint-Laurent constitue un vaste territoire particulièrement menacé par l'acidité des précipitations. La faible minéralisation des eaux qu'on y retrouve indique que les écosystèmes aquatiques ont une très faible capacité de neutralisation des apports acides atmosphériques. Les résultats du bilan annuel des charges de soufre sur des bassins versants de cette région fournissent une évidence que les apports atmosphériques y constituent la principale source de sulfates dans les eaux de surface. Le gradient observé d'ouest en est des concentrations de sulfates indique que le transport atmosphérique à longue distance serait le principal facteur. Les apports atmosphériques du soufre ne peuvent présentement être reliés aux variations spatiales du pH moyen annuel des rivières. On possède cependant des indications que les sulfates y joueraient un rôle important dans les fluctuations saisonnières du pH et contribueraient ainsi à accentuer le choc printanier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Barrie, L.A. et A. Sirois (1982).

An analysis and assessment of precipitation chemistry measurements made by Cansap: 1977-1980. Environnement Canada, Atmospheric Environment Service, 163 p.

Bobée, B., Y. Grimard, M. Lachance et A. Tessier. (1982).

Nature et étendue de l'acidification des lacs du Québec. INRS-Eau. Rapport scientifique no 140, Environnement Québec, publication no. PA-1, 243 p., 3 annexes.

Brouard, D. (1984).

Échantillonnage périodique de rivières à saumon de la Côte-Nord du fleuve Saint-Laurent (1982-1983). Étude présentée par Gilles Shooner Inc. au ministère des Pêches et Océans du Canada, 22 p.

Brouard, D. et M. Lachance (1986).

Effets des précipitations acides sur un sous-bassin versant de la rivière des Escoumins: reponse hydrochimique et biologique. Rapp. Tech. Can. Sci. Halieut. Aquat. no 1459, 87 p.

Brouard, D., M. Lachance, G. Shooner et R. Van Coillie (1982).

Sensibilité à l'acidification de quatre rivières à saumons de la Côte-Nord du Saint-Laurent (Québec). Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. No 1109, 56 p.

Cosby, B.J., G.M. Hornberger, J.N. Galloway et R.F. Wright (1985).

Time scales of catchment acidification. Environ. Sci. Technol., 19: 1144-1149.

Christophersen, N., H.M. Seip et R.F. Wright. (1982).

A model for streamwater chemistry at Birkenes, Norway. Water Resour. Res. 18: 977-996.

Dupont, J. et Y. Grimard (1986).

Systematic study of lake water acidity in Quebec. Water Air Soil Pollut., 31: 223-230.

États-Unis - Canada (1983).

Memorandum of intent on transboundary air pollution. Impact assessment work group I final report. January 1983.

Ferland, M.G. et R.M. Gagnon (1967).

Climat du Québec méridional. Ministère des Richesses naturelles, service de la météorologie, rapport M.P.-13, 93 p.

Fortin, J.P., G. Boulet et M. Lachance (1986).

Calibration et optimisation du modèle québécois de transport à grandes distances des polluants atmosphériques. INRS-Eau, rapport scientifique no 197, 98 p.

Galloway, J.N., S.A. Norton et M.R. Church (1983).

Freshwater acidification from atmospheric deposition of sulfuric acid: a conceptual model. Environ. Sci. Technol., 17: 541A-545A.

Grimard, Y. (1984).

Réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec: sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1981-1982-1983. Ministère de l'environnement du Québec, service de la qualité des eaux, rapport PA-11, Envirodoq 840595, 163 p.

Grimard, Y. (1985).

Réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec: sommaire des données de précipitations 1984, Ministère de l'environnement du Québec, rapport PA-19, Envirodoq 870726, 99 p.

Harvey, H.H., P.T. Dillon, J.R. Kramer, R.C. Pierce et D.M. Wheldpale (1981).

Acidification in the canadian aquatic environment: scientific criteria for assessing the effects of acidic deposition on aquatic ecosystems. National Research Council of Canada, Associate committee on scientific criteria for environmental quality, NRCC No 18475, Ottawa, 369 p.

Jeffries, D.S., D.L. Wales, J.R.M. Kelso et R.A. Linthurst (1986).

Regional chemical characteristics of lakes in north america. Part I - Eastern Canada. Water Air Soil Pollut., 31: 551-567.

Johnson. (1985).

Acidification of Georgian Bay rivers estimated by modifications of the Wright-Henriksen model. J. Great Lakes Res. 11: 163-170.

Kramer, J.R. (1980).

Precise determination of low alcalinities using the modified Gran analysis. Environmental Geochemistry Report no 1980/1. McMaster University, Hamilton, Ontario.

Lachance, M., B. Bobée et Y. Grimard (1985).

Sensitivity of southern Quebec lakes to acidic precipitation. Water Air Soil Pollut., 25: 115-132.

Langlois, C., A. Lemay, J. Ouzilleau et Y. Vigneault (1985).

Qualité physico-chimique de 251 lacs du bouclier canadien (Québec). Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques no 1792, 83 p.

Lelièvre, C., M. Lachance et J.P. Fortin (1985).

Modèle québécois de transport à grande distance des polluants atmosphériques. INRS-Eau, rapport scientifique no 180, Environnement Québec, rapport PA-16, 213 p.

Linthurst, R.A., D.H. Landers, J.M. Eilers, P.E. Kellar, D.F. Brakke, W.S. Overton, R. Crowe, E.P. Meier, P. Kanciruk et D.S. Jeffries (1986).

Regional chemical characteristics of lakes in north America. Part II: Eastern United States. Water Air Soil Pollut., 31: 577-591.

Minns, C.K. et J.R.M. Kelso (1986).

Estimates of existing and potential impact of acidification of the freshwater fishery resources and their use in eastern Canada. Water, Air Soil Pollut., 31: 1079-1080.

Oliver, B.G., E.M. Thurman et R.L. Malcolm (1983).

The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters. *Geochim. cosmichim. Acta*, 47: 2031-2035.

Rochelle, B.P., M.R. Church et M.B. David (1987).

Sulfur retention at intensively studied sites in the U.S. and Canada. *Water Air Soil Pollut.*, 33: 73-83.

Shilts, W. (1981).

Sensitivity of bedrock to acid precipitation: modification by glacial processes. Paper 81-14, Geological Survey of Canada, 7 p., 3 cartes.

Stumm, W.A. et J.J. Morgan (1981).

Aquatic Chemistry. Wiley, New York, 780 p.

Van Coillie, R., D. Brouard, M. Lachance et Y. Vigneault (1984).

Possibilités écotoxicologiques des précipitations acides pour le saumon dans 4 rivières à la Côte-Nord du fleuve Saint-Laurent. *Ann. Limnol.*, 20: 215-227.

Van Coillie, R., D. Brouard, M. Lachance et Y. Vigneault (1982).

Effets physico-chimiques des précipitations acides sur quatre rivières à saumons. *Eau du Québec*, 15: 384-393.

Walsh, G., G. Verreault et Y. Vigneault (1987).

Acidification minérale et organique des rivières de la Côte-Nord du golfe Saint-Laurent. *Naturaliste Canadien* (sous presse).

Walsh, G. et Y. Vigneault (1986).

Analyse de la qualité de l'eau de rivières de la Côte-Nord du golfe Saint-Laurent en relation avec les processus d'acidification. *Rapp. Tech. Can. Sci. Halieut. Aquat.* no 1540, 118 p.

Watt, W.D., C.D. Scott et W.J. White (1983).

Evidence of acidification of some Nova Scotian rivers and its impact on atlantic salmon Salmo salar. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40: 462-473.

Tableau 1: Valeurs moyennes des différents paramètres physico-chimiques considérés.

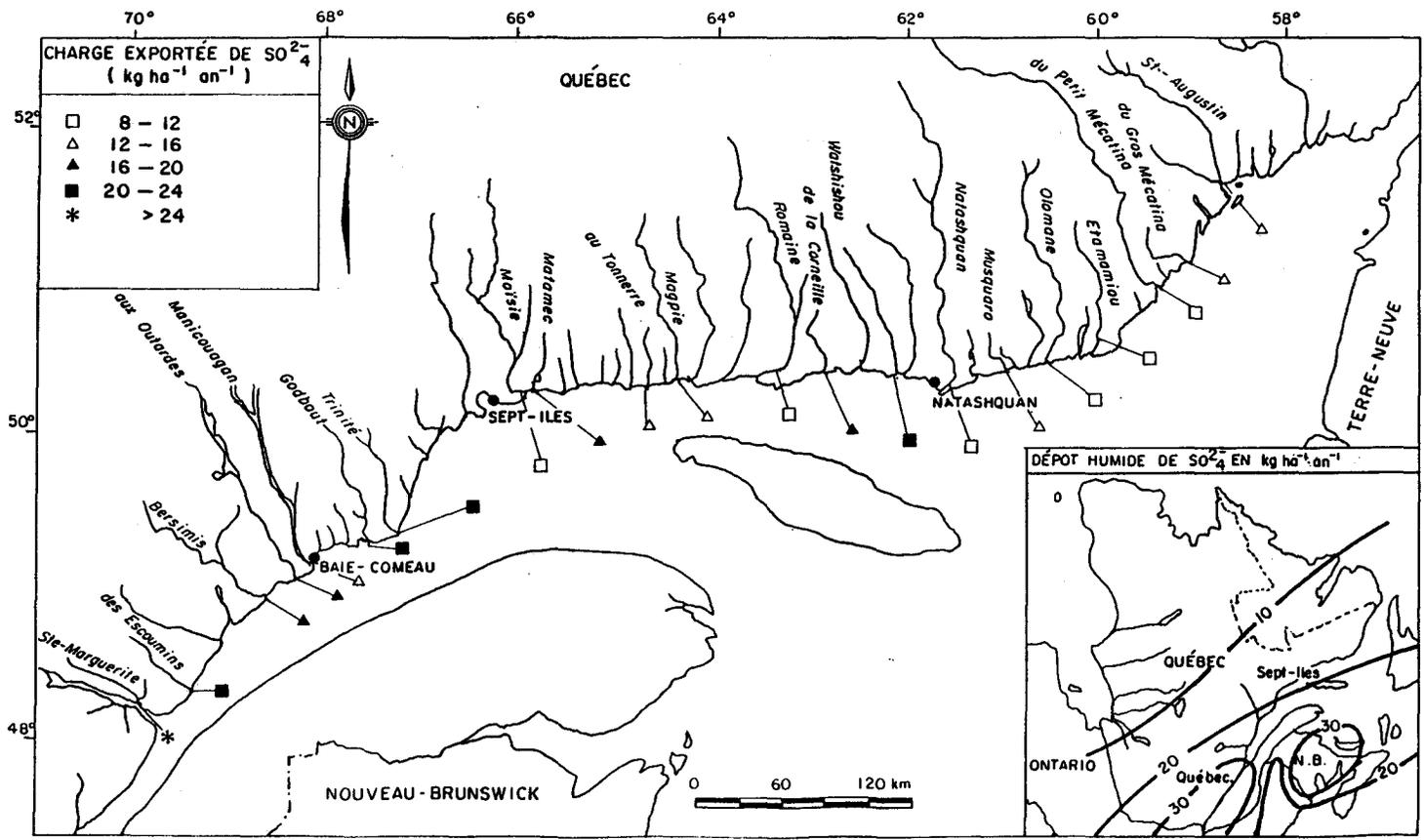
		Haute Côte-Nord (7 rivières) ¹	Moyenne Côte-Nord (7 rivières)	Basse Côte-Nord (7 rivières)	rivière Cassette
H ⁺ (pH)	(µéq/L)	0,5 (6,5)	1,2 (6,3)	1,1 (6,1)	0,247 (6,6)
Conductivité	(µS/cm)	18	16	16	26
Alcalinité	(µg/L)	72	61	34	154
COD	(mg/L)	5,2	5,0	4,8	4,9
Couleur	(u.H.)	25	32	35	29
NO ₃ ⁻	(µéq/L)	5,2	2,0	1,7	5,7
SO ₄ ²⁻	(µéq/L)	52	40	31	51
Cl ⁻	(µéq/L)	43	33	44	14
RCOO ⁻	(µéq/L)	45	46	47	47
Na ⁺	(µéq/L)	52	42	44	31
K ⁺	(µéq/L)	11	6	5	10
Ca ²⁺	(µéq/L)	98	77	58	148
Mg ²⁺	(µéq/L)	42	36	29	35
Al _{sol}	(µg/L)	-	-	-	51
Al _{tot}	(µg/L)	251	305	214	-

¹ Haute Côte-Nord: Sainte-Marguerite à Trinité
Moyenne Côte-Nord: Moisie à Watshishou
Basse Côte-Nord: Natashquan à Saint-Augustin

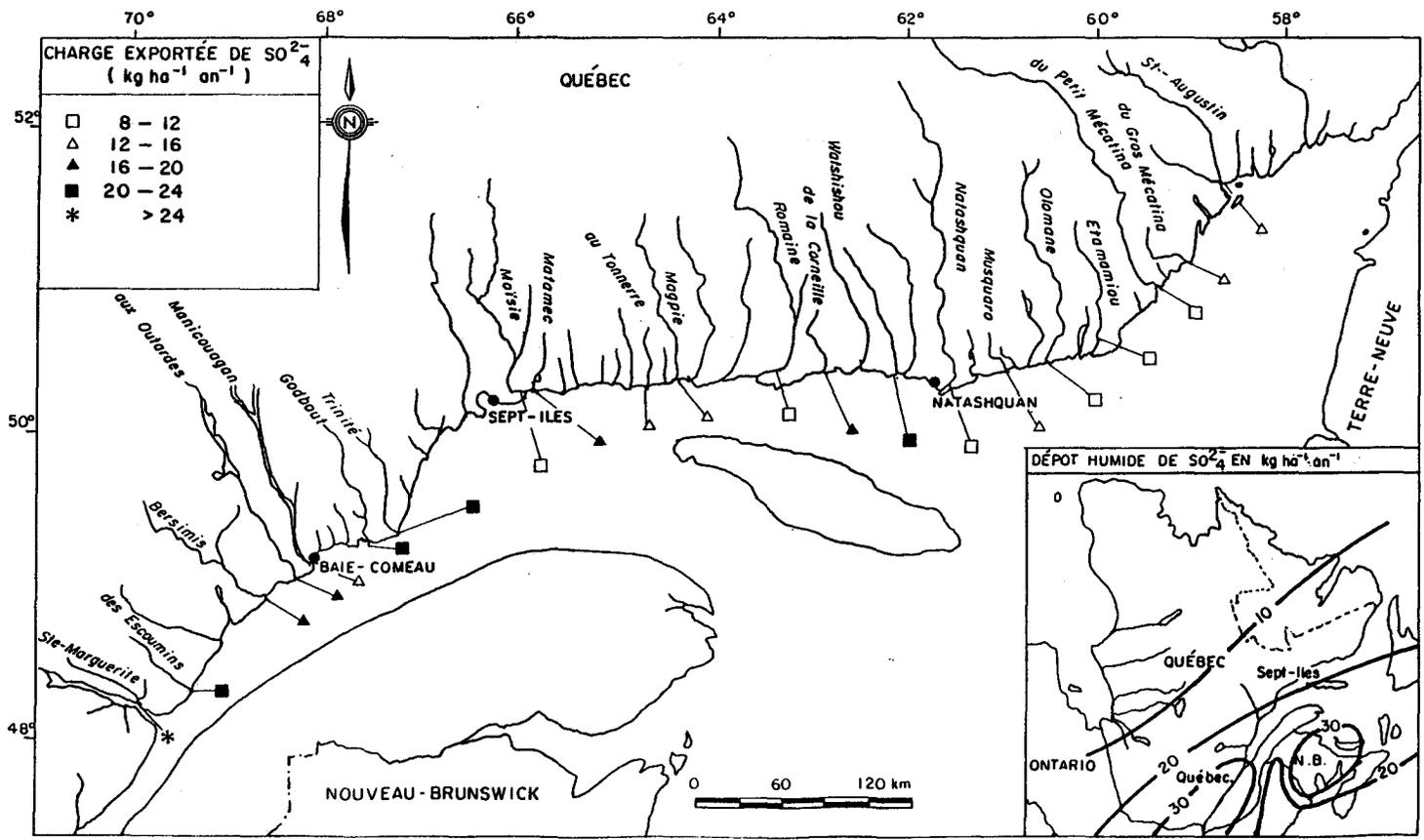
Tableau 2: Bilan hydrochimique sur le bassin de la rivière Casette pour l'ar
1983-1984.

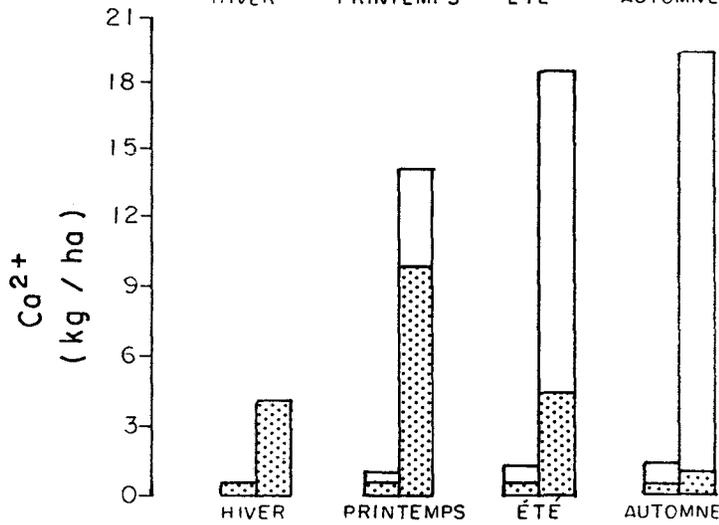
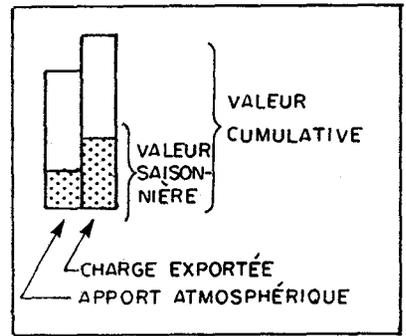
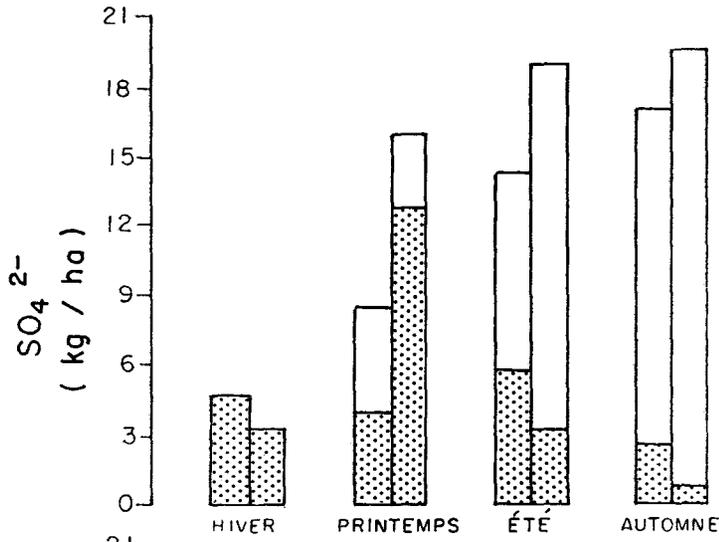
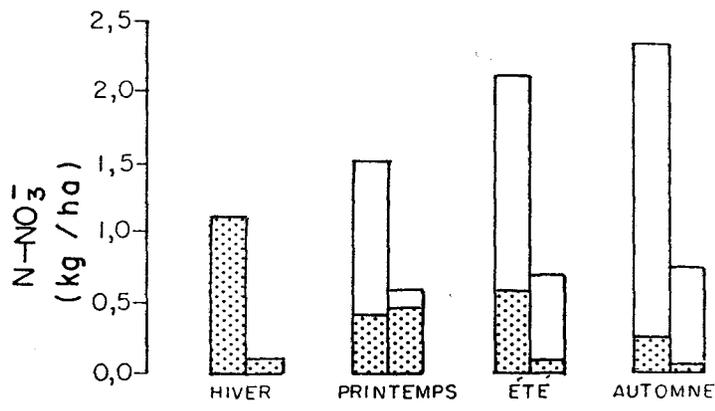
Variables physico-chimiques	Apport atmosphérique (kg/ha)	Charge exportée (kg/ha)	Bilan (kg/ha)
H ⁺	0,405	0,0029	0,40
HCO ₃ ⁻	-	54,1	-54,1
N-NO ₃ ⁻	2,33	0,70	1,63
Cl ⁻	3,90	3,67	0,23
SO ₄ ²⁻	16,81	19,7	- 2,89
N-NH ₄ ⁺	1,38	0,30	1,08
Na ⁺	2,28	4,76	- 2,48
K ⁺	0,58	2,70	- 2,12
Ca ²⁺	1,09	19,0	-17,9
Mg ²⁺	0,30	2,81	- 2,51

- Figure 1: Répartition spatiale des charges exportées de sulfates de 21 rivières de la Côte-Nord du Saint-Laurent (Québec).
- Figure 2: Évolution selon la longitude de variables physico-chimiques mesurées sur les 21 rivières de la Côte-Nord du Saint-Laurent: valeurs moyennes \pm écarts types calculés sur six échantillons prélevés de septembre 1982 à août 1983.
- Figure 3: Variation saisonnière des apports atmosphériques et des charges exportées de nitrates, de sulfates et de calcium pour la rivière Cassette.

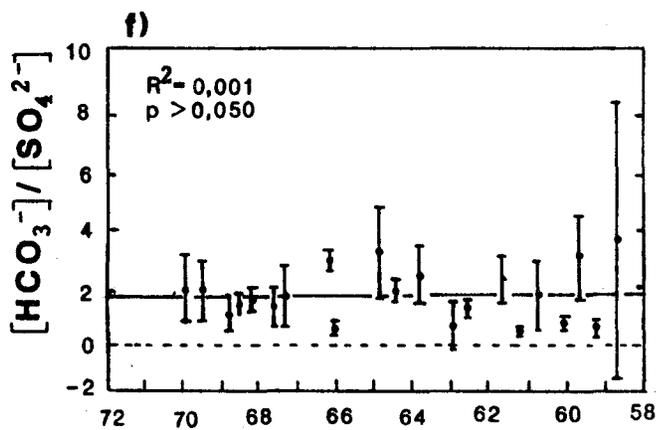
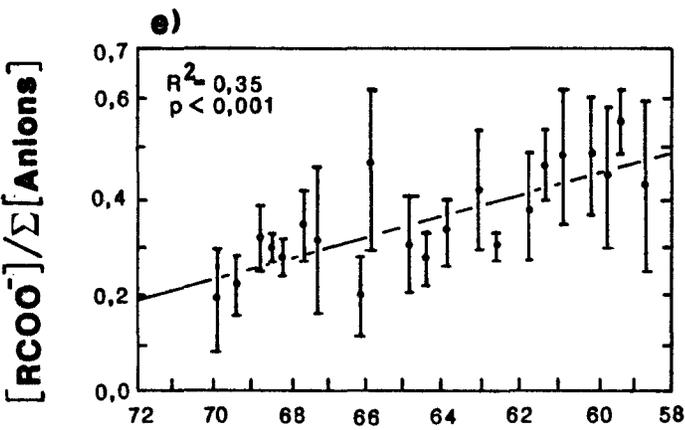
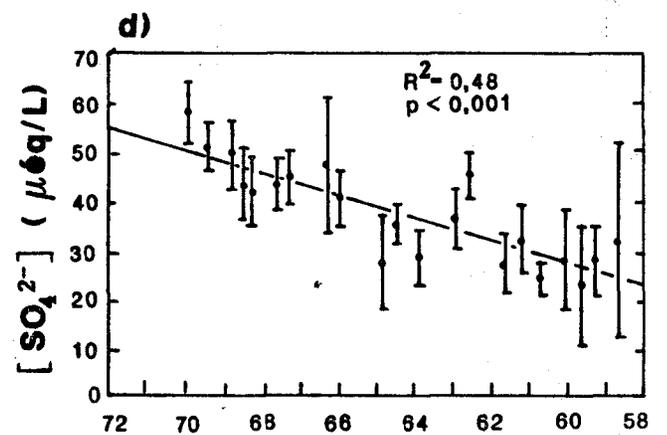
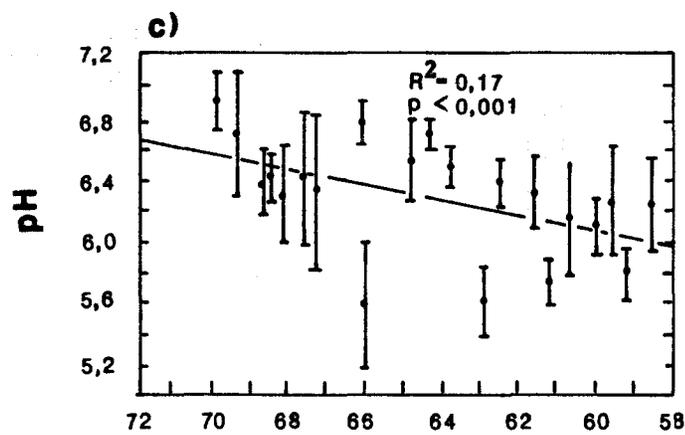
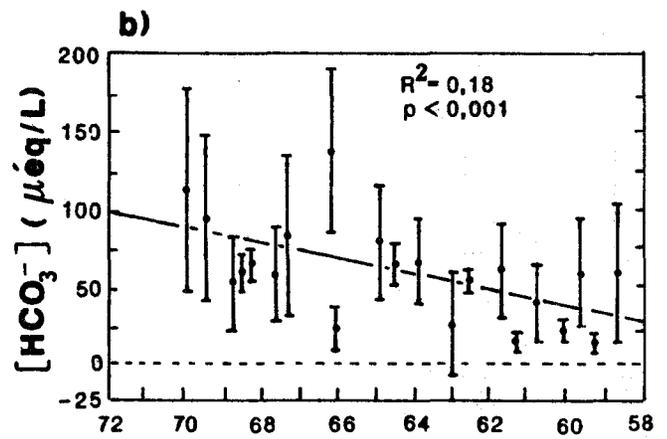
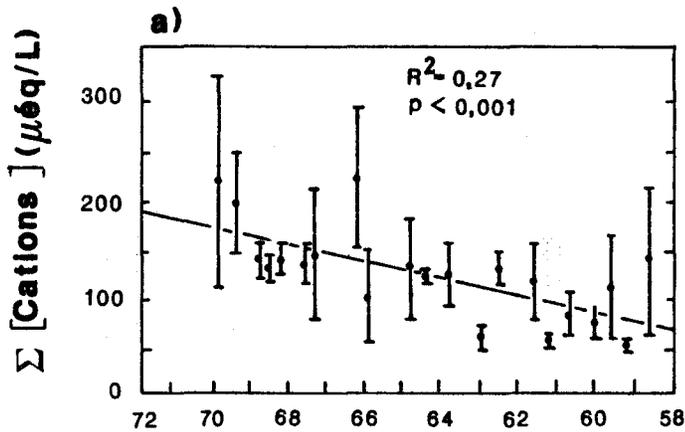


Symbol	Export Charge Range (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)
□	8 - 12
△	12 - 16
▲	16 - 20
■	20 - 24
*	> 24





HIVER : (83-11-01) à (84-04-05)
 PRINTEMPS : (84-04-06) à (84-05-30)
 ÉTÉ : (84-05-31) à (84-08-29)
 AUTOMNE : (84-08-30) à (84-10-31)



OUEST

Longitude

EST