

Analyses directionnelles multivariées de la qualité des précipitations sur la région de Québec

C. Laberge, D. Cluis et G. M. Saulnier

Volume 7, numéro 3, 1994

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705201ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705201ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Laberge, C., Cluis, D. & Saulnier, G. M. (1994). Analyses directionnelles multivariées de la qualité des précipitations sur la région de Québec. *Revue des sciences de l'eau*, 7, (3), 269–284. <https://doi.org/10.7202/705201ar>

Résumé de l'article

La question des précipitations acides est devenue une des principales préoccupations environnementales de ce siècle. Les dommages engendrés touchent l'ensemble des composantes atmosphérique, aquatique et terrestre de notre écosystème. Dans cet article, l'intérêt est tourné vers le transport des substances polluantes en faisant intervenir le vecteur des précipitations acides: le vent. Il existe une croyance populaire, largement répandue dans l'est du Canada, consistant à admettre que les vents d'est ou du nord sont associés à des précipitations faiblement chargées en éléments acides, contrairement aux vents du sud-ouest qui transporteraient les charges plus contaminées des industries situées dans le Midwest nord-américain. Une confirmation expérimentale de la réalité du phénomène est présentée ici.

Une analyse factorielle des correspondances permet de mettre en évidence des relations entre la direction des vents et la composition chimique des précipitations. Des analyses de variance permettent ensuite de montrer la signification de l'effet de la direction des vents sur les concentrations de sulfates et de nitrates, en plus de mettre en évidence un effet saisonnier significatif pour ces deux variables. Les concentrations de nitrates et de sulfates associées aux vents de l'ouest sont respectivement de 0,33 mg/l⁻¹ et 1,73 mg/l⁻¹ comparativement à 0,24 mg/l⁻¹ et 1,48 mg/l⁻¹ pour les vents provenant de l'est. En ce qui concerne l'effet saisonnier, les concentrations moyennes de nitrates sont plus élevées durant les mois de janvier et de mars alors que les concentrations de sulfates sont plus élevées durant les mois d'été.

Analyses directionnelles multivariées de la qualité des précipitations sur la région de Québec

Multivariate directional analysis of precipitation content in the Quebec region

C. LABERGE, D. CLUIS*, G.-M. SAULNIER¹

Reçu le 8 novembre 1993, accepté le 14 juin 1994**.

SUMMARY

The problem of acidic precipitation has become an important environmental concern; related damages can affect atmospheric, terrestrial and aquatic components of our ecosystem. This paper focuses on wind-driven atmospheric transport of contaminants, notably nitrates and sulfates. Conventional wisdom in eastern Canada holds that winds originating from the east bring precipitation less loaded with acidic components than winds originating from the southwest; the latter carry contaminants generated by industries located in the American Midwest.

An experimental confirmation of this phenomenon is presented here. SPERBER (1987) showed that hourly series of precipitation content and wind direction, measured at a reception site, are adequate to represent the lagrangian history of precipitating systems (New York City region). Following this result, we suppose that the northeastern continental atmospheric system is homogeneous enough so that winds measured at our reception site (Québec City region) are representative of the whole system. Thus, our experiment is performed in eulerian coordinates.

The data bank used in the statistical analyses contains 10 time series: the weekly concentrations of 9 compounds found in the precipitation (H, Ca, Cl, K, Mg, Na, NO₃, NH₄ and SO₄) gathered at the local Montmorency site and a series of weekly prevailing winds measured at the nearby Québec City airport. The time series contain 312 observations covering a full six year period (December 1981 to December 1987). As the original data bank of concentrations is episodic, i.e. an observation is available for each day with a significant precipitation event, volumes and loadings are used to derive the average weekly values of concentrations. In contrast, hourly series of direction (projected in 36 directions) and velocity of the prevailing winds are used to build, via a vectorial addition, a weekly series of wind directions projected on a 12 point wind rose where directions correspond to the wind origin and not its destination.

1. INRS-Eau, 2700 Einstein, Sainte-Foy, BP 7500, P.Q., Canada G1V 4C7.

* Auteur correspondant.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 mars 1995.

Classic statistical methods are used to deal with this data bank. Principal component analysis studies relationships between series of concentrations in the precipitations, while correspondence analysis highlights the relationships between the series of precipitation content and the series of wind direction. The final statistical method, analysis of variance, is used to test the significance of relationships highlighted by the correspondence analysis.

The principal component analysis shows that all variables were positively correlated with the first component, which reflects the fact that a highly loaded precipitation event will show high concentrations for each of the nine variables. The second component discriminates two groups of variables: one includes NO_3 , SO_4 and NH_4 , the other Ca, Mg and Cl. The acidity variable, H, is nearer to the acid ion group (NO_3 , SO_4 and NH_4) than to the other ion group (Ca, Mg and Cl).

The correspondence analysis shows that high concentrations of acidic compounds (NO_3 , SO_4 and NH_4) are highly related to winds from the W and WSW directions; conversely lower concentrations of the same compounds are associated with winds from the E and ENE directions. The elements Ca, Mg and Cl, reputed to be of oceanic origin, show high functional relationships between high concentrations and E, ENE winds and also between low concentrations and W, WSW winds. These results support the popular belief initially presented that acid precipitation is largely associated with winds from the southwest.

The analyses of variance show that precipitation concentrations (NO_3 and SO_4) are significantly different according to the wind directions. Nitrate and sulfate concentrations associated with winds originating from the west are respectively 0.33 mg.l^{-1} and 1.73 mg.l^{-1} compared to 0.24 mg.l^{-1} and 1.48 mg.l^{-1} for winds originating from the east. The analyses of variance also indicate a significant seasonal effect, where mean monthly concentrations in nitrates are highest for winter months and early spring whereas sulfate concentrations are highest for the summer months.

Key-words : *acid rain, eulerian transport, concentration, sulfate, nitrate, wind direction, statistical analyses.*

RÉSUMÉ

La question des précipitations acides est devenue une des principales préoccupations environnementales de ce siècle. Les dommages engendrés touchent l'ensemble des composantes atmosphérique, aquatique et terrestre de notre écosystème. Dans cet article, l'intérêt est tourné vers le transport des substances polluantes en faisant intervenir le vecteur des précipitations acides : le vent. Il existe une croyance populaire, largement répandue dans l'est du Canada, consistant à admettre que les vents d'est ou du nord sont associés à des précipitations faiblement chargées en éléments acides, contrairement aux vents du sud-ouest qui transporteraient les charges plus contaminées des industries situées dans le Midwest nord-américain. Une confirmation expérimentale de la réalité du phénomène est présentée ici.

Une analyse factorielle des correspondances permet de mettre en évidence des relations entre la direction des vents et la composition chimique des précipitations. Des analyses de variance permettent ensuite de montrer la signification de l'effet de la direction des vents sur les concentrations de sulfates et de nitrates, en plus de mettre en évidence un effet saisonnier significatif pour ces deux variables. Les concentrations de nitrates et de sulfates associées aux vents de l'ouest sont respectivement de $0,33 \text{ mg.l}^{-1}$ et $1,73 \text{ mg.l}^{-1}$ comparativement à $0,24 \text{ mg.l}^{-1}$ et $1,48 \text{ mg.l}^{-1}$ pour les vents provenant de l'est. En ce qui concerne l'effet saisonnier, les concentrations moyennes de nitrates sont plus élevées durant les mois de janvier et de mars alors que les concentrations de sulfates sont plus élevées durant les mois d'été.

Mots clés : *précipitations acides, transport eulérien, concentrations, sulfates, nitrates, direction des vents, analyse statistique.*

INTRODUCTION

La préoccupation grandissante de la population pour l'environnement a poussé les gouvernements à travailler vers une solution aux problèmes environnementaux. Parmi les différents problèmes environnementaux, les précipitations acides se retrouvent au premier plan dans l'est du Canada. Les causes de cette importance des précipitations acides sont la faible capacité de neutralisation de la charge acide par les sols et la roche en place ainsi que le niveau élevé des dépôts humides de sulfates (Gouvernement du Canada, 1991). Parmi les effets néfastes des précipitations acides, notons : l'acidification des lacs et rivières qui amène une réduction progressive de la diversité biologique de la vie aquatique (Gouvernement du Canada, 1991 ; CCRS, 1990, partie 4 ; BATES et SIZTO, 1989) ainsi que la détérioration accélérée des matériaux composant les bâtiments et les monuments (Gouvernement du Canada, 1991 ; KUCERA, 1983 ; GIBBONS, 1970). On croit de plus qu'elles contribuent au dépérissement des forêts, notamment des érablières, et peuvent accentuer certains troubles respiratoires chez les humains (Gouvernement du Canada, 1991 ; CCRS, 1990, partie 6). Environnement Canada estime à plusieurs centaines de millions de dollars par année les dommages économiques reliés aux précipitations acides (Gouvernement du Canada, 1991).

Afin de permettre une meilleure connaissance de l'effet des précipitations acides sur les lacs canadiens, Environnement Canada a établi, au début des années 80, plusieurs bassins expérimentaux pour étudier les effets du transport à longues distances des polluants atmosphériques sur les écosystèmes aquatiques. Les cinq sites principaux qui ont servi au suivi intensif des écosystèmes sont : la région des lacs expérimentaux (Ontario), les lacs Turkey (Ontario), la région de Muskoka Haliburton (Ontario), le lac Laflamme (Québec) et Kejimikujik (Nouvelle-Ecosse). Le choix de ces bassins permettait d'avoir une bonne représentation des régions, des climats, de la sensibilité des territoires et des dépôts atmosphériques (PAPINEAU, 1989). Les données relatives au bassin du lac Laflamme sont utilisées dans cet article.

La majorité des études effectuées sur l'impact des précipitations acides s'attardent sur deux aspects importants de la dynamique de ce phénomène, à savoir : 1) **son origine**, comment prévenir, ou limiter l'émission de substances polluantes dans l'atmosphère et ; 2) **son stade ultime**, quelles sont les conséquences des précipitations acides sur l'environnement (BOUCHARD, 1992 ; LACHANCE *et al.*, 1988 ; DUPONT et GRIMARD, 1987). Dans le présent rapport, on s'intéresse à un facteur intermédiaire, celui des épisodes météorologiques conditionnant le transport, en faisant intervenir le vecteur de ces précipitations éventuellement acides : le vent.

Plusieurs essais de modélisation du transport à longues distances ont été réalisés à partir de sources connues d'émissions atmosphériques (WILSON, 1978 ; GILLANI *et al.*, 1978). Des expériences de validation aéroportées ont aussi permis de suivre le centroïde des masses contaminées (CLARK et CLARKE, 1984 ; GILLANI *et al.*, 1978) ; il s'agissait donc là d'expériences

menées en coordonnées lagrangiennes, c'est-à-dire en suivant un volume de référence. Des études sur le transport de polluants atmosphériques ont également été exécutées en coordonnées eulériennes fixes ; on se place alors au niveau d'un milieu récepteur et l'on examine la composition des précipitations de toute origine spatiale (WOLFF *et al.*, 1979). Dans cette optique eulérienne, SPERBER (1987) a montré que l'utilisation de séries horaires de concentrations dans les précipitations et de séries horaires moyennes de direction des vents permet de représenter adéquatement l'évolution lagrangienne des systèmes de précipitations du nord-est des Etats-Unis (région métropolitaine de New York). SPERBER (1987) a également montré que les concentrations de NO_3 et SO_4 étaient plus élevées lorsque les vents provenaient de l'ouest.

La présente étude, effectuée en coordonnées eulériennes, vise à mettre en évidence des relations entre la direction des vents et la composition chimique des précipitations dans la région de Québec. S'inspirant des résultats de SPERBER (1987), on cherche donc à voir si l'utilisation de séries de concentrations dans les précipitations et d'une série de direction des vents peut permettre de représenter l'évolution lagrangienne des systèmes de précipitations dans l'est du Canada. L'échelle de temps utilisée (hebdomadaire) est différente de l'échelle horaire utilisée dans l'étude de SPERBER (1987). Devant cette échelle de temps plus grossière, l'échelle d'espace a également été considérée plus grossièrement. On suppose cependant que les échelles de temps et d'espace utilisées sont compatibles et qu'elles permettent de mettre en évidence des relations entre les concentrations dans les précipitations et la direction des vents.

Le choix d'échelles de temps et d'espace grossières présuppose que les systèmes atmosphériques sont suffisamment homogènes à l'échelle de l'est du continent pour que les vents mesurés au site du milieu récepteur soient représentatifs de l'état des systèmes de précipitations et que l'agrégation en séries hebdomadaires ne masque pas complètement les relations possibles entre les concentrations dans les précipitations et la direction des vents. La validité de ces deux hypothèses serait appuyée par la mise en évidence d'une relation significative entre les concentrations dans les précipitations et la direction des vents.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description du site

Le site étudié est celui du lac Lafflamme. Le bassin versant du lac est situé sur le Bouclier Canadien, dans la réserve faunique des Laurentides, à 80 km au nord de la ville de Québec (latitude $47^{\circ}19'$, longitude $71^{\circ}07'$). L'altitude maximale du lac est de 884 m. Le bassin versant couvre une superficie de 68,4 ha, alors que le lac occupe 6,1 ha, soit environ 9 % de la superficie du bassin versant.

Le climat de la région est caractérisé par une température moyenne annuelle basse (0,2 °C) et des précipitations annuelles abondantes (1,3 m). La prise des glaces a lieu vers la mi-novembre alors que leur disparition se produit vers la mi-mai (PAPINEAU, 1989).

Banque de données

La banque de données utilisée contient dix séries temporelles : les concentrations de neuf constituants dans les précipitations recueillies à la station Montmorency et une série de directions des vents à l'aéroport de Québec. L'échelle de temps hebdomadaire a été sélectionnée afin de réduire le nombre de valeurs manquantes qui rendrait l'analyse statistique très encombrante avec une échelle quotidienne. La sélection des sites de mesures a été faite en deux étapes : dans un premier temps, les données de précipitations au lac Laflamme étaient utilisées dans une optique plus globale dépassant les limites du présent article (des données étant également disponibles pour la qualité de l'eau du lac et de son exutoire). Dans un second temps, les données de direction des vents de l'aéroport de Québec constituaient l'information disponible la plus près du lac Laflamme. On remarque donc une sélection d'échelles de temps et d'espace grossières. On suppose cependant que les échelles de temps et d'espace utilisées sont compatibles et qu'elles permettent de mettre en évidence les relations recherchées.

Les dix séries contiennent 312 observations moyennes hebdomadaires couvrant une période de six ans débutant le 17 décembre 1981 et se terminant le 12 décembre 1987. Les neuf variables mesurées dans les précipitations sont : les ions hydrogène (H), calcium (Ca), chlorures (Cl), potassium (K), magnésium (Mg), sodium (Na), nitrate (NO₃), sulfate (SO₄) et ammoniac (NH₄). Toutes ces variables sont exprimées en mg.l⁻¹. La banque de données originale est épisodique journalière, c'est-à-dire qu'une observation est disponible si le volume des précipitations recueillies durant la journée est suffisant pour permettre une analyse physico-chimique. Afin de construire des séries hebdomadaires, les années de 365 jours ont été divisées en 51 semaines de 7 jours débutant le 1er janvier de chaque année et une semaine de 8 jours allant du 24 décembre au 31 décembre inclusivement. Les volumes et les charges ont alors été cumulés sur chaque semaine et les concentrations moyennes hebdomadaires ont été déduites de ces séries de charges et de volumes.

Parallèlement, une série hebdomadaire de directions du vent (provenant d'une rose des vents à 36 directions mais projetée sur une rose à 12 directions) est obtenue à partir du cumul vectoriel, sur une semaine, d'une série horaire de directions du vent dominant. Dans le texte, la série alors obtenue sera appelée série de direction des vents de transport maximal. La figure 1 représente la rose à 12 directions, superposée à une carte géographique du Québec et de l'Ontario. On remarque sur cette figure que les zones fortement industrialisées sont situées en direction sud-ouest. Il faut bien noter que l'identification d'une direction correspond à l'origine du vent et non sa destination.

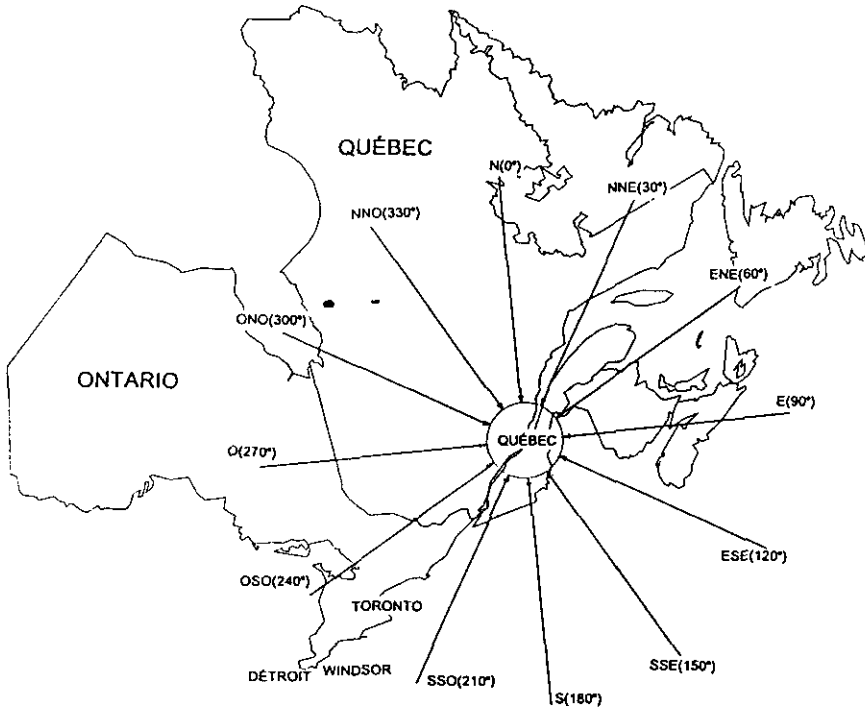


Figure 1 Rose des vents à douze directions superposée aux cartes du Québec et de l'Ontario.

Twelve points wind rose superimposed on Quebec and Ontario maps.

Méthodologie d'échantillonnage.

Les données brutes des précipitations sont enregistrées quotidiennement à la station Montmorency du réseau fédéral CAPMON-RCEPA (Réseau Canadien d'Echantillonnage des Précipitations et de l'Air). L'échantillonnage des précipitations est la responsabilité du Service d'environnement atmosphérique d'Environnement Canada. PAPINEAU (1989) présente les méthodes d'échantillonnage et les méthodes analytiques utilisées pour déterminer les concentrations dans les précipitations. Les données brutes éoliennes ont été recueillies à l'aéroport de Québec. Elles sont constituées de relevés horaires de directions des vents sur une rose à 36 directions.

Méthodes statistiques

L'utilisation de l'analyse en composantes principales permettra de décrire les différentes relations entre les séries de concentrations dans les précipitations. L'analyse factorielle des correspondances permettra ensuite une description des relations entre les concentrations dans les précipitations et la direction des vents. Finalement, des analyses de variance permettront de juger de la signification des relations mises en évidence par l'analyse factorielle des correspondances.

RÉSULTATS

Résultats descriptifs : Séries de concentrations

Le tableau 1 présente les statistiques descriptives pour les séries de concentrations dans les précipitations pour l'ensemble des 312 semaines. Cependant, pour certaines semaines, aucun volume de précipitation ou aucune concentration significative n'ont été mesurés. Afin d'avoir une idée plus représentative des concentrations moyennes, le tableau 2 présente les statistiques descriptives pour les séries de concentrations en excluant les semaines associées à des volumes insuffisants pour permettre une analyse physico-chimique. Le tableau 2 permet de constater que les concentrations hebdomadaires moyennes d'ammoniac, de nitrates et de sulfates atteignent respectivement 0,17 mg.l⁻¹, 0,30 mg.l⁻¹ et 1,66 mg.l⁻¹.

Tableau 1 Statistiques descriptives pour les séries de concentrations dans les précipitations, pour l'ensemble des 312 semaines.

Table 1 *Descriptive results for concentration series in precipitation, complete data set of 312 observations.*

	Ca mg/l	Cl mg/l	H mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	NH ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l
Taille	312	312	312	312	312	312	312	312	312
Moyenne	0,10	0,12	0,04	0,02	0,02	0,04	0,15	0,28	1,53
Médiane	0,04	0,07	0,03	0,01	0,01	0,02	0,11	0,19	1,22
Ecart type	0,23	0,18	0,03	0,02	0,03	0,07	0,17	0,29	1,40
C.V.	2,29	1,51	0,89	1,06	2,14	1,81	1,08	1,04	0,92
Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum	2,50	2,00	0,26	0,16	0,50	0,60	1,02	2,54	10,00

Tableau 2 Statistiques descriptives pour les séries de concentrations dans les précipitations, en excluant les valeurs nulles.

Table 2 *Descriptive results for concentration series in precipitation, excluding zero values.*

	Ca mg/l	Cl mg/l	H mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	NH ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l
Taille	276	261	279	272	266	218	280	286	286
Moyenne	0,11	0,14	0,04	0,02	0,02	0,06	0,17	0,30	1,66
Médiane	0,05	0,09	0,03	0,01	0,01	0,03	0,13	0,22	1,33
Ecart type	0,24	0,18	0,03	0,02	0,04	0,08	0,17	0,29	1,38
C.V.	2,12	1,32	0,77	0,92	1,93	1,41	0,97	0,95	0,83
Minimum	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
Maximum	2,50	2,00	0,26	0,16	0,50	0,60	1,02	2,54	10,00

Résultats descriptifs : Série de directions des vents

L'étude de la distribution des vents de transport maximal (cumul vectoriel sur une semaine) dans les douze directions de la rose des vents permet de constater que : 1) aucune semaine n'a présenté un vent de transport maximal de direction NNE, ESE, SSE, S, SSO ; 2) 32 % des semaines ont présenté un vent de transport maximal provenant de l'est (ENE et E) et ; 3) 65 % des semaines ont présenté un vent de transport maximal provenant de l'ouest (OSO et O). On distingue donc deux principaux groupes de vents : les vents d'est et les vents d'ouest. La figure 2 montre une représentation schématique de la distribution des directions-des vents de transport maximal qui illustre la prépondérance de la circulation atmosphérique suivant l'axe est-ouest.

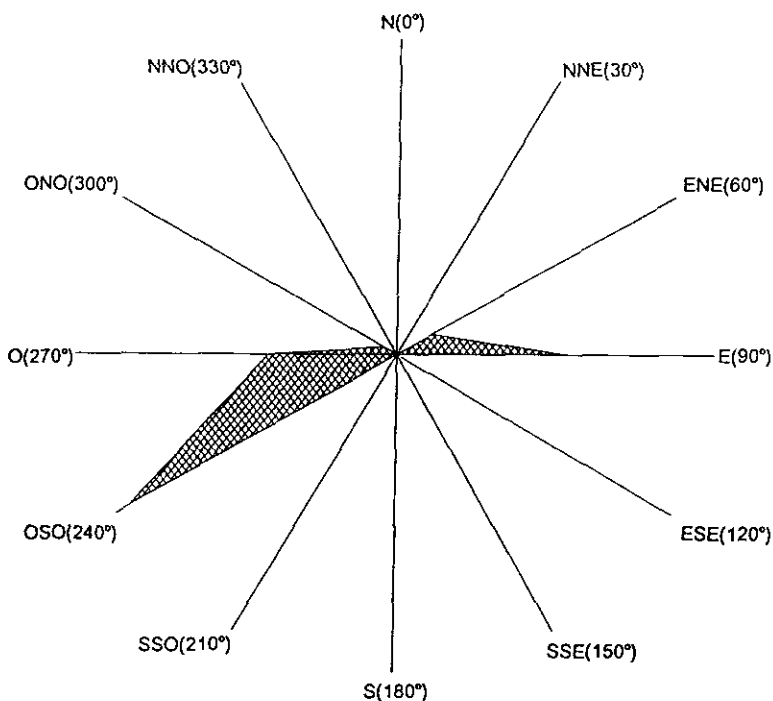


Figure 2 Représentation schématique de la distribution des vents de transport maximal.

Schematic representation of the distribution of prevailing winds.

Analyse en composantes principales

Afin de mettre en évidence les relations importantes entre les neuf variables de concentrations, une analyse en composantes principales a été effectuée. Le premier axe explique 43,7 % de la variance alors que le deuxième axe explique 20,2 %. Etant donné que ces deux premiers axes expliquent près de 64 % de la variance totale et que le troisième axe a peu d'intérêt, seuls les deux premiers axes sont discutés.

La figure 3 présente la projection des neuf variables sur les deux premières composantes principales. Dans un premier temps, il faut remarquer que toutes les variables sont corrélées positivement avec le premier axe. Ce phénomène est expliqué par une corrélation positive entre toutes les variables. Ainsi une pluie fortement chargée présente des concentrations élevées pour l'ensemble des neuf variables. L'axe 2 oppose deux groupes de variables ; NO_3 , SO_4 et NH_4 forment un groupe homogène du côté positif du second axe alors que Ca, Mg et Cl se regroupent du côté négatif de ce même axe. On remarque également que la variable H est proche du groupement NO_3 , SO_4 et NH_4 qui caractérise l'acidité. Ces résultats ressemblent en tous points à ceux obtenus par FINZI *et al.* (1991) dans une analyse en composantes principales sur les concentrations de solutés dans des précipitations en Italie.

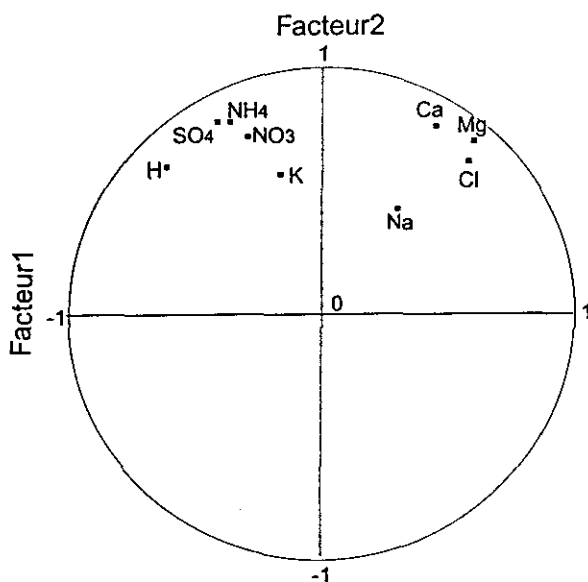


Figure 3 Analyse en composante principale, représentation des variables (concentrations dans les précipitations).

Principal component analysis, variable representation.

Analyse factorielle des correspondances

Maintenant que les relations importantes entre les concentrations sont établies, on cherche à mettre en évidence des relations entre la direction des vents et les concentrations des différents constituants des précipitations. Etant donné que la direction des vents est représentée par une variable catégorique (rose à douze branches), l'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances apparaît comme un outil tout à fait adapté à cette recherche de relations. Cependant, pour utiliser cette méthode d'analyse, il est nécessaire de construire une classification pour les variables de concentrations. Pour ce faire, ces variables ont été regroupées en trois classes portant les qualificatifs

faibles, moyennes et fortes. Afin d'obtenir des classes équiprobables, les bornes de chaque classe ont été définies comme les quantiles 33.3 % et 66.6 % de l'ensemble de 312 observations.

Un tableau de contingences a été construit pour chaque classe de concentration. Le tableau 3 (section de gauche) présente ces tableaux de contingences de dimensions 9 (variables de concentrations) par 7 (branches de la rose avec des fréquences non nulles).

Une analyse factorielle des correspondances a alors été exécutée pour chacune des trois classes de concentrations. Une fois ces analyses effectuées, les distances euclidiennes entre les neuf points-objets (concentrations) et les sept points-descripteurs (direction des vents) ont été calculées. On obtient alors 63 distances qui sont regroupées dans cinq classes portant les qualificatifs suivants : très proche (++), proche (+), moyen (0), éloigné (-) et très éloigné (- -). Les bornes des classes de distances ont été définies comme les quantiles 90 %, 75 %, 50 % et 25 % des 63 distances. Ainsi, seulement 25 % des points sont dans les classes + et ++. Ces points représentent les fortes relations entre la direction des vents et les concentrations.

Le tableau 3 (section de droite) présente les classifications des distances associées aux trois tableaux de contingences. On voit alors que les fortes concentrations de composés chimiques polluants (NO_3 , SO_4 et NH_4) sont fortement reliées aux vents de transport maximal de directions ouest et ouest-sud-ouest ; il en est de même pour les fortes concentrations d'ions hydrogène. Inversement, les faibles concentrations de ces mêmes composés chimiques sont reliées aux vents de transport maximal de directions est-nord-est et est.

En ce qui concerne les autres composés chimiques (Ca, Cl, K, Mg et Na) on remarque une tendance vers un patron inverse : i.e. relations fonctionnelles entre ; 1) les faibles et moyennes concentrations et les directions ouest et ouest-sud-ouest et ; 2) les fortes concentrations et les vents de directions est et est-nord-est. La discrimination entre les directions est et ouest est cependant beaucoup moins claire que pour les composés chimiques polluants.

Ces résultats appuient donc la croyance populaire présentée initialement selon laquelle les principaux polluants responsables de l'acidification des précipitations sont transportés par des vents du secteur sud-ouest. Afin de valider ce résultat et de quantifier les différences de niveaux des concentrations, des analyses de variance sont maintenant présentées pour les variables NO_3 et SO_4 .

Analyse de variance (ANOVA)

Les paragraphes précédents ont permis de mettre en évidence deux regroupements importants pour les directions des vents de transport maximal : les vents provenant de l'ouest et les vents provenant de l'est. Ces deux groupes sont utilisés pour les analyses de variance : « Ouest » comprend les directions ouest-nord-ouest, ouest et ouest-sud-ouest et « Est » comprend les directions est-nord-est et est.

Tableau 3 Tableaux de contingences (gauche) et classes de distances (droite) pour les neuf séries de concentrations et les sept directions de vents (les fortes relations sont ombragées).

Table 3 Contingency tables (left) and distance classes (right) for the nine concentration series and the seven wind directions (high relationships are shaded).

	Vents d'est			Vents d'ouest					Vents d'est			Vents d'ouest			
	N	ENE	E	OSO	O	ONO	NNO		N	ENE	E	OSO	O	ONO	NNO
Ca	0	7	30	45	20	3	0	--	0	0	++	+	-	--	
Cl	0	7	33	46	13	4	1	--	0	0	+	-	0	--	
Mg	1	8	32	49	20	3	1	--	+	+	+	0	-	--	
Na	0	9	26	53	13	4	0	--	0	-	+	-	+	--	
K	1	7	28	47	18	4	0	--	0	0	++	0	0	--	
H	1	9	35	38	18	3	0	-	+	++	0	0	-	--	
NH ₄	1	9	33	39	19	2	1	-	+	++	0	0	-	--	
NO ₃	1	6	36	39	18	3	1	-	-	++	-	0	-	--	
SO ₄	0	7	33	39	23	2	0	--	-	+	-	++	-	--	
Ca	1	6	21	51	22	1	1	--	0	0	++	+	-	--	
Cl	1	3	23	54	21	2	0	-	-	0	++	+	-	--	
Mg	1	5	23	43	22	0	0	-	-	0	0	++	-	--	
Na	1	4	31	42	23	2	0	--	-	++	0	+	-	--	
K	0	6	33	44	18	1	1	--	0	++	0	0	-	--	
H	0	6	23	53	19	2	1	--	0	0	++	0	-	--	
NH ₄	0	5	27	44	25	3	0	--	-	+	0	+	-	--	
NO ₃	1	7	28	48	18	2	0	--	+	+	+	0	-	--	
SO ₄	0	6	27	51	16	3	1	-	0	0	+	-	-	--	
Ca	1	6	30	46	18	3	0	--	0	++	0	0	-	--	
Cl	1	9	25	42	26	1	0	--	++	0	0	+	-	--	
Mg	0	6	26	50	18	4	0	--	0	+	+	0	0	--	
Na	1	6	24	47	24	1	1	--	-	0	-	0	-	--	
K	1	6	20	51	24	2	0	-	0	0	++	++	-	--	
H	1	4	23	51	23	2	0	-	0	+	++	+	-	--	
NH ₄	1	5	21	59	16	2	0	--	-	0	++	-	-	--	
NO ₃	0	6	17	55	24	2	0	--	0	-	+	+	-	--	
SO ₄	2	6	21	52	21	2	0	-	0	0	++	+	-	--	

Plusieurs auteurs (DASCH, 1987 ; SUMMERS *et al.*, 1986) ont montré que les concentrations de nitrates et de sulfates dans les précipitations dépendent de facteurs comme la température et le type de précipitation. Les études montrent alors une saisonnalité dans les concentrations des précipitations sur la partie nord-est du continent nord-américain. Devant ces résultats, un second facteur est introduit dans les analyses de variance : les mois de l'année. L'introduction de ce facteur permettra d'empêcher les effets saisonniers de masquer les résultats associés aux directions des vents.

ANOVA : Concentrations de sulfates

Les résultats de l'analyse de variance pour les concentrations de sulfates permettent de conclure que : 1) le terme d'interaction n'est pas significatif ($p = 0,64$) ; 2) les concentrations de sulfates sont significativement différentes selon la direction des vents de transport maximal ($p = 0,047$) et ; 3) les concentrations de sulfates sont significativement différentes selon le mois de l'année ($p = 0,001$).

En ce qui concerne la distinction entre les directions des vents de transport maximal, on note que la concentration moyenne de sulfates associée aux vents d'est est de $1,48 \text{ mg.l}^{-1}$, comparativement à $1,73 \text{ mg.l}^{-1}$ pour les précipitations associées aux vents de l'ouest. D'autre part, le test de comparaisons multiples de Duncan nous permet de mettre en évidence des différences significatives selon les mois. Bien que la discrimination entre les mois ne soit pas très claire, il est quand même possible de faire ressortir que les mois d'hiver : novembre ($1,18 \text{ mg.l}^{-1}$), décembre ($0,79 \text{ mg.l}^{-1}$), janvier ($0,86 \text{ mg.l}^{-1}$) et février ($0,92 \text{ mg.l}^{-1}$) montrent des concentrations en sulfates significativement plus faibles que les mois d'été : mai ($2,46 \text{ mg.l}^{-1}$), juin ($2,04 \text{ mg.l}^{-1}$), juillet ($2,03 \text{ mg.l}^{-1}$) et août ($2,20 \text{ mg.l}^{-1}$). En ce qui concerne les autres mois : mars ($1,76 \text{ mg.l}^{-1}$), avril ($1,59 \text{ mg.l}^{-1}$), septembre ($1,69 \text{ mg.l}^{-1}$) et octobre ($1,88 \text{ mg.l}^{-1}$) les concentrations de sulfates correspondantes n'apparaissent pas significativement différentes des concentrations d'hiver ou d'été.

ANOVA : Concentrations de nitrates

Les résultats de l'analyse de variance pour les concentrations de nitrates avec les facteurs VENT et MOIS permettent de conclure que : 1) le terme d'interaction n'est pas significatif ($p = 0,10$) ; 2) les concentrations de nitrates sont significativement différentes selon la direction des vents de transport maximal ($p = 0,009$) et ; 3) les concentrations de nitrates sont significativement différentes selon le mois de l'année ($p = 0,011$).

La concentration moyenne des nitrates est de $0,24 \text{ mg.l}^{-1}$ lorsque les vents de transport maximal sont de l'est comparativement à $0,33 \text{ mg.l}^{-1}$ pour les précipitations associées aux vents de l'ouest. Encore une fois, l'utilisation du test de comparaisons multiples de Duncan ne permet pas une discrimination très claire entre les mois. On peut cependant remarquer que les mois d'hiver : janvier ($0,41 \text{ mg.l}^{-1}$) et mars ($0,48 \text{ mg.l}^{-1}$) montrent des concentrations en nitrates significativement plus élevées que les mois d'été : juin ($0,22 \text{ mg.l}^{-1}$), juillet ($0,20 \text{ mg.l}^{-1}$) et août ($0,22 \text{ mg.l}^{-1}$). Le mois d'avril ($0,20 \text{ mg.l}^{-1}$) présente

une concentration moyenne semblable aux moyennes des mois d'été. Les autres mois : février ($0,37 \text{ mg.l}^{-1}$), mai ($0,29 \text{ mg.l}^{-1}$), septembre ($0,23 \text{ mg.l}^{-1}$), octobre ($0,32 \text{ mg.l}^{-1}$), novembre ($0,34 \text{ mg.l}^{-1}$) et décembre ($0,35 \text{ mg.l}^{-1}$) présentent des concentrations moyennes non significativement différentes des mois d'été ou d'hiver.

DISCUSSION

La figure 4 présente les moyennes mensuelles des concentrations de NO_3 ventilées selon la provenance des vents de transport maximal. On note, qu'à l'exception des mois de février et de juin, les moyennes associées aux vents en provenance de l'ouest sont toujours plus élevées que les moyennes associées aux vents provenant de l'est. La figure 4 illustre également les saisonnalités dans les concentrations de nitrates : c'est-à-dire fortes concentrations en hiver et faibles concentrations en été. La plus grande consommation de combustible fossile en hiver et la tendance à avoir de plus fortes concentrations de nitrates dans la neige comparativement à la pluie (DASCH, 1987) peuvent expliquer, au moins en partie, cette saisonnalité. On remarque finalement que la discrimination des directions des vents est particulièrement importante pour les mois de mars et de décembre où les rapports des concentrations associées aux vents d'ouest comparativement aux vents d'est sont respectivement 3,0 et 2,6.

La figure 5 présente les moyennes mensuelles des concentrations de SO_4 ventilées selon la provenance des vents de transport majeur. Tout comme ce fut le cas pour les concentrations de NO_3 , les concentrations moyennes de sulfates sont plus élevées pour les vents en provenance de l'ouest sauf pour les mois de février et de juin. La figure 5 illustre également les saisonnalités dans les concentrations de sulfates : soit de fortes concentrations en été et de faibles concentrations en hiver. Les masses d'air ayant généralement leur origine plus au sud en été comparativement à l'hiver et la tendance à avoir de plus fortes concentrations de sulfates dans la pluie comparativement à la neige (DASCH, 1987) peuvent expliquer, au moins en partie, cette saisonnalité. On remarque finalement que la discrimination des directions des vents est particulièrement importante pour les mois de mars et de juillet : les rapports des concentrations associées aux vents d'ouest comparativement aux vents d'est sont respectivement de 1,9 et 2,7.

On remarque enfin sur la figure 5, que certaines moyennes mensuelles sont beaucoup plus faibles que d'autres (par exemple, décembre, janvier et février) mais que même pour ces mois, les vents provenant de l'ouest induisent des concentrations moyennes de sulfates plus élevées que les vents d'est. Cet effet saisonnier marqué aurait masqué l'effet de la provenance des vents de transport maximal s'il n'avait pas été inclus dans l'analyse. En effet, une analyse de variance à un seul facteur (VENT) ne permet pas de conclure que les concentrations associées aux vents provenant de l'ouest sont significativement plus élevées.

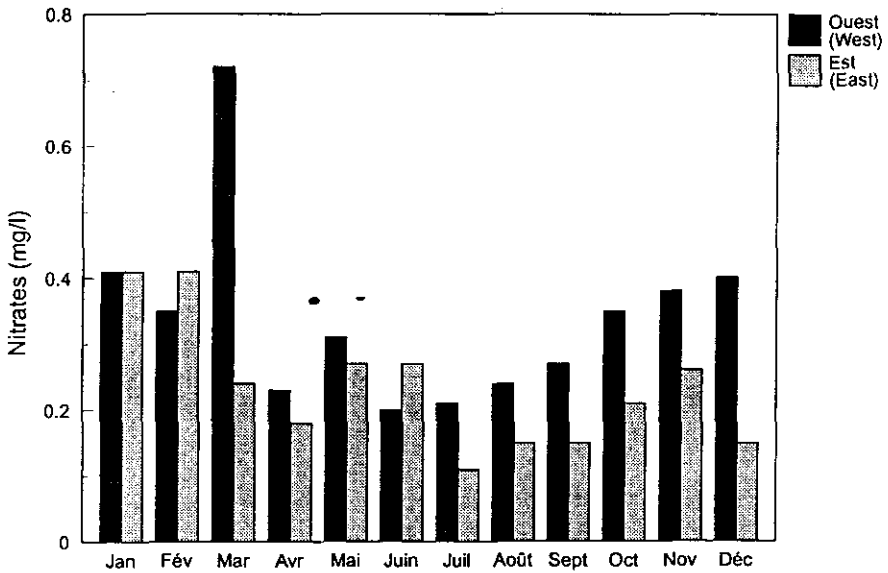


Figure 4 Moyennes mensuelles des concentrations de nitrates ventilées selon la direction des vents de transport maximal.
Monthly nitrate concentrations according to prevailing winds.

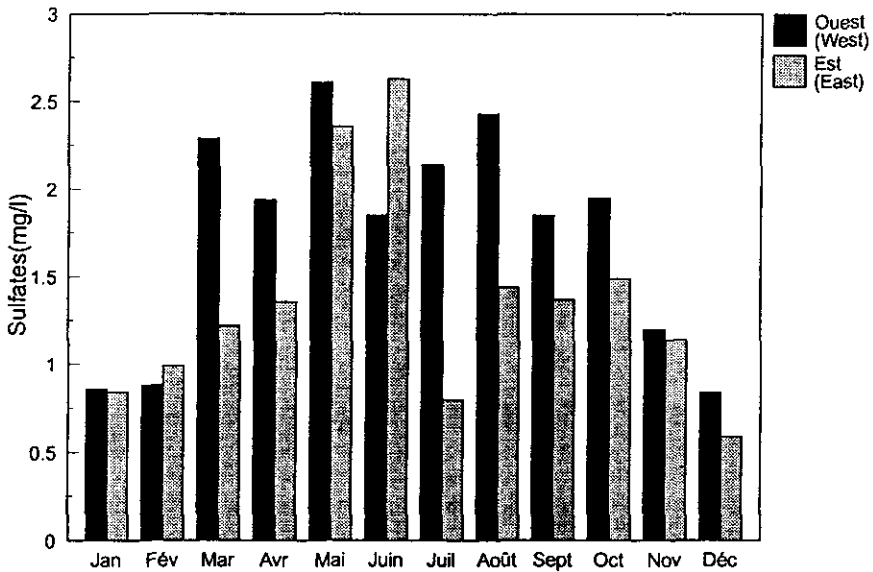


Figure 5 Moyennes mensuelles des concentrations de sulfates ventilées selon la direction des vents de transport maximal.
Monthly sulfate concentrations according to prevailing winds.

Les résultats des analyses de variance montrent donc une différence significative entre les concentrations de nitrates et de sulfates associées aux vents provenant de l'ouest comparativement aux vents provenant de l'est. Ces différences significatives apparaissent malgré les limitations soulevées dans le choix des ensembles de données ; l'échelle de temps hebdomadaire et l'échelle d'espace (80 km entre le site de mesure de la série des vents et de la série des concentrations dans les précipitations) ne masquent donc pas significativement les relations entre la direction des vents et les concentrations dans les précipitations. Ces résultats permettent également de croire à la représentativité des données hebdomadaires et des données de l'aéroport de Québec comme banque d'information sur les vents dans la présente étude.

Tout comme SPERBER (1987) l'a montré avec une échelle de temps horaire, les résultats des analyses statistiques précédentes permettent de croire qu'avec une échelle de temps hebdomadaire, on peut quand même expliquer l'évolution lagrangienne du système de précipitations de l'est du Canada en travaillant avec un système de référence eulérien.

CONCLUSION

Les analyses statistiques présentées ont permis de confirmer que les vents provenant de l'est sont associés à des précipitations moins chargées en éléments acides que les vents d'ouest. Les concentrations moyennes de sulfates et de nitrates associées aux vents d'est sont respectivement de $1,48 \text{ mg.l}^{-1}$ et de $0,24 \text{ mg.l}^{-1}$, comparativement à $1,73 \text{ mg.l}^{-1}$ et $0,33 \text{ mg.l}^{-1}$ pour les précipitations associées aux vents d'ouest. Cette confirmation de la croyance populaire repose sur des données générales, disponibles au public, ainsi que sur un choix d'échelles de temps et d'espace grossières.

Malgré les limitations dans le choix des ensembles de données, les relations entre la direction des vents et les concentrations de NO_3 et de SO_4 sont statistiquement significatives. Ces relations significatives sur une échelle de temps hebdomadaire nous portent à croire que des études sur des échelles de temps plus fines ne peuvent que conduire à des conclusions similaires à celles des analyses présentées ici. De plus, la distance de 80 km entre le point de mesure des vents et le point de mesure des précipitations n'a pas empêché la détection d'une relation significative entre la direction des vents et les concentrations de NO_3 et de SO_4 dans les précipitations.

Ces résultats soulèvent certaines questions dont les réponses dépassent les limites de cet article. Les vents mesurés au sol peuvent-ils être vus comme un bon indicateur des systèmes cycloniques ou anticycloniques qui sont reconnus comme un facteur important dans le transport à longues distances des polluants atmosphériques ? Les vents mesurés au sol pourraient-ils être utilisés comme un facteur complémentaire dans les modèles de transport à longues distances des polluants atmosphériques ? Le choix d'échelles de temps et d'espace plus grossières pourrait-il permettre de simplifier les modèles de transport à longues distances pour certaines applications ne demandant pas une très grande précision ?

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATES D.V., SIZTO R., 1989. The Ontario air pollution study: identification of the causative agents. *Health and Environmental Health Perspectives*, 79:69-72.
- BOUCHARD A., 1992. Réponse de la qualité de l'eau des lacs du réseau TADPA-Québec aux précipitations acides de 1985 à 1991. Environnement Canada, 78 pages.
- CCRS, Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance, (1990). Rapport canadien d'évaluation de 1990 sur le transport à distances des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides. Partie 4: Effets sur les milieux aquatiques. 183 pages. (Disponible à Environnement Canada).
- CCRS, Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance, (1990). Rapport canadien d'évaluation de 1990 sur le transport à distances des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides. Partie 6: Effets sur la santé humaine. 34 pages. (Disponible à Environnement Canada).
- CLARK T.C., CLARKE J.F., 1984. A Lagrangian study of the boundary layer transport of pollutants in the northeastern United States. *Atmospheric Environment*, 18: 287-297.
- DASCH J.M., 1987. On the difference between SO_4 and NO_3 in wintertime precipitation. *Atmospheric Environment* 21: 137-141.
- DUPONT J., GRIMARD Y., 1987. SIGMA/SLAM: Modèle de gestion des milieux acides. Ministère de l'environnement du Québec, publication PA-27, 76 pages.
- FINZI G., NOVO A., VIARENGO S., 1991. An application of multivariate analysis to acid rain data in northern Italy to discriminate natural and man-made compounds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 17: 273-280.
- GIBBONS E.V., 1970. The corrosion behavior of the major architectural and structural metals in Canadian atmospheres. C.N.R./D.B.R., Rapport 11630. Conseil national de recherches, Ottawa.
- GILLANI N.V., HUSAR R.B., HUSAR J.D., PATTERSON D.E., WILSON W.E., 1978. Project MISTT: Kinetics of particulate sulfur formation in a power plant plume out to 300 km. *Atmospheric Environment*, 12: 589-598.
- Gouvernement du Canada (1991). Etat de l'environnement au Canada. Ministère des Approvisionnements et Services Canada, 754 pages.
- KUCERA V., 1983. The effect of acidification of the environment on the corrosion of the atmosphere, water and soil. Pages 153-170 dans: Proceedings of the 9th Scandinavian Corrosion Congress. Copenhagen.
- LACHANCE M., BROUARD D., WALSH G., 1988. Airborne transport of sulphur: impacts on chemical composition of rivers on north shore of the St. Lawrence river (Québec). *Water, Air, Soil Pollut.*, 39: 311-322.
- PAPINEAU M., 1989. Bilans ioniques et changements dans la qualité de l'eau au bassin calibré du lac Laflamme de 1981 à 1988. Environnement Canada, 156 pages.
- SPERBER K.R., 1987. The concentration and deposition of nitrate, sulfate and ammonium as a function of wind direction from precipitation samples. *Atmospheric Environment*, 21: 2629-2641.
- SUMMERS P.W., BOWERSOX V.C., STENSLAND G.J., 1986. The geographical distribution and temporal variations of acidic deposition in eastern North America. *Water, Air, Soil Pollution*, 31: 523-535.
- WILSON W.E., 1978. Sulfates in the atmosphere: A progress report on project MISTT. *Atmospheric Environment*, 12: 537-547.
- WOLFF G.T., LIOY P.J., GOLUB H., HAWKINS J.S., 1979. Acid precipitation in the New York Metropolitan Area: its relationship to meteorological factors. *Envir. Sci. Technol.*, 13: 209-212.