

Etude de la variabilité du pH des
précipitations autour de Rouyn-Noranda

INRS-Eau
Université du Québec
C.P. 7500, Sainte-Foy
Québec G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 95
1978

Rapport rédigé pour
le bureau d'étude sur les substances toxiques des
Services de protection de l'environnement du Québec

par
M. Lachance, B. Bobée

ISBN 2-89146-092-8

DEPOT LEGAL 1978

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés

© 1978 - Institut national de la recherche scientifique

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement M. André Jolivet, de Rouyn-Noranda, dont la participation à l'installation des stations, à la collecte des échantillons et aux mesures de pH a rendu possible l'étude.

Nous remercions également le Service qualité des eaux du Ministère des Richesses naturelles du Québec d'avoir prêté du matériel nécessaire à l'échantillonnage et d'avoir effectué les mesures de sulfates.

Des remerciements vont également au CEGEP de Rouyn-Noranda d'avoir prêté les supports de laboratoire, à la Société de conservation du nord-ouest (SCNO) d'avoir fourni des données météorologiques, à la compagnie Noranda-Mines d'avoir fourni les données concernant les directions et vitesses des vents et aux 35 observateurs locaux d'avoir recueilli les échantillons d'eau de pluie.

Enfin, les auteurs remercient le service d'édition de l'INRS-Eau, notamment M. Magella Cantin, pour la supervision des textes, M. André Parent, pour la reproduction des figures et Mlle Lise Raymond, pour la dactylographie des textes.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
RESUME	viii
1. INTRODUCTION	1
2. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	3
2.1 Sources de soufre	4
2.2 Acidification des précipitations	8
2.3 Nature et origine de l'acidité des précipitations	13
2.4 Effets de l'acidité des précipitations sur les écosystèmes	17
3. METHODOLOGIE	20
3.1 Stations	21
3.2 Collecteurs de précipitations	21
3.3 Protocole d'échantillonnage	24
3.4 Données météorologiques	27
4. RESULTATS	28
4.1 Conditions météorologiques	29
4.2 Gamme des valeurs de pH mesurées	31
4.3 Variabilité temporelle	35
4.4 Variabilité spatiale	40

5.	INTERPRETATION DES RESULTATS D'APRES L'ETAT DES CONNAISSANCES ACTUELLES	56
5.1	Comparaison des valeurs mesurées avec celles d'autres études	57
5.2	Sources ponctuelles de soufre	58
5.3	Substances neutralisantes dans les précipitations	60
5.4	Distribution spatiale des pH mesurés	62
6.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	64
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	68

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>	
2.1	Distribution au Canada des émissions de SO ₂ selon les catégories de sources	7
3.1	Localisation des stations d'échantillonnage des précipitations dans la région de Rouyn-Noranda	22
4.1	Précipitations mesurées par les stations météorologiques du SCNO pour le mois de juillet dans la région de Rouyn-Noranda	32
4.2	Description et caractérisation des épisodes pluvieux de la période d'étude	33
4.3	Valeurs de pH mesurées aux stations pour chacun des épisodes pluvieux	34
4.4	Médiane des valeurs de pH et charge moyenne en ions hydrogène des épisodes pluvieux de la période d'étude	38
4.5	Valeurs de sulfates mesurées aux stations pour certains épisodes pluvieux	42
4.6	Variation des concentrations en sulfates et des pH de l'épisode IX en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents	48
4.7	Variation des concentrations en sulfates et des pH de l'épisode X en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents	49

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>
2.1 Bilan du soufre dans l'atmosphère à l'échelle mondiale	5
2.2 Distribution des émissions principales d'oxyde de soufre au Canada en 1970	7
2.3 a) Vue de l'usine de Noranda et de ses deux cheminées b) Vue des deux cheminées de l'usine de Noranda et du panache d'émanation	9
2.4 a) Vue du cône de diffusion des cheminées de l'usine de Noranda b) Vue de la retombée du panache d'émanation sur la ville de Rouyn	10
2.5 Illustration du mécanisme de formation du H_2SO_4 à partir du SO_2 en provenance d'émanations urbaines	15
2.6 Illustration de l'effet du "looping" dans le transport du soufre	18
3.1 Réseau d'échantillonnage des précipitations dans la région de Rouyn-Noranda	23
3.2 Collecteur de pluie utilisé pour l'étude de la variabilité du pH dans la région de Rouyn-Noranda	25
3.3 a) Vue montrant une station d'échantillonnage des précipitations b) Vue en gros plan du capteur de pluie	26

4.1	Distribution de la direction des vents en juillet à Val d'Or pour la période 1955-1972	30
4.2	Histogramme des valeurs de pH inférieures à 5.6 mesurées pendant la période d'étude pour l'ensemble des stations	36
4.3	Variation temporelle du pH des précipitations autour de Rouyn-Noranda	37
4.4	Histogramme des valeurs de pH inférieures à 5.6 mesurées pour les épisodes IV, V, VI et VII et pour les épisodes IX, X et XI	39
4.5	Distribution spatiale des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode IX	44
4.6	Distribution spatiale des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode X	45
4.7	Distribution spatiale des pH mesurés au cours de l'épisode IX	46
4.8	Distribution spatiale des pH mesurés au cours de l'épisode X	47
4.9	Evolution des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode IX en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents	50
4.10	Evolution des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode X en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents	51

4.11	Evolution des pH mesurés au cours de l'épisode IX en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents	52
4.12	Evolution des pH mesurés au cours de l'épisode X en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents	53

RESUME

L'étude entreprise vise à déterminer l'influence des émissions d'anhydride sulfureux (SO_2) de la fonderie de Noranda sur l'acidité des précipitations dans un rayon de 15 km de la source. Plus de 700,000 tonnes de SO_2 sont rejetées annuellement par deux cheminées parmi lesquelles la plus élevée a une hauteur de 160 m. Les valeurs de pH obtenues avec un réseau de 35 stations au cours de quelques épisodes pluvieux font ressortir le caractère acide des précipitations dans cette partie du Québec (pH 3.6 - 4.0). Le pH moyen obtenu, 3.96, est aussi faible que les valeurs obtenues en Ontario, au New-Hampshire et en Scandinavie. La distribution spatiale des pH et des sulfates de deux épisodes pluvieux est étudiée en particulier. On constate une augmentation marquée des concentrations en sulfates dans les précipitations près de la ville avec un maximum atteint à quelques km dans la direction du cône d'émanation des cheminées. Pour le pH, on observe une certaine diminution dans la zone influencée, mais cette diminution est quelque peu réduite par la présence de poussières alcalines en circulation autour de la ville de Rouyn-Noranda.

La comparaison des résultats obtenus avec ceux rapportés dans la littérature confirme l'hypothèse que la portée du SO_2 et son effet sur l'acidification des précipitations se font sentir sur des distances bien plus considérables (jusqu'à 1000 km) que l'échelle de l'étude (15 à 20 km).

MOTS-CLES

précipitation / pluie / pH / soufre / fonderie / cheminée / retombée / Noranda

1. INTRODUCTION

L'acidité des précipitations est un problème environnemental qui a pris une ampleur considérable depuis quelques années. L'augmentation de l'acidité des précipitations sur la plus grande partie de l'Europe et sur une partie des Etats-Unis est en fait reliée à un problème beaucoup plus grave de changement du climat chimique causé par une variété d'émissions dans l'atmosphère (Anonyme, 1971). Ces émissions peuvent créer une situation locale, régionale ou globale dépendant de la durée de vie des polluants rejetés dans l'atmosphère.

L'acidité des précipitations est reliée en grande partie aux émissions d'anhydride sulfureux (SO_2) à travers le monde, puisque la composition chimique des précipitations comprend principalement des ions sulfates et des ions hydrogène. A Noranda, dans le nord-ouest Québécois, de grandes quantités de soufre sont rejetées dans l'atmosphère et sont par conséquent susceptibles d'influencer à une échelle locale, régionale ou globale l'acidité des précipitations. L'étude entreprise a pour but de déterminer l'influence des émissions de SO_2 de l'usine de Noranda sur l'acidité des précipitations dans la région de Rouyn-Noranda. A cette fin, on a installé un réseau de 35 stations réparties dans un rayon de 15 km de l'usine et on a étudié la variabilité du pH et de la concentration en sulfates au cours d'un certain nombre d'épisodes pluvieux entre le 26 juin et le 3 août 1978.

2. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

2.1 Sources de soufre

Le soufre émis dans l'atmosphère résulte à la fois de processus naturels (matières organiques décomposées en sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'activités humaines (SO_2 émis par combustion) (figure 2.1). Les gaz SO_2 et H_2S qui sont graduellement oxydés dans l'atmosphère réagissent avec des goutelettes d'eau pour produire de l'acide sulfurique. Une partie du soufre est assimilée directement par la végétation tandis que le reste retourne au sol entraîné par les précipitations.

La majorité du soufre provenant des océans par décomposition naturelle ou transport d'aérosols marins retournent dans les océans par absorption gazeuse ou retombent dans les précipitations (Rasmussen *et al.*, 1975). Les émissions de soufre d'origine anthropique contribuent à une partie seulement du soufre total émis dans l'atmosphère. Les estimés des émissions de soufre d'origine biologique sont importantes, mais d'après Gorham (1976), elles ne semblent pas être le facteur majeur de production d'acidité dans les précipitations, et peuvent être présumées en équilibre avec les sources naturelles de bases neutralisantes. De plus, les sources anthropiques de soufre ne sont pas uniformes puisqu'elles sont réparties selon la distribution de l'activité industrielle à travers le monde. Par exemple la région couvrant le centre et l'ouest de l'Europe, avec 1% de la surface totale de la terre, contribue à environ 20% du soufre d'origine anthropique. C'est donc le soufre provenant des activités humaines qui est responsable des concentrations élevées qu'on retrouve dans l'atmosphère du nord-ouest de l'Europe (Anonyme, 1972).

Au Canada, les émissions anthropiques contribuent à 5% des émissions anthropiques mondiales (Summers et Whelpdale, 1976). Un inventaire des émissions des différents polluants dans l'air à l'échelle du Canada a été fait pour l'année 1970 (Environnement Canada, 1973). Les émissions totales annuelles de SO_2 ont été estimées à 6.5×10^6 tonnes métriques par année; leur distribution apparaît à la figure 2.2 et leur répartition par catégorie apparaît au Tableau 2.1.

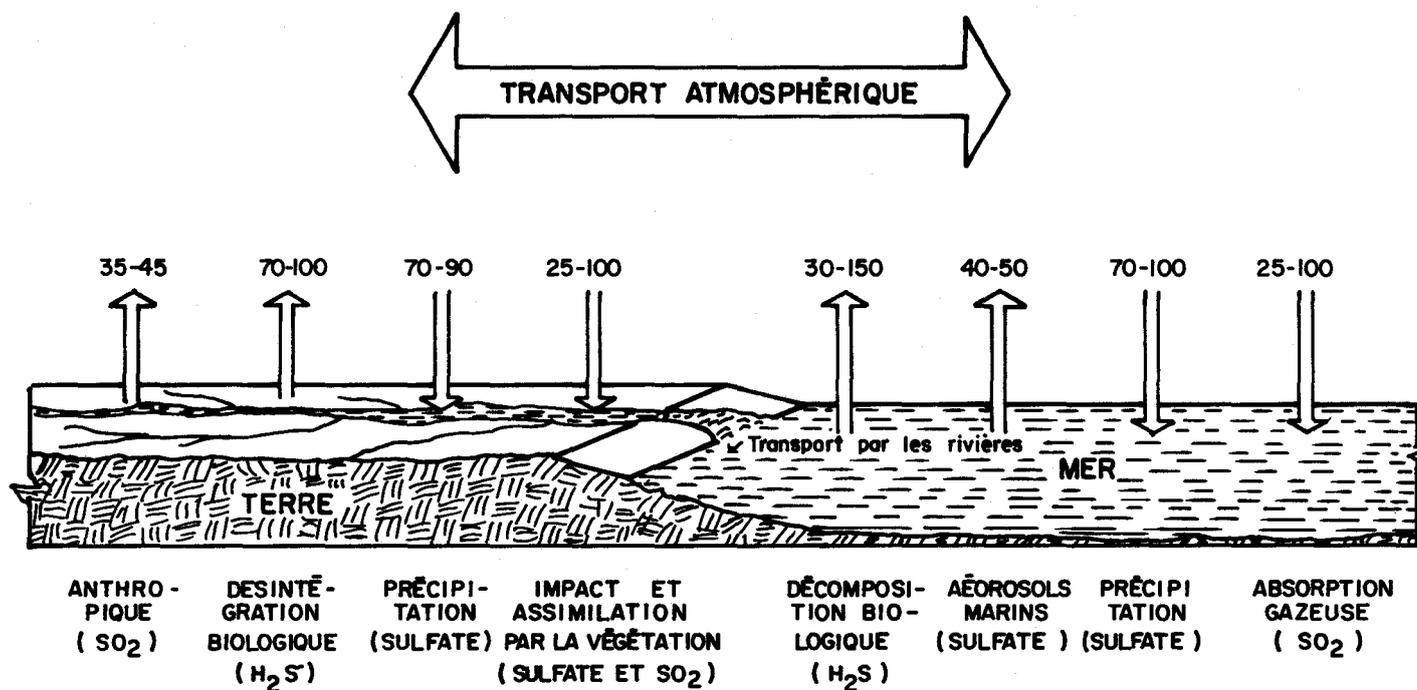


Figure 2.1 . Bilan du soufre dans l'atmosphère à l'échelle mondiale (millions de tonnes métriques de soufre par année) (Tiré de Anonyme , 1972) .

TABLEAU 2.1: Distribution au Canada des émissions de SO₂ selon les catégories de sources (Environnement Canada, 1973)

catégories	quantité	
	(tonnes métriques x 10 ³)	%
fonderies	4136	53
émanations urbaines (général)	1003	15
industries pétrochimiques	617	9
centrales thermiques	434	7
transport	155	2
pâtes et papiers	150	2
divers	44	1
TOTAL	6539	

On note à partir de ces distributions que les usines de fonderies de métaux sont les principales sources anthropiques d'émission de SO_2 au Canada et que parmi ces sources, celle de Sudbury dans le nord de l'Ontario occupe une place importante (2.7×10^6 tonnes SO_2 /année) puisqu'elle contribue à elle seule à plus de 40% des émissions totales anthropiques au Canada et qu'elle est la source la plus importante au monde. Environ 85% de ces émissions proviennent d'une cheminée de 380 m de hauteur (Summers et Whelpdale, 1976).

La seconde source la plus importante de SO_2 au Canada se retrouve à l'usine de Noranda (plus de 700,000 tonnes de SO_2 par année en 1970). L'usine de Noranda possède deux cheminées parmi lesquelles la plus élevée a une hauteur de 160 m (figure 2.3) et dont le panache d'émanation s'étend sur plusieurs kilomètres (figure 2.4). Les quantités cumulées de SO_2 émises par l'usine de Noranda et par celle de Sudbury (220 km au SE de Noranda) contribuent à plus de la moitié des émissions de SO_2 au Canada et à plus de 10% du SO_2 total d'origine anthropique de l'Amérique du Nord (Hutchinson et Whitby, 1977). La région du nord-ouest Québécois et celle du nord-est de l'Ontario sont donc des régions susceptibles d'avoir des précipitations dont le niveau de concentration en sulfates et en acidité est élevé.

2.2 Acidification des précipitations

Les premiers efforts systématiques pour étudier le pH des précipitations ont été réalisés en Suède au cours des années 1950; Barrett et Brodin (1955), en interprétant des données obtenues à l'aide d'un réseau de 19 stations dispersées sur le territoire suédois, ont pu identifier plusieurs zones dont certaines situées à l'extrémité sud de la péninsule étaient caractérisées par des précipitations acides (pH moyen annuel ≈ 4.6) tandis que dans la région nord-est du pays, le pH des précipitations était nettement plus élevé (pH $\approx 5.6 - 5.7$) et correspondait au pH d'une eau en équilibre avec la pression partielle du gaz carbonique (CO_2) dans l'air.



a)



b)

Figure 2.3 . a). Vue de l'usine de Noranda et de ses deux cheminées .
b). Vue des deux cheminées de l'usine de Noranda et
du panache d'émanation .



a)



b)

Figure 2.4 a). Vue du cône de diffusion des cheminées de l'usine de Noranda.
b). Vue de la retombée du panache d'émanation sur la ville de Rouyn .

Oden (1976) dans une revue récente portant sur les nombreux aspects du problème de l'acidité des précipitations, rapporte que l'augmentation de l'acidité dans l'air et dans les précipitations en Europe et ses effets sur les sols, la végétation et les eaux de surface, ont été perçus avec acuité pour la première fois en 1967. Les données qui servaient de support à cette analyse provenaient alors d'un réseau qui couvrait la péninsule Scandinave et une grande partie du nord-ouest de l'Europe (Angleterre, Irlande, nord de la France, Allemagne de l'Ouest, Autriche, Danemark, Hollande, Belgique et Pologne).

En 1956, un centre d'acidité (pH 5.0 à 4.5) apparaît dans le sud-est de l'Angleterre, le nord de la France et les pays du Bénélux. Trois années plus tard, la surface affectée s'étend sur de plus grandes distances et la partie centrale devient encore plus acide de 0.5 unité de pH.

L'augmentation de l'acidité est encore plus prononcée en 1966: les régions affectées par des pluies de pH 4.5 à 4.0 sont très vastes; dans certaines régions comme les pays du Bénélux, le pH moyen est inférieur à 4.0. Au cours des années 1970-73, les valeurs de pH apparaissent s'être stabilisées à des niveaux constants dans beaucoup de parties de l'Europe.

En Amérique, l'historique des mesures d'acidité n'est pas aussi bien documentée, car peu de mesures systématiques du pH des précipitations ont été faites avant les années 1970. Toutefois, des mesures de pH dans la forêt du Hubbard Brook au New-Hampshire depuis 1963 indiquaient la présence d'une acidité très élevée (pH moyen annuel 4.0 à 4.2) dans le nord-est des Etats-Unis (Likens et Bormann, 1974; Likens *et al.*, 1972). On rapporte dans cette région des valeurs de pH aussi faibles que 2.8 (Likens *et al.*, 1972).

Par des méthodes indirectes, Cogbill et Likens (1974) ont démontré qu'un processus d'acidification semblable à celui de l'Europe s'était produit en Amérique depuis une vingtaine d'années environ. Ils ont dérivé une relation stoéchiométrique entre les composantes chimiques trouvées dans les

précipitations. Utilisant les données provenant d'un réseau installé en 1955-56 (Junge, 1958; Junge et Werby, 1958) et d'un autre en 1965-66 (Lodge *et al.*, 1968; Gambell et Fisher, 1966; Pearson et Fisher, 1971), ils ont montré l'évolution de la distribution des valeurs de pH sur le nord-est des Etats-Unis (Cogbill et Likens, 1974; Cogbill, 1976).

En 1955-56, une zone de pH 4.5 est visible en Nouvelle-Angleterre et dans l'Etat de New-York. Autour de cette zone, le pH calculé atteint rapidement une valeur normale (5.6). La carte produite pour l'année 1965-66 montre la même distribution que celle obtenue 10 ans plus tôt, mais la zone d'acidité (pH calculé = 4.5) s'est étendue au sud et à l'ouest. Cogbill (1976) a produit une autre carte montrant la distribution du pH observé en 1972-73. Cette carte montre que la région avec un pH inférieur à 5.6 a continué à s'étendre et couvre maintenant tout l'est de l'Amérique du Nord à l'exception de la Floride et du nord du Canada. Au milieu de la zone, on observe des valeurs de pH voisines de 4.0.

Au Canada, on ne rapporte pas d'étude systématique du pH à l'échelle nationale. Summers et Whelpdale (1976) dans une revue récente portant sur l'étendue de l'acidité des précipitations au Canada, identifient, à partir de mesures sporadiques dispersées à travers le pays, deux régions dont les précipitations sont acides: le centre de l'Alberta et le sud de l'Ontario. Selon ces deux auteurs, le sud du Québec et les provinces maritimes sont le prolongement de la zone de précipitation acide identifiée en Ontario et en Nouvelle-Angleterre.

Au Québec, Lachance *et al.* (1977) ont obtenu un pH moyen annuel égal à 4.46 avec un intervalle de 4.24 à 5.16 à partir des données fournies par un réseau de 19 stations installé sur le bassin de la rivière Yamaska en 1974-75. Les valeurs de pH mesurées correspondent avec le prolongement des courbes isovaleurs tracées par Cogbill (1976) dans le sud du Québec pour l'année 1972-73.

D'autres études récentes portant sur l'acidité des précipitations sont rapportées au centre-sud de l'Ontario (Dillon *et al.*, 1978) et à Saint-Jean, Nouveau-Brunswick (Anlauf *et al.*, 1976). Dans les deux études, les valeurs de pH mesuré sont voisines de 4.0 confirmant une fois de plus que la zone d'acidité qui couvre l'est des Etats-Unis s'étend également à une grande partie de l'Ontario, du Québec et des provinces de l'Atlantique.

2.3 Nature et origine de l'acidité des précipitations

Récemment, un débat s'est engagé sur la nature de l'acidité des précipitations. Frohlinger et Kane (1975), à partir de mesures de pH et de courbes de titrations, soutenaient que la pluie était principalement une solution d'un acide faible plutôt que celle d'un acide fort comme l'acide sulfurique. Galloway *et al.* (1976a; b) ainsi que Likens *et al.* (1976), ont démontré que la précipitation contient en quantité très faible des substances qui causeraient ce type d'acidité (H_2CO_3 , NH_4 , Al, Fe, Mn). Au Hubbard Brook, dans le New-Hampshire, par exemple, la précipitation contient en moyenne des ions hydrogène qui correspondent à 69% des cations, et des ions SO_4 , NO_3 et Cl qui correspondent respectivement à 62, 21 et 14% des anions (Likens et Bormann, 1974). Cette composition ionique est caractéristique d'une solution diluée d'un acide fort.

Des travaux ont été réalisés sur l'influence de sources ponctuelles d'émission de soufre sur le contenu en acidité et en soufre de la pluie autour de cette source, ainsi que l'étendue et l'importance des retombées (Högström, 1973; Högström, 1974; Granat et Rodhe, 1973; Larson *et al.*, 1975; Li et Landsberg, 1974; Hales *et al.*, 1971). Dans presque tous les cas, on observe des valeurs d'acidité très élevée près des sources d'émission de SO_2 . Dans la région immédiate de Sudbury, Beamish (1976) rapporte un pH moyen de 4.5 avec un minimum de 3.2, tandis que Hutchinson et Whitby (1977) rapportent des valeurs de pH fréquemment inférieures à 3.0 dans un rayon inférieur à 5 km des cheminées de Sudbury. Li et Landsberg (1974) ont mesuré des valeurs de pH entre 3.0 et 5.7 avec un mode¹

¹ mode: valeur de pH la plus fréquente

compris entre 3.5 et 4.0 dans un rayon de 5 km d'une centrale thermique dans le Maryland. Egalement Larson *et al.* (1974), en analysant l'influence des émanations de SO_2 d'une usine de fonderie près de Seattle, dans l'état de Washington, sur la qualité d'une précipitation, ont trouvé une augmentation de l'acidité dans la zone influencée par le cône de diffusion des émanations.

Brosset (1973) a proposé une théorie pour illustrer le mécanisme de formation d'acide sulfurique (H_2SO_4) à partir du SO_2 en provenance d'émanations urbaines (figure 2.5). Environ 2 à 3% du SO_2 émis est oxydé dans la cheminée et converti en H_2SO_4 concentré, dont une partie peut se déposer sur les parois de la cheminée et le reste émis dans l'air ambiant. Le dépôt de H_2SO_4 concentré sur les parois n'est pas désirable; c'est pourquoi les gaz sont rejetés à une température suffisamment élevée pour diminuer le dépôt sur les parois et éviter ainsi les effets corrosifs de l'acide.

Quand elles sont émises dans l'air ambiant, les gouttelettes de H_2SO_4 concentré captent de l'eau et éventuellement, en raison de la pression de vapeur dans l'atmosphère, atteignent une concentration d'environ 5 M.

Le SO_2 qui n'est pas oxydé dans la cheminée vient en contact avec de très petites particules couvertes d'un film aqueux ou avec des gouttelettes d'eau. Le film aqueux sur les gouttelettes peut contenir des substances dissoutes ou en suspension avec des composés de fer. Dans une première étape, le SO_2 est dissout et forme de l'acide sulfureux (H_2SO_3) qui se dissocie en ions H^+ , HSO_3^- et SO_3^{2-} , parce qu'il est un acide plutôt fort.

Sous l'influence des composés de fer agissant comme catalyseurs, HSO_3^- et SO_3^{2-} sont rapidement oxydés en H_2SO_4 qui est un acide fort et qui forme des ions H^+ et SO_4^{2-} .

Cette théorie explique les résultats obtenus par Högström dans la ville d'Uppsala, en Suède. Cette ville, d'une population de 100,000 habitants, est géographiquement bien délimitée (circulaire avec un diamètre

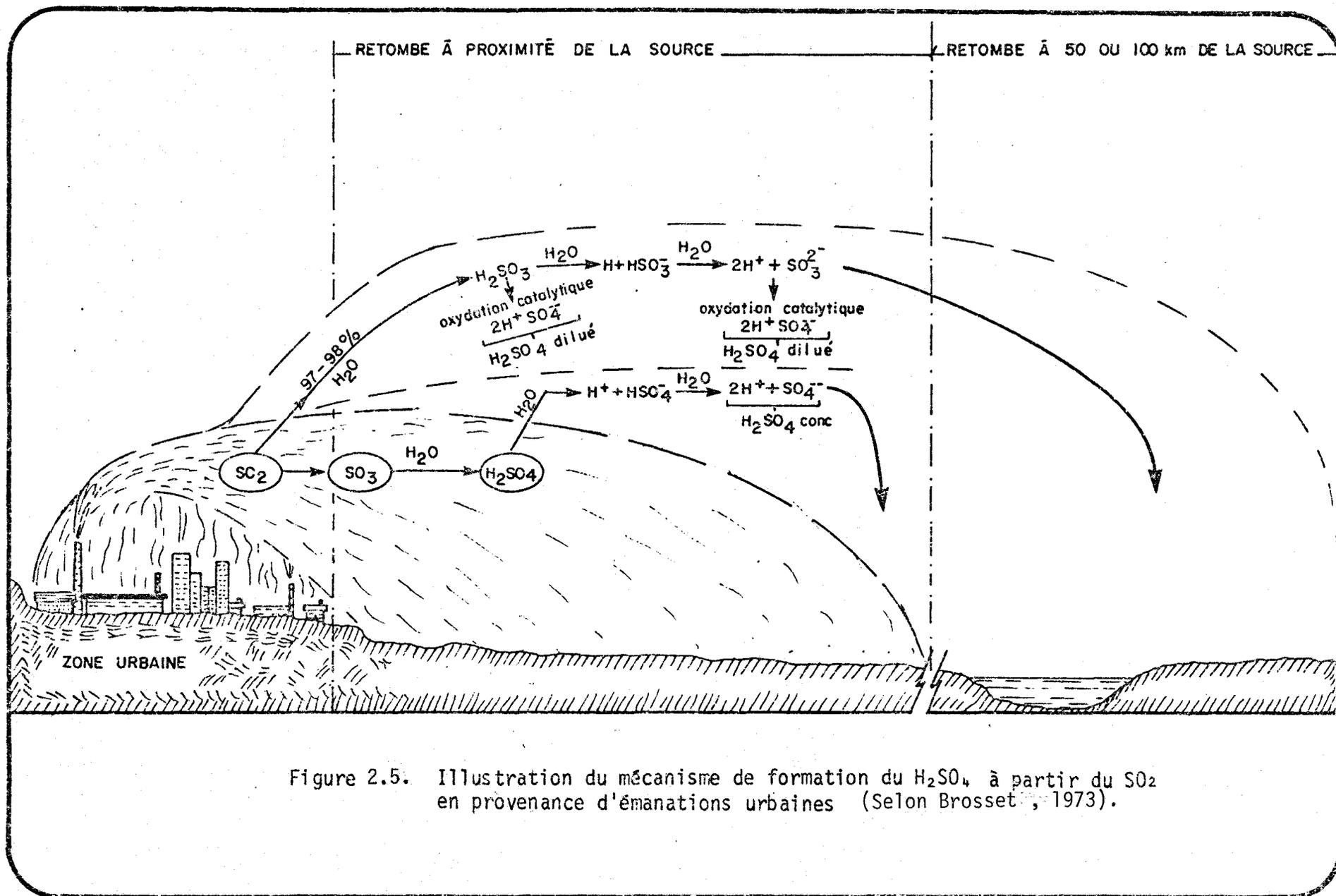


Figure 2.5. Illustration du mécanisme de formation du H₂SO₄ à partir du SO₂ en provenance d'émanations urbaines (Selon Brosset, 1973).

de 7 km) et situé dans une région relativement dépourvue de sources de soufre dans un rayon de 60 km. Les retombées de soufre ont été étudiées autour de la ville au moyen de capteurs de pluie installés à l'intérieur de 5 arcs concentriques de 180° dont les rayons avaient 3.5, 7, 20, 40 et 60 km. Les résultats de ces travaux ont montré une certaine retombée d'acide sulfurique concentrée à proximité de la source. Cependant, la majorité des retombées se retrouvait sous forme de sulfates dans une zone éloignée localisée à 50-100 km de la source indiquant que le temps de résidence dans l'atmosphère des composés de soufre était compris entre 1 et 2 heures environ.

Toutefois, il est plausible, et plusieurs travaux le suggèrent (Anonyme, 1971; Granat et Rodhe, 1973; Oden, 1976), que la portée du SO_2 et son effet sur l'acidification des eaux atmosphériques se fassent sentir sur des distances bien plus considérables. Les travaux de Granat et Rodhe (1973), qui ont étudié les retombées de soufre dans deux cercles de rayon 5 et 15 km d'une usine thermique située à Stenungsund, en Suède, ont montré qu'à peine 5% du soufre émis retombait à l'intérieur d'une distance de 15 km; de plus, ils ont fait ressortir la difficulté de comparer une source ponctuelle de SO_2 émis par une grande cheminée avec une source dispersée sur une surface avec un bas niveau d'émission.

Des études de trajectoires de particules sur le continent européen ont montré que le soufre demeure en moyenne 2 à 4 jours dans l'atmosphère et est habituellement transporté sur des distances supérieures à 1000 km avant de retomber au sol (Anonyme, 1972). On expliquerait ainsi l'augmentation de l'acidité des précipitations sur la péninsule scandinave par les émissions de soufre en provenance de l'Angleterre et du centre de l'Europe. Egalement, Cogbill et Likens (1974) et Gatz (1976) expliquent, à partir de ce temps de résidence du soufre dans l'atmosphère, l'augmentation de l'acidité des précipitations dans le nord-est des Etats-Unis par les émissions de soufre venant de régions industrielles situées au sud et au sud-ouest de la zone influencée.

Récemment, Oden (1976) a élaboré une théorie concernant le transport du soufre en vue de résoudre ce dilemme. Un processus naturel appelé "looping" cause une sous-estimation des distances affectées et une surestimation des valeurs de retombées (figure 2.6). En effet, lorsque des éléments qui peuvent former des composés volatils comme l'eau, H_2S , $(CH_3)_2S$, NH_3 , N_2O , etc., sont rejetés dans l'atmosphère, ils retombent aux sols sous une forme quelconque et recommencent à diffuser dans l'atmosphère. Les processus de lessivage de l'atmosphère causent des retombées de ces substances à des distances un peu plus éloignées et le cycle recommence. Sous des conditions de vent normal, l'effet de looping est important et la retombée mesurée le long d'une trajectoire de vent apparaît plus grande à cause de mesures répétées de parties de retombées provenant de la même source.

2.4 Effets de l'acidité des précipitations sur les écosystèmes

Les effets de l'acidité des précipitations sur les écosystèmes en général ont été résumés récemment par Gorham (1976) et par Oden (1976). Les principaux effets se font sentir sur les lacs, sur la végétation et sur les sols.

On attribue à la décroissance soutenue du pH des précipitations, l'acidification progressive des eaux lacustres observée depuis quelques années en Suède (Likens, 1976; Wright et Gjessing, 1976; Schofield, 1976; Dickson, 1975). Dickson (1975) rapporte que sur la côte ouest de la Suède, près de Gothenburg, où les lacs sont peu tamponnés et les retombées de pluie acide sont maximums, 93% des 321 lacs observés ont un pH plus petit ou égal à 5.5 et 53% des lacs considérés ont un pH entre 4.0 et 4.5. Likens (1976) rapporte qu'on estime à environ 10,000 le nombre de lacs suédois qui ont été acidifiés à des pH au-dessous de 6 et à 5000 le nombre de lacs dont les eaux ont un pH inférieur à 5. Wright et Gjessing (1976) ont montré que le pH d'une centaine de lacs faiblement tamponnés, en Scandinavie, a diminué de 1 à 2 unités au cours des 30 à 40 années écoulées pour passer d'un niveau de pH généralement au-dessus de 6 au niveau présent inférieur à 5.

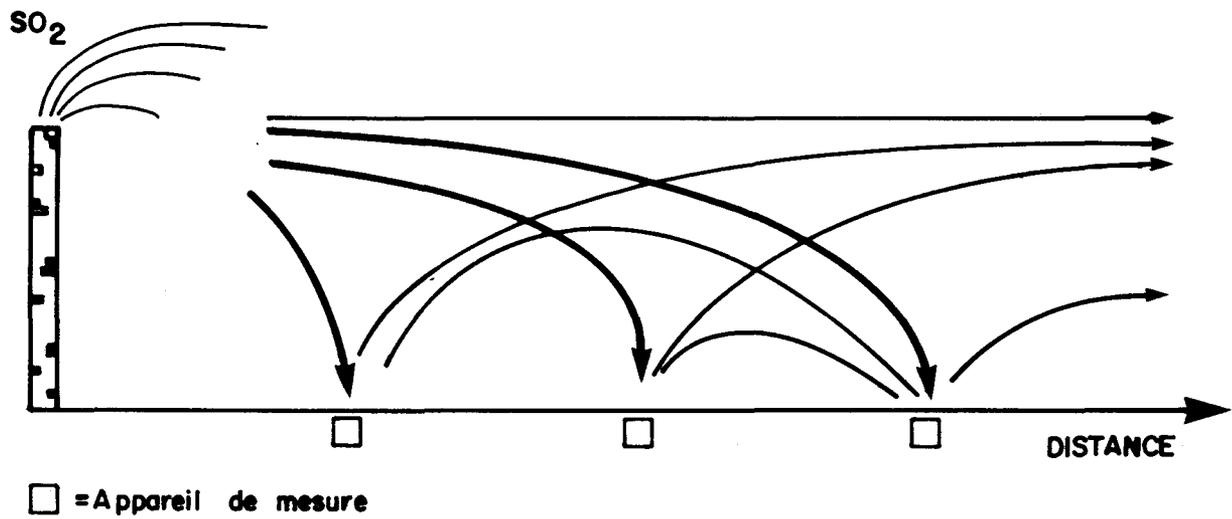


Figure 2.6 .Illustration de l'effet du "looping" dans le transport du soufre (d'après Oden , 1976) .

Beamish et Harvey (1972) estiment que les émanations de SO_2 des fonderies de Sudbury sont responsables de l'acidification de la majorité des lacs de la région de "La Cloche Mountain": les eaux de 33 des 150 lacs étudiés, situés à 65 km environ au sud-ouest de Sudbury, présentaient des pH inférieurs à 4.5, et les eaux de 37 lacs étaient d'un pH compris entre 4.5 et 5.5 (Beamish, 1976).

Les effets de l'acidification des précipitations sur les sols et la végétation ont aussi fait l'objet de nombreux travaux dont seulement quelques-uns sont cités ici: (Hutchinson et Whitby, 1977; Wood et Bormann, 1974; Abrahamsen, 1976; Gorham, 1976; Oden, 1976). Les effets de la précipitation acide sont d'autant plus néfastes que les régions affectées sont généralement composées de roches ignées cristallines avec des sols pauvres en réserves de minéraux basiques qui ne sont pas en quantités suffisantes pour neutraliser l'acidité de la précipitation. On peut ainsi affirmer que toutes les régions du Bouclier canadien sont des écosystèmes fragiles et susceptibles d'être dégradés par l'acidité des précipitations.

3. METHODOLOGIE

3.1 Stations

35 points d'échantillonnage ont été choisis pour l'étude entreprise; on trouvera au tableau 3.1 la liste de ces stations, leurs coordonnées géographiques (latitude et longitude) ainsi que leur localisation par rapport aux cheminées de l'usine de Noranda. La figure 3.1 montre l'emplacement de ces stations sur la carte de la région de Rouyn-Noranda. On voit que 31 stations forment un demi-cercle d'un rayon approximatif de 15 km au sud de Noranda et que 4 stations (4, 5, 6 et 7) forment un axe au nord de Noranda.

Le choix de l'emplacement de ces stations a été influencé par la facilité d'accès et surtout par l'objectif de l'étude qui est de montrer l'influence éventuelle de l'usine de Noranda sur l'acidité des précipitations autour de la ville de Rouyn-Noranda. Les précipitations en provenance du sud-est sont potentiellement affectées par des émissions de soufre situées en Ontario (voir figure 2.2) et dans la région des Grands-Lacs, tandis que les précipitations provenant du nord, nord-est ou nord-ouest ne sont pas susceptibles d'être chargées en acidité et en sulfates. Il est donc plus facile de voir une influence éventuelle des émanations de l'usine de Noranda sur l'acidité des précipitations qui n'ont pas été affectées auparavant par des sources majeures de SO_2 .

Parmi les stations choisies, 3 d'entre elles (3, 27 et 28) sont situées en milieu urbain, tandis que les autres sont localisées dans des zones rurales ou semi-urbaines. Les stations 2 et 3 sont placées sur des toits d'édifice, tandis que les autres sont installées à une distance variant entre 5 et 30 m des résidences des observateurs.

3.2 Collecteurs de précipitations

Le collecteur de pluie utilisé dans cette étude est du même type que celui employé sur le bassin de la rivière Yamaska (Lachance et Sasseville, 1976). Ce collecteur comprend un entonnoir Buchner en polyéthylène de 17 cm de diamètre qui capte la précipitation et la dirige dans un entonnoir à décantation en polyéthylène d'une capacité de 1 litre (figure

TABLEAU 3.1: Localisation des stations d'échantillonnage des précipitations dans la région de Rouyn-Noranda

station	latitude	longitude	distance des cheminées (km)	direction par rapport aux cheminées
1	48° 14' 36"	79° 05' 54"	6.3	W - WSW
2	48° 14' 24"	78° 59' 24"	2.6	SE
3	48° 14' 18"	79° 00' 00"	1.6	S
4	48° 16' 48"	79° 02' 06"	3.4	NNW
5	48° 20' 16"	79° 01' 42"	9.8	N
6	48° 23' 30"	79° 01' 48"	15.6	N
7	48° 18' 42"	79° 02' 48"	7.1	NNW
8	48° 13' 18"	79° 03' 30"	4.7	SW
9	48° 10' 06"	79° 09' 00"	14.0	SW
10	48° 14' 18"	79° 07' 36"	8.5	W - WSW
11	48° 13' 48"	79° 10' 00"	12.9	W - WSW
12	48° 12' 42"	79° 12' 36"	15.3	WSW
13	48° 12' 12"	79° 13' 42"	16.7	WSW
14	48° 13' 00"	79° 05' 12"	6.6	SW
15	48° 10' 42"	79° 08' 00"	12.2	SW
16	48° 07' 00"	79° 09' 00"	18.2	SW - SSW
17	48° 12' 00"	79° 06' 18"	8.8	SW
18	48° 13' 30"	78° 58' 42"	4.3	SE
19	48° 13' 06"	78° 57' 48"	5.6	SE
20	48° 13' 24"	79° 01' 30"	3.2	S - SSW
21	48° 12' 00"	79° 02' 06"	6.3	S - SSW
22	48° 10' 06"	79° 02' 30"	9.7	S - SSW
23	48° 12' 54"	78° 55' 24"	8.4	SE - ESE
24	48° 12' 48"	78° 53' 12"	10.8	ESE
25	48° 12' 42"	78° 50' 36"	14.0	ESE
26	48° 12' 36"	78° 48' 42"	16.1	ESE
27	48° 14' 18"	79° 01' 54"	1.9	SW - SSW
28	48° 14' 18"	79° 00' 12"	1.8	SSE - SE
29	48° 12' 54"	78° 59' 48"	4.7	SSE
30	48° 11' 54"	78° 58' 36"	6.8	SSE
31	48° 10' 18"	78° 58' 24"	9.8	SSE
32	48° 09' 18"	78° 58' 36"	11.4	S - SSE
33	48° 07' 36"	78° 58' 36"	14.5	S - SSE
34	48° 07' 42"	78° 56' 48"	15.0	SSE
35	48° 06' 12"	78° 56' 24"	17.9	SSE

3.2 et 3.3). L'entonnoir et le réservoir sont fixés à une tige métallique qui est montée sur un poteau de bois planté dans le sol de telle sorte que l'orifice de l'entonnoir est à environ 1.3 m du sol. Ce capteur de pluie s'est avéré avoir une efficacité de 85% par rapport à un pluviomètre standard (Lachance et Sasseville, 1976).

3.3 Protocole d'échantillonnage

Durant la période du 26 juin au 3 août, les observateurs locaux demeurant à proximité recueillaient le matin entre 8h et 9h et le soir entre 18h et 19h la précipitation qui s'était accumulée dans le collecteur et entreposaient l'échantillon au réfrigérateur. Un technicien, qui faisait la tournée une fois par semaine, recueillait les échantillons d'eau accumulés et nettoyait ou rinçait les collecteurs de précipitation.

Les collecteurs de pluie, qui sont continuellement exposés à l'atmosphère, recueillent, en plus des retombées humides, des poussières locales qui sont susceptibles d'influencer la qualité des échantillons. C'est pourquoi, à chaque tournée, toutes les surfaces en contact avec la précipitation étaient soigneusement rincées à l'eau distillée. Lorsque les entonnoirs étaient contaminés par des matières fécales d'oiseaux, ils étaient remplacés et nettoyés au laboratoire.

Les mesures de pH étaient prises aussitôt que possible au laboratoire de l'usine de filtration de Rouyn-Noranda; un délai maximum de 3 à 4 jours pouvait s'écouler entre la collecte des échantillons et la mesure. Ce délai n'a donc pu nuire à la qualité des données puisque d'après les travaux de Galloway et Likens (1976), des échantillons dont le pH est faible (< 4.5) peuvent être conservés à 4°C plusieurs semaines sans changement appréciable de valeur de pH.

Dans la semaine qui suivait une tournée de collecte, les échantillons de certains épisodes pluvieux étaient acheminés par avion à Québec pour la mesure des sulfates par le Service qualité des eaux du Ministère des Richesses naturelles. Les mesures de sulfate étaient faites dans un délai maximum de 10 jours.

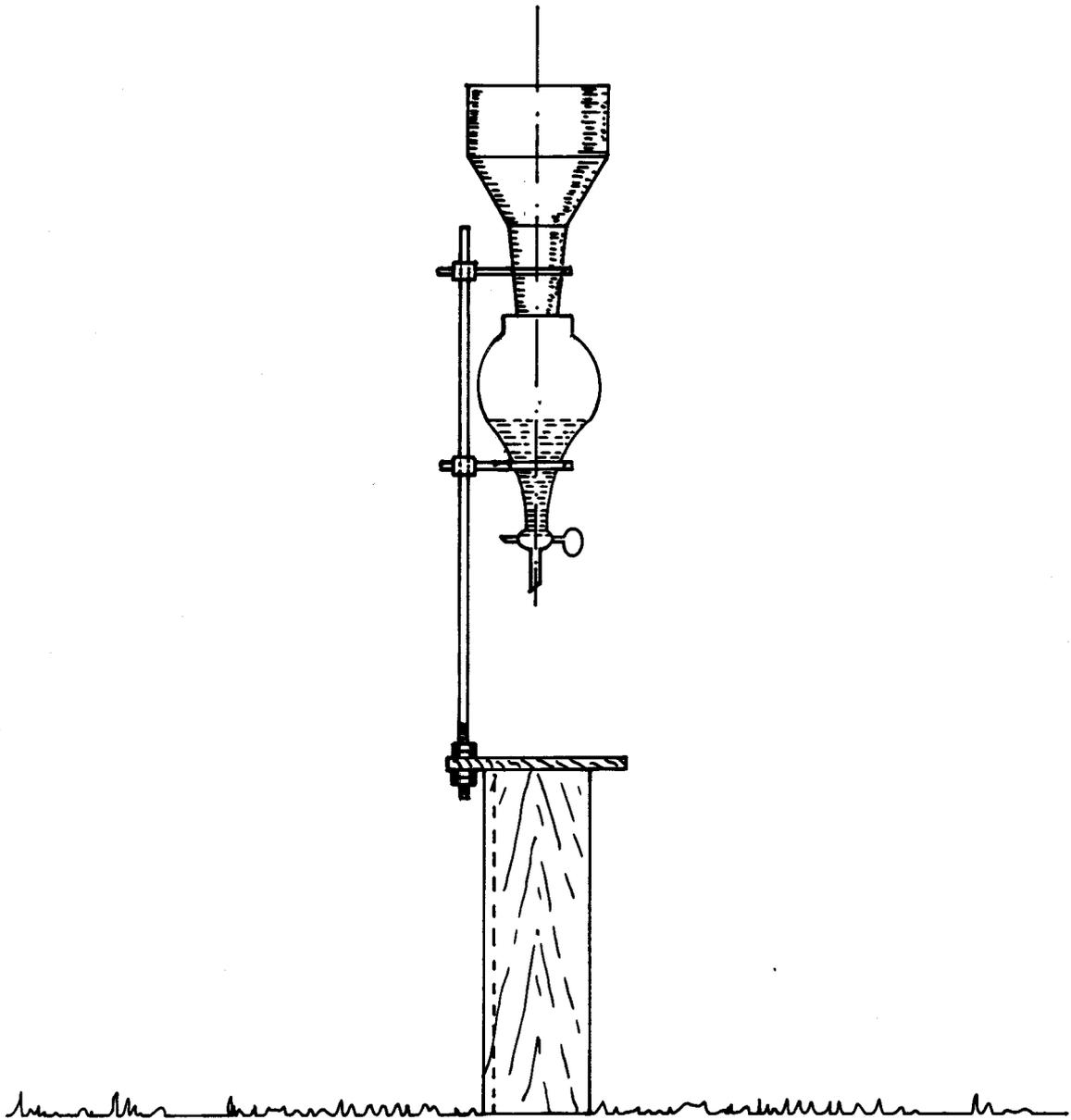


Figure 3.2. Collecteur de pluie utilisé pour l'étude de la variabilité du pH dans la région de Rouyn-Noranda.



a)



b)

Figure 3.3a). Vue montrant une station d'échantillonnage des précipitations
b). Vue en gros plan du capteur de pluie.

3.4 Données météorologiques

Des mesures horaires de vitesse et de direction du vent, prises à trois niveaux différents (43, 76 et 230 m) étaient disponibles grâce à une station située à Noranda. Des observations météorologiques journalières concernant la précipitation, et d'autres paramètres pertinents, étaient prises à une station installée à McWatters (10 km à l'est de Rouyn-Noranda) par la Société de conservation du nord-ouest (SCNO).

Trois autres stations installées par SCNO et situées à:

- Poularies : 50 km au nord de Rouyn-Noranda
- Montebillard : 30 km au sud-ouest de Rouyn-Noranda
- Cadillac : 50 km à l'est de Rouyn-Noranda

fournissaient des renseignements sur l'importance et l'étendue spatiale des épisodes pluvieux.

4. RESULTATS

4.1 Conditions météorologiques

La compilation de l'ensemble des mesures de direction et vitesse de vent à la station météorologique de Noranda aux trois niveaux de norme n'était pas disponible présentement. Si on considère la station météorologique située à l'aéroport de Val d'Or (à 100 km à l'est de Rouyn-Noranda) comme représentative de la région, les vents de juillet balayaient Rouyn-Noranda avec une vitesse moyenne de 11.7 km/h provenant principalement du sud-ouest (figure 4.1). On constate également sur la figure 4.1 une fréquence assez élevée de vents en provenance du nord-ouest indiquant que le climat de cette région subit principalement l'influence de deux déplacements d'air provenant de directions différentes.

Cependant, d'après les mesures de vitesse et de direction du vent, prises aux trois niveaux (43, 77 et 230 m) à Noranda, les vents changent légèrement de direction selon l'altitude comme le montre une compilation de la fréquence des directions des vents en juillet 1977.

	43 m	77 m	230 m
S	10.0 %	17.5 %	7.7 %
SSW	16.1	10.8	15.3
SW	12.7	6.3	11.4
WSW	9.2	3.8	7.9
W	9.4	6.9	8.3
TOTAL	57.4%	45.3%	50.6%

A 77 m, les vents provenaient principalement du sud, alors qu'aux autres niveaux, le vent provenait principalement du sud-sud-ouest. Quant aux vitesses de vent mesurées aux trois niveaux, elles augmentent évidemment avec l'altitude. Les vitesses de vent mesurées à 230 m sont en moyenne deux fois plus élevées qu'à 77 et 43 m. Les vitesses de vent mesurées à 77 m, bien que légèrement plus élevées en moyenne que celles à 43 m, sont

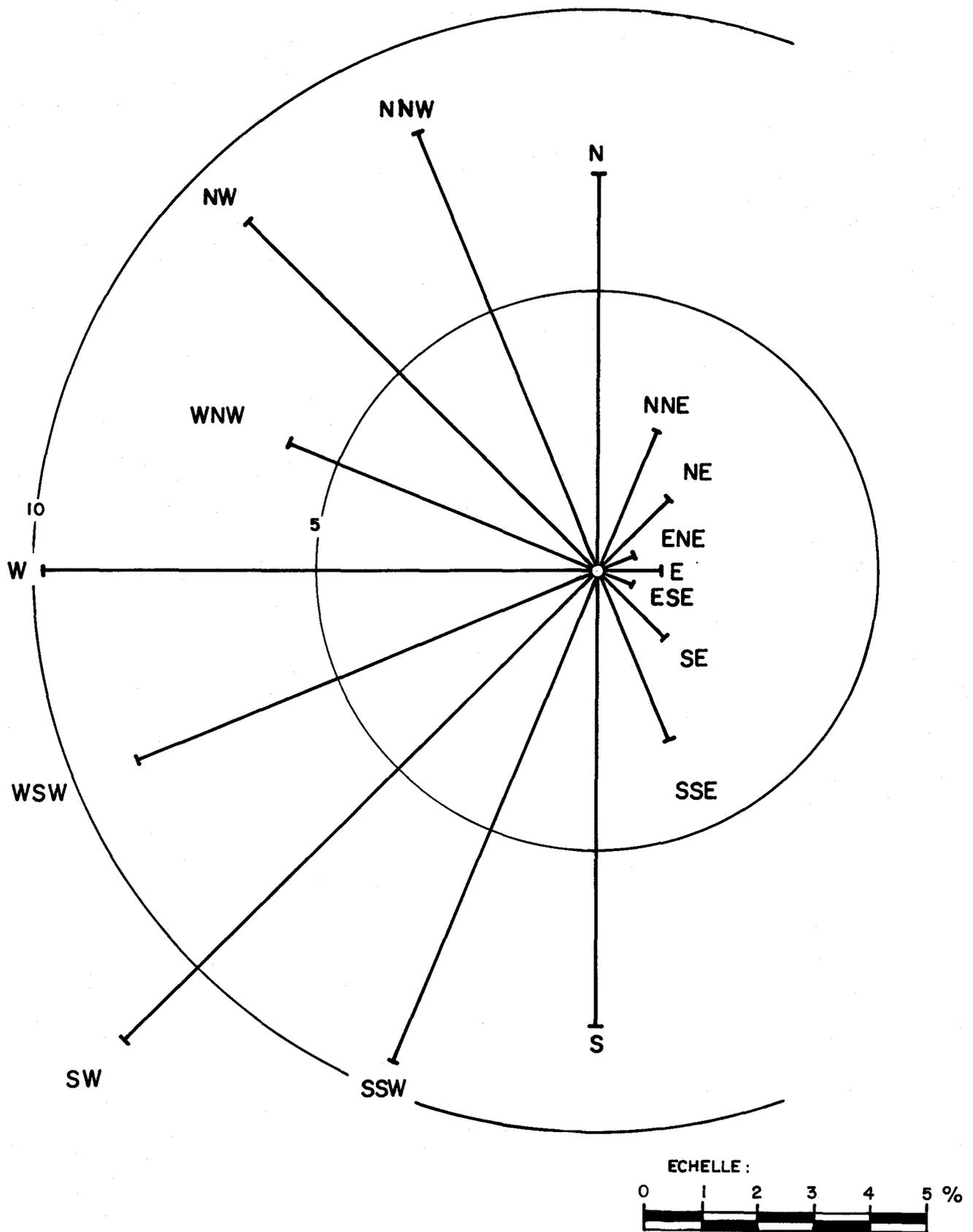


Figure 4.1 . Distribution de la direction des vents en juillet à Val d'Or pour la période 1955 - 1972 .

souvent inférieures, indiquant une présence occasionnelle d'une sorte de turbulence du vent dans la région.

Les précipitations totales pour le mois de juillet 1978 à McWatters (à 10 km à l'est de Rouyn) sont supérieures à la moyenne enregistrée à Val d'Or (tableau 4.1). En comparant la valeur obtenue à McWatters avec celles mesurées aux trois autres stations météorologiques voisines, on observe des différences très grandes indiquant que beaucoup de précipitations sont tombées inégalement sur la région.

Durant la période du 26 juin au 3 octobre, on a recueilli des échantillons provenant de onze épisodes pluvieux. Au tableau 4.2, chacun des épisodes pluvieux est décrit succinctement et la direction des vents avant et pendant la précipitation y est indiquée. La moitié de ces épisodes pluvieux ont débuté au cours de la nuit; il en découle une incertitude sur l'heure du début de la précipitation, puisqu'aucun pluviographe permettant d'obtenir cette information n'était installé dans la région d'étude. De plus, plusieurs épisodes comprennent des averses ou des orages répartis plus ou moins également sur la région d'étude pendant une durée de temps allant de 1 heure à 12 heures. Les quantités de pluie observées varient de quelques mm à plus de 30 mm. Généralement, le vent soufflait du sud-ouest au cours de l'épisode pluvieux, sauf pour l'épisode IX pendant lequel le vent provenait du nord-est.

4.2 Gamme des valeurs de pH mesurées

Les valeurs de pH mesurées au cours de chacun des épisodes pluvieux sont présentées au tableau 4.3. Certains épisodes pluvieux comprennent un nombre réduit de mesures (I, III et VIII), soit parce que la précipitation est tombée inégalement sur la région, soit parce que toutes les stations n'étaient pas en opération. Les épisodes I, II et III (27-29 juin) se sont produits au cours de la mise en opération du réseau.

82% des valeurs de pH mesurées au cours de la période d'étude se trouvent entre 3.4 et 4.6 avec un mode compris entre 3.8 et 4.0 (figure

TABLEAU 4.1: Précipitations mesurées par les stations météorologiques du SCNO pour le mois de juillet dans la région de Rouyn-Noranda

1- McWatters	145.6
2- Montebillard	87.7
3- Cadillac	91.9
4- Poularies	154.8
Moyenne 2-3-4	111.5
Val d'Or (1955-1972)	96.5

Note: les précipitations sont exprimées en mm de hauteur.

TABLEAU 4.2: Description et caractérisation des épisodes pluvieux de la période d'étude

Episode	Début et fin	quantité (mm)	type de pluie	direction dominante des vents	
I	27 juin 14-15 hres	4.8 ¹ (6.0) ²	averse	0.8-10 hres SE 11 hres S 12 hres SW	13-18 hres NNW
II	28 juin 17-19 hres	4.6 (.9)	averse	15 hres SW 16 hres WSW 17-18 hres SW 19 hres WNW	20 hres W 21-22 hres WSW
III	29 juin 14-15 hres	trace	averse légère	10-13 hres WNW 13-17 hres NNW	
IV	6 juillet 18-21 hres	12.5 (12.7)	orage	13-17 hres SSW 18 hres SW 19-23 hres SSW	
V	8 juillet 00-07 hres	18.3 (22.8)	pluie	17-18 hres SE 19 hres SSE 20 hres NNE 21 hres SE	22 hres SSE 23 hres S 00-05 hres SSW 06-09 hres SW
VI	10 juillet 00-07 hres	2.5 (2.6)	pluie	23-02 hres SSW 03 hres SW 04-05 hres WSW 06 hres W	07-08 hres NW
VII	13 juillet 12-24 hres	18.6 (9.2)	averse + orage	09-14 hres S 15-17 hres SSW 18 hres SW 19 hres W	20-21 hres NW 22-23 hres NNW 24-01 hres N
VIII	15 juillet 00-07 hres	15.0 (5.2)	averse	20-24 hres SE 01-03 hres SSE 04-05 hres S 06-08 hres SSW	
IX	22 juillet 18-24 hres	12.5 (19.4)	orage électrique	16-17 hres N 18-20 hres NNE 21-01 hres NE	
X	27 juillet 00-08 hres	34.3 (28.8)	orage électrique violent	22-01 hres SSW 02-03 hres SW 04-08 hres WSW	
XI	29 juillet 00-09 hres	8.1 (6.9)	orage électrique le matin + pluie la nuit	21-23 hres SSW 00-07 hres SW 08 hres WSW 09 hres W 10 hres NW	

¹ Précipitation observée à McWatters.² Précipitation moyenne des stations Poularies, Montebillard et Cadillac.

TABLEAU 4.3 Valeurs de pH mesurées aux stations pour chacun des épisodes pluvieux.

STA- TIONS	EPISODES										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1	4.41	4.40		3.90		3.70	3.96		4.00	4.50	4.70
2		(3.94) ¹		(3.80) ²			3.70		4.10	4.40	4.50
3		(3.98) ¹		(3.82) ²			4.01		4.20	4.50	4.70
4	5.50	4.95		3.90		4.20	4.10	3.76	4.21	4.10	4.60
5	3.74	4.45	4.11	5.92	6.70		4.25	4.40	5.00	5.00	5.70
6	3.17		3.89	3.80			5.50	6.70	4.11	4.25	4.45
7	4.20	4.21		3.90	3.42		4.00	3.60	4.20	4.15	4.55
8		4.40		3.79			3.93		4.37	6.00	5.70
9		4.62		3.55	3.50	3.80	3.85		5.20		4.55
10		4.40		3.83		3.65	4.11		4.50	4.35	4.50
11	4.05	4.11		3.81	3.50	3.95	5.30		4.65	4.45	
12		4.02		3.75	3.65		4.45		4.15	4.40	
13		3.90		3.65		3.58	4.11	3.80	4.11	4.30	4.40
14		4.58		3.80	3.50	3.70	4.00	4.00	5.40	5.70	6.40
15		4.52		3.75	3.40	3.70	3.80	3.75	4.60	4.80	4.50
16		4.60		3.75	3.45		3.95	3.80	3.70	4.40	4.50
17		4.55	4.40	5.39	6.00	4.40	3.70		4.50	5.00	5.70
18		5.20		4.00	3.85		4.02		4.05	4.30	4.45
19		6.50	7.50	3.90	3.80		3.81		4.20	5.25	5.90
20				3.75	3.75				3.90	4.50	5.00
21				3.95		3.80			3.70	4.50	4.55
22				3.80	3.65	4.00	3.90		4.00	4.90	6.70
23				3.95		4.00	4.00		4.15	5.10	5.60
24				3.80	3.70	3.80	3.75		3.90	4.35	4.45
25			7.60	3.85	3.75		4.00		3.90	4.40	4.40
26			6.55	3.85	3.71	3.61	3.90		3.97	4.40	4.40
27				3.95	3.45	3.70	3.90		4.30	4.50	
28				3.80	3.48	4.00	3.70	3.80	4.30	4.40	
29				3.95	3.60	3.75	4.00	3.90	4.00	4.25	5.30
30				3.75		3.61	4.00		3.95	5.80	6.40
31				4.00		3.80	3.90		4.10	4.60	4.55
32				3.90	3.58	3.71	4.20		4.10	4.40	4.65
33				3.80	3.55	3.70	3.80		4.10	4.60	4.45
34				4.00	3.50	3.65	3.89		4.40	4.70	6.30
35				4.01	4.50			5.70			

¹ Mesure sur un échantillon composé des épisodes I, II et III.² Mesure sur un échantillon composé des épisodes IV, V et VI.

4.2). En examinant l'histogramme des valeurs de pH, on remarque que la distribution des valeurs résulte de deux populations différentes, l'une avec un mode entre 3.8 et 4.0 et l'autre avec un mode entre 4.4 et 4.6. Le nombre des valeurs de pH supérieures à 5.6 représente 8% des valeurs mesurées; d'après une observation visuelle des échantillons, ces valeurs sont attribuables en grande partie à des contaminations provenant d'excréments d'oiseaux ou de débris végétaux quelconques.

4.3 Variabilité temporelle

A partir d'un nombre réduit d'épisodes pluvieux répartis sur une période de temps relativement courte, il est un peu illusoire de vouloir estimer la variabilité temporelle du pH des précipitations. On présente toutefois, à titre indicatif, l'évolution de la médiane¹ des valeurs rencontrées (figure 4.3 et tableau 4.4) pour indiquer un ordre de grandeur des variations temporelles susceptibles d'être rencontrées sur une période de temps plus longue. La médiane d'une série de valeurs n'est pas influencée par les valeurs extrêmes; elle permet donc une bonne estimation de la tendance générale. Pour les tournées I et III, le nombre de mesures (6) n'est pas suffisant pour calculer une médiane représentative de l'épisode pluvieux. On constate que la médiane des valeurs obtenues n'est pas tellement différente des valeurs obtenues à la station 1 qui est située à 6 km à l'ouest des cheminées.

L'examen de la figure 4.3 montre que les épisodes IV, V, VI et VII, qui sont apparus entre le 6 et le 15 juillet, ont des valeurs de pH plus faibles que les épisodes IX, X et XI, qui se sont produits entre le 22 et le 29 juillet. L'histogramme des valeurs de pH pour chacun de ces groupes de périodes (figure 4.4) confirme le caractère nettement plus acide (pH 3.6 - 4.0) du premier groupe. Au cours des trois derniers épisodes, les valeurs de pH s'étendent sur un intervalle plus large et on note un nombre appréciable de valeurs supérieures à 5.6 (11.6%).

¹ médiane: valeur de pH correspondant à 50% du nombre de mesures inférieures ou supérieures à cette valeur.

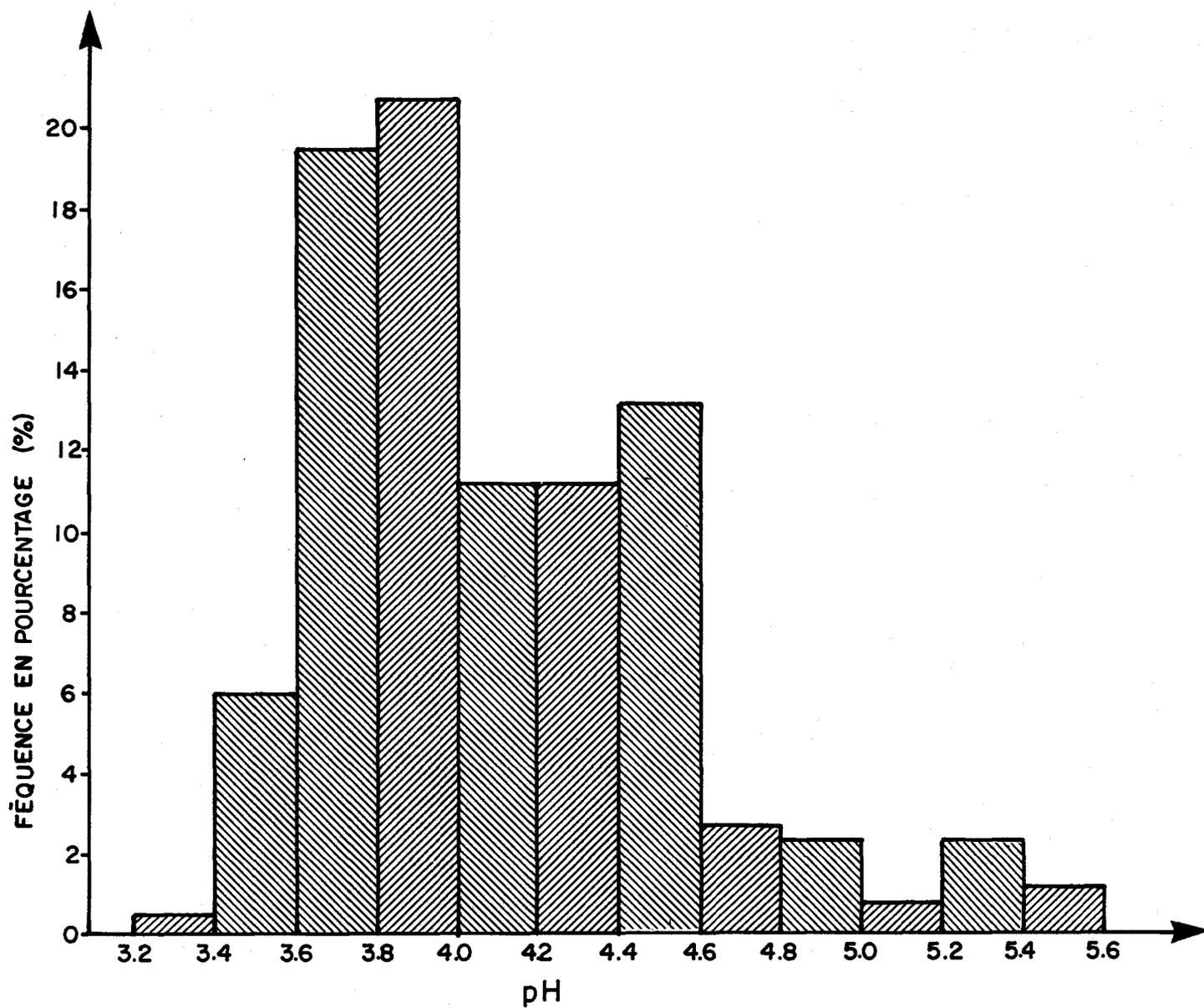


Figure 4.2 . Histogramme des valeurs de pH inférieures à 5.6 mesurées pendant la période d'étude pour l'ensemble des stations .

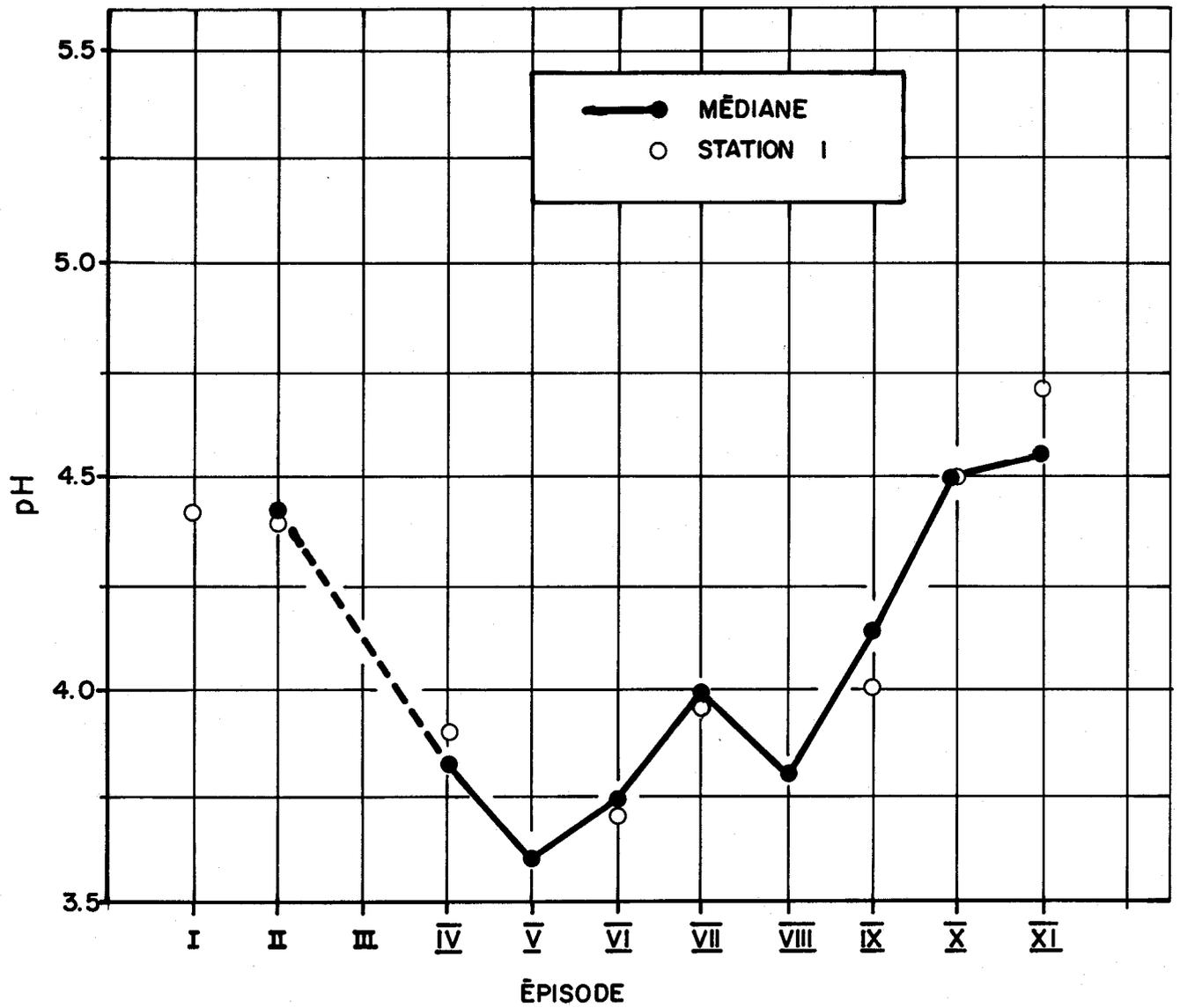


Figure 4.3. Variation temporelle du pH des précipitations autour de Rouyn-Noranda .

TABLEAU 4.4: Médianes des valeurs de pH et charge moyenne en ions hydrogène des épisodes pluvieux de la période d'étude

Episode	Effectif ¹	Médiane ²	Hauteur (mm) ³	Charge(eq/hect) ⁴
I	6	(4.12) ⁵	4.8	3.64
II	18	4.42	4.6	1.75
III	6	(5.47) ⁵	-	-
IV	35	3.83	12.5	18.50
V	23	3.60	18.3	46.00
VI	22	3.73	2.5	4.65
VII	32	3.98	18.6	19.50
VIII	11	3.80	15.0	23.80
IX	34	4.13	12.5	9.25
X	33	4.50	34.3	10.90
XI	30	4.55	8.1	2.28

¹ Nombre de mesures.

² Valeur de pH correspondant à 50% du nombre de mesures inférieures ou supérieures à cette valeur.

³ Précipitation mesurée à la station McWatters.

⁴ Eq/hect : 10 C P, dans laquelle C est la concentration en ions hydrogène en eq/l, et P est la hauteur de la précipitation en mm.

⁵ Valeur peu représentative.

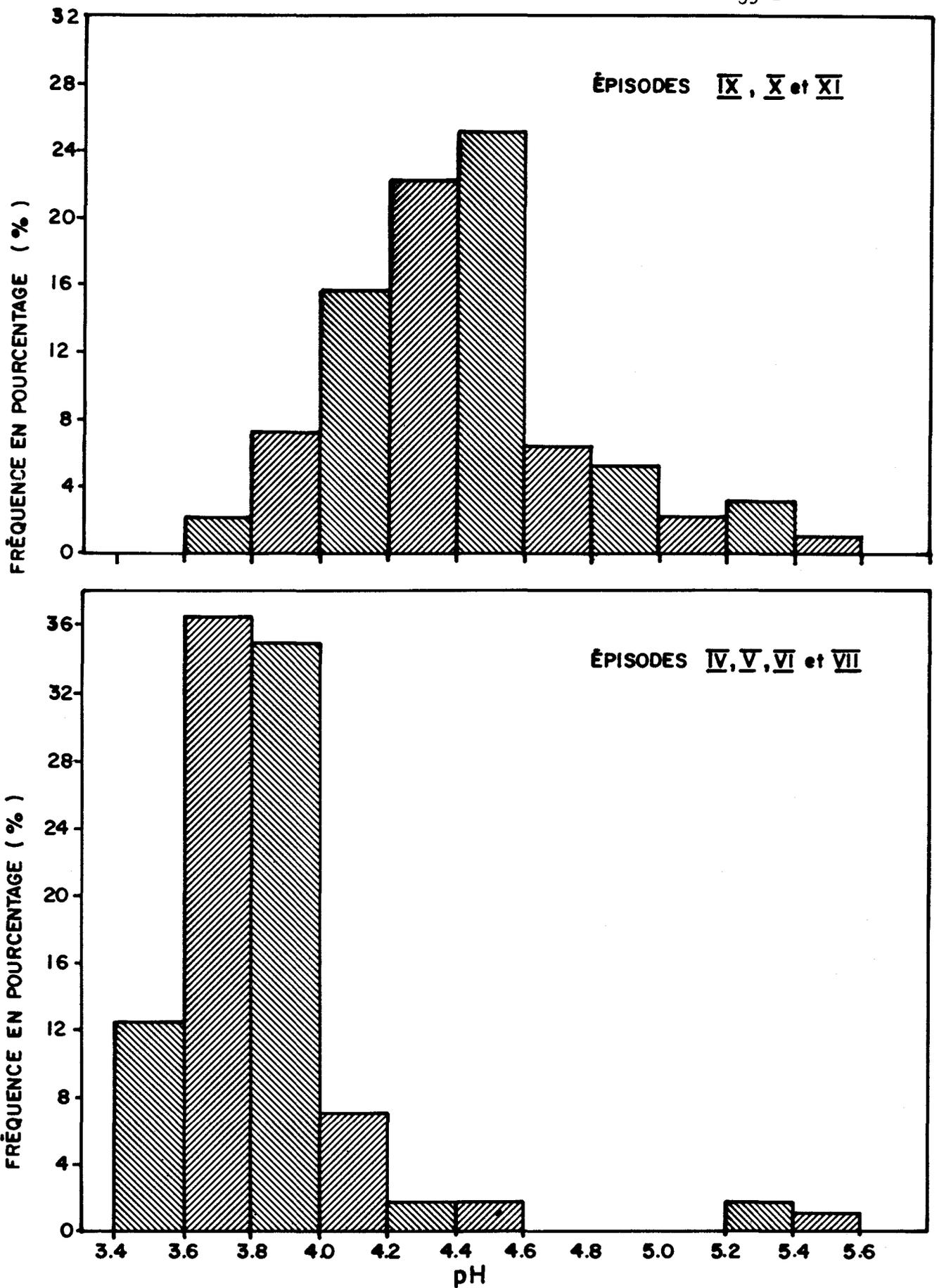


Figure 4.4 . Histogramme des valeurs de pH inférieures à 5.6 mesurées pour les épisodes IV, V, VI et VII et pour les épisodes IX, X et XI.

L'hypothèse soulevée dans la section précédente, que la distribution de l'ensemble des mesures de pH provient de deux populations différentes, est ainsi confirmée par l'examen des deux histogrammes de la figure 4.4.

Dans l'évaluation de l'évolution temporelle, il ne faut pas oublier que les unités de pH ne mettent pas en évidence les variations importantes: le passage d'un pH 3.7 à un pH 4.5 représente une augmentation de pH d'un facteur 1.2, mais signifie une diminution des concentrations en ions hydrogène d'un facteur égal à 6.3. En outre, la quantité de pluie tombée entre en ligne de compte dans l'évaluation de l'impact des variations temporelles du pH des précipitations. C'est pourquoi on a calculé, au tableau 4.4, les charges en ions hydrogène pour montrer que les charges varient également de façon appréciable au cours de la période d'étude.

4.4 Variabilité spatiale

L'étude de la variabilité spatiale du pH des précipitations dans la région de Rouyn-Noranda permet de répondre à l'objectif principal de l'étude qui consiste à vérifier si l'influence des émanations de SO_2 des cheminées de Noranda a une influence locale sur l'acidité des précipitations. L'étude de la distribution spatiale de l'acidité de quelques épisodes pluvieux autour de Noranda permet de vérifier cette hypothèse.

La vérification d'une telle hypothèse est possible si on dispose de mesures sur des épisodes pluvieux dont l'homogénéité a été vérifiée. Un ensemble de critères de sélection d'épisodes pluvieux a été élaboré et a permis de retenir les épisodes IX et X pour étudier la distribution spatiale de leur contenu en acidité. Les autres épisodes n'ont pas été retenus à cause d'un ensemble de facteurs qui introduisaient beaucoup d'hétérogénéité dans les données et qui rendaient l'interprétation trop hasardeuse:

- certains épisodes pluvieux ne possédaient pas assez de mesures: épisodes I, II, III et VIII;

- le vent changeait de direction pendant la précipitation: épisodes II, V et VII;
- la précipitation tombait de façon trop inégale sur la région: épisodes II, V, VI et XI;
- la précipitation était le résultat d'un ensemble d'averses réparties inégalement sur la région pendant une longue période de temps: épisodes VII et XI;
- un pourcentage élevé d'échantillons était rapporté contaminé: épisode XI;
- les précipitations étaient déjà trop chargées en acidité et/ou en sulfates: épisodes IV, V, VI et VII;
- la direction prédominante du vent venant du sud-ouest permettait difficilement de suivre l'évolution à cause d'un manque de stations au nord-est de Noranda: tous les épisodes sauf IX.

Les épisodes IX et X répondaient à l'ensemble des critères de sélection élaborés. De plus, certaines différences entre ces deux épisodes les rendaient intéressants à étudier. En effet, le vent soufflait du nord-est pendant l'épisode IX tandis qu'il provenait du sud-ouest pendant l'épisode X. La quantité de pluie était très abondante pendant l'épisode X tandis que pour l'épisode IX, les quantités se rapprochaient de la normale. En outre, on disposait de mesures de sulfates qui complétaient l'information sur l'influence des émanations de SO_2 sur la qualité des précipitations.

L'étude de la distribution des sulfates dans les précipitations autour de Rouyn-Noranda ne fait pas partie des objectifs initiaux de l'étude entreprise. On a cependant mesuré les sulfates sur les principaux épisodes pluvieux (tableau 4.5) afin, d'une part de vérifier la présence d'une configuration spatiale bien définie pour ce paramètre, d'autre part de faciliter l'interprétation des variations spatiales de pH dans la région grâce aux relations existant entre ces deux paramètres.

On trouve une gamme de variation élevée pour l'ensemble des mesures obtenues (0.9 - 11.7 mg/l). Les valeurs de sulfates pour les épisodes

TABLEAU 4.5: Valeurs de sulfates mesurées aux stations pour certains épisodes pluvieux

STATIONS	EPISODES				
	IV	VII	IX	X	XI
1	7.6	4.0	1.3	3.8	2.3
2	9.4	10.0	4.0	5.8	4.6
3	8.4	6.9	3.2	5.3	3.2
4	8.0	4.0	1.7	4.8	2.1
5	10.3	5.8	1.5	5.3	
6	4.6	6.3	1.0	3.0	2.2
7	5.7	4.6	1.0	4.5	2.0
8	7.7	4.5	7.5	2.8	2.5
9	10.2	5.7	4.3		2.6
10	6.9	4.8	1.0	2.5	2.1
11	6.6	3.8	0.9	2.2	
12	7.4	8.4	1.0	2.0	
13	7.6	6.4	1.0	2.0	2.4
14	7.2	5.5	7.0	4.5	
15	9.0	5.5	4.8	1.6	2.2
16	8.7	5.4	5.3	1.3	2.7
17	9.8	5.3	4.7	1.7	
18	7.5	4.6	3.2	2.2	3.1
19	7.0	6.2	4.4	3.7	
20	8.9		6.2	2.5	1.1
21	11.7		5.5	2.5	2.1
22	9.2	6.2	2.5	2.2	
23	11.0	6.0	2.7	2.0	
24	8.2	7.2	2.9	1.3	2.5
25	8.4	4.8	2.9	1.7	2.4
26	8.6		3.2	1.9	2.3
27	7.2	5.2	4.1	3.1	
28	8.4	7.5	4.2	3.5	
29	6.2	5.6	4.9	3.9	5.0
30	7.8	6.4	4.5	3.7	
31	5.0	6.0	2.2	2.0	1.9
32	7.1	7.2	2.1	2.1	1.4
33	7.2		2.0	1.7	1.6
34	5.8	5.3	1.5	1.6	
35	6.6				

Notes: Les valeurs sont exprimées en mg SO₄/l

IV et VII sont beaucoup plus élevées que pour les épisodes IX, X et XI. Les épisodes IX et X, retenus pour l'étude de la variabilité spatiale, en raison de leur faible niveau de base en sulfates et en acidité, permettent de faire ressortir plus facilement une influence éventuelle des émanations de soufre de l'usine de Noranda sur l'acidité des précipitations ou son contenu en sulfates.

Dans une première étape, on porte sur la carte de la région étudiée les valeurs de sulfates et de pH obtenues pour chacun des deux épisodes pluvieux (figures 4.5 à 4.8). Après avoir décrit les configurations spatiales obtenues dans chacun des cas, on montre la variation de ces deux paramètres en fonction de la distance entre la station de mesure et le point d'émission suivant cinq axes différents (tableaux 4.6 et 4.7, figures 4.9 à 4.12).

L'épisode IX comprend un orage électrique qui a débuté vers 18 heures le 22 juillet et qui s'est prolongé jusque vers minuit. Le vent qui soufflait du nord vers 17 heures avec une vitesse de 11 km/h a changé légèrement de direction en soufflant du NNE à 18 heures, puis du NE à 21 heures.

La configuration spatiale obtenue pour les sulfates lors de l'épisode IX a une structure bien définie (figure 4.5): on distingue deux zones de faibles valeurs au nord et à l'ouest, deux zones de valeurs légèrement plus élevées à l'est et au sud-est et des zones de valeurs plus élevées près de la ville et dans une direction sud-ouest. La zone de valeurs extrêmes est située au sud-ouest de Rouyn à une distance inférieure à 7 km des cheminées.

La distribution spatiale des valeurs de pH mesurées, qui apparaît à la figure 4.7, a une allure différente de celle obtenue pour les sulfates. Les zones de fortes valeurs de sulfates ne correspondent pas aux zones de faibles valeurs de pH. Les variations de pH ont un caractère un peu aléatoire indiquant que des phénomènes non reliés aux rejets de

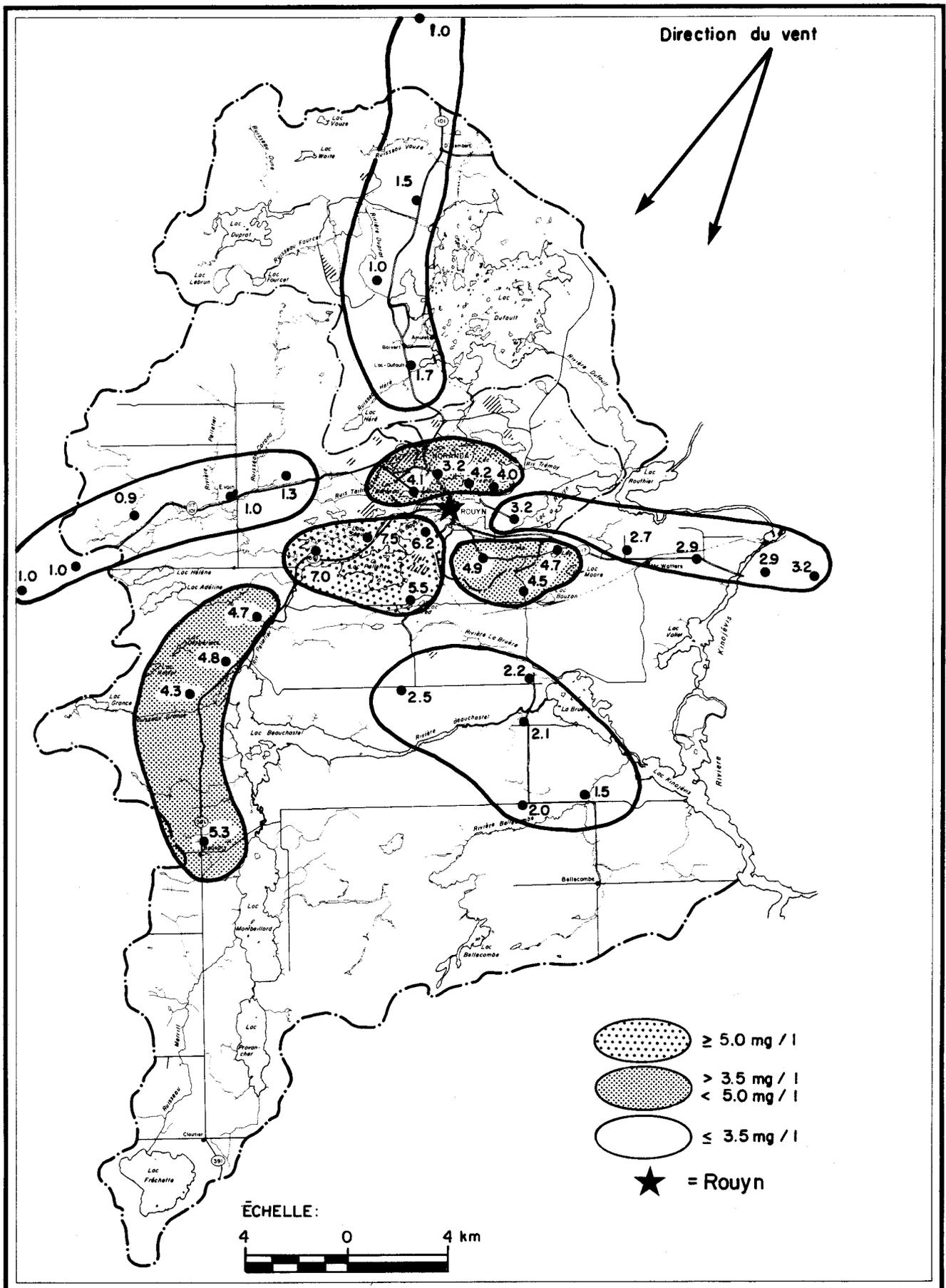


Figure 5 . Distribution spatiale des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode IX.

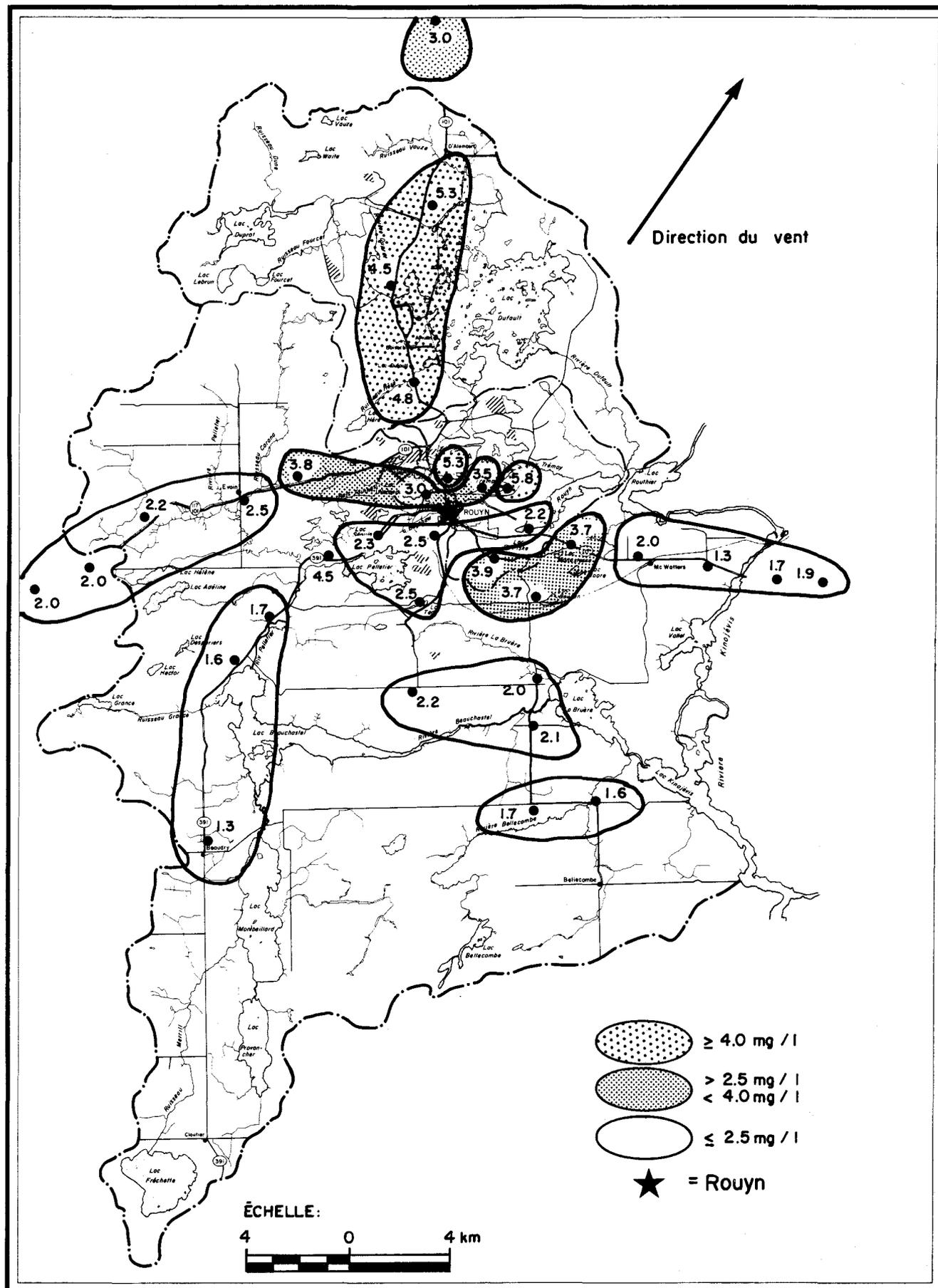


Figure 6 . Distribution spatiale des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode X .

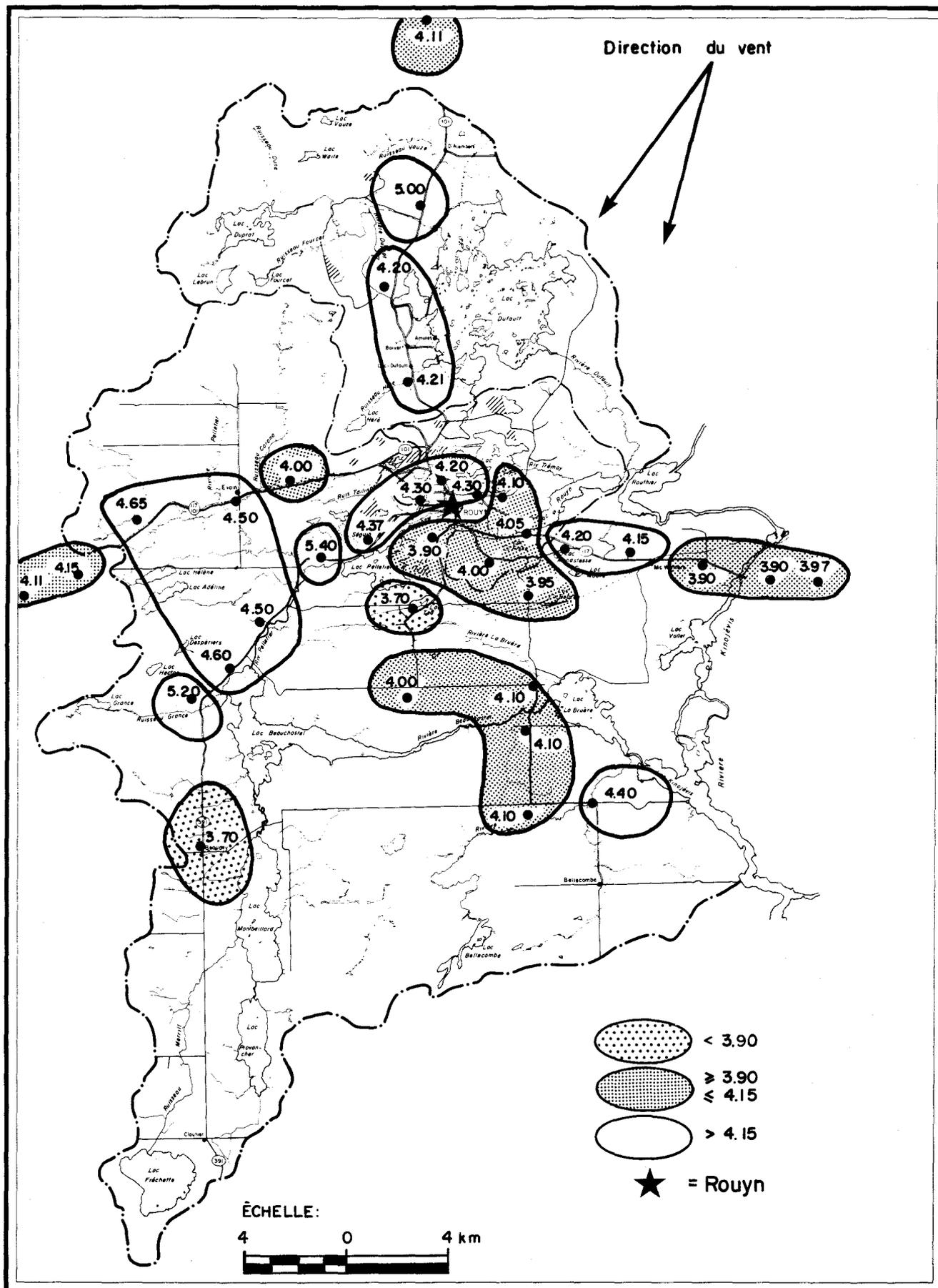


Figure 7 . Distribution spatiale du pH mesurés au cours de l'épisode IX .

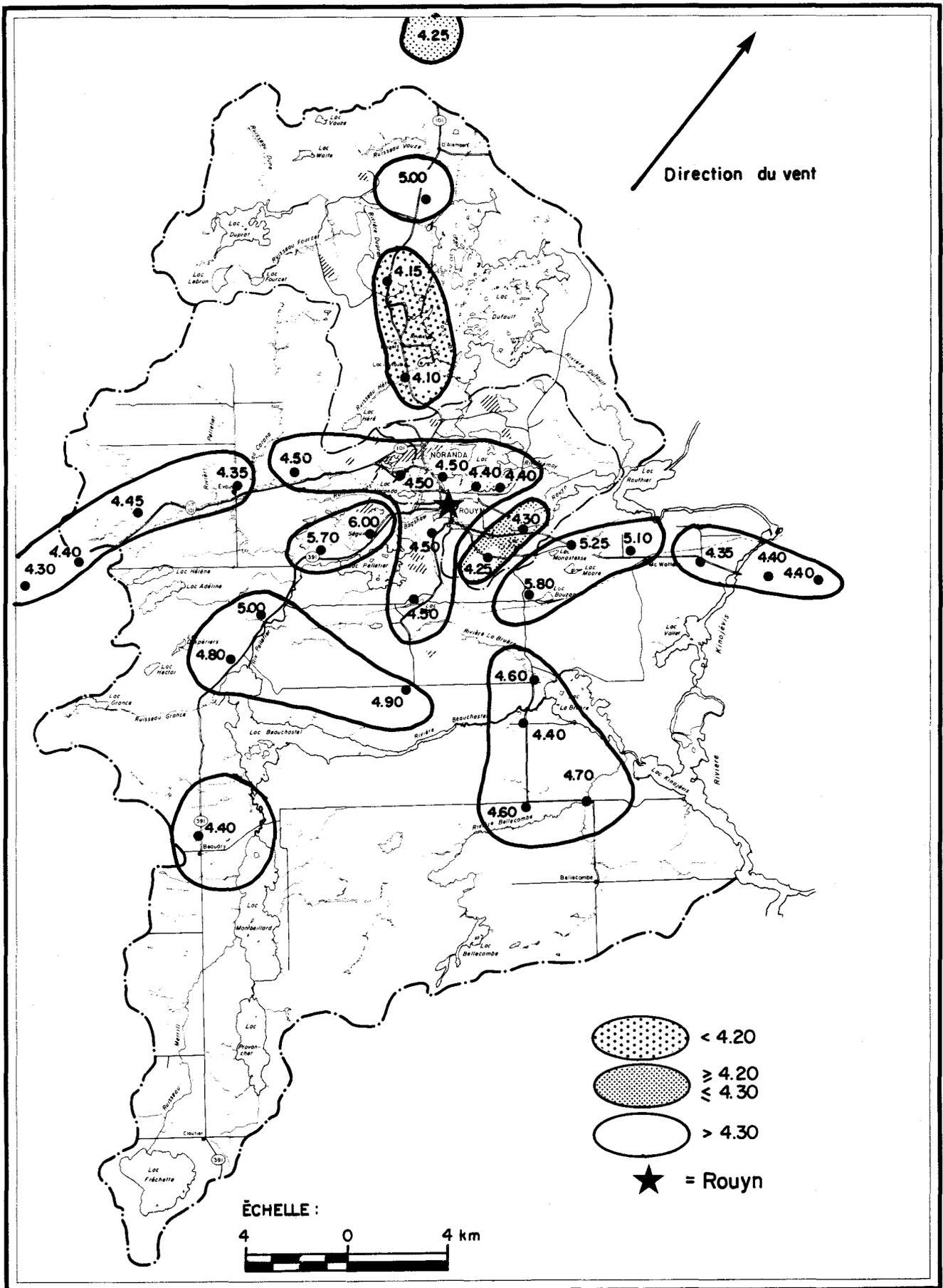


Figure 8 . Distribution spatiale du pH mesurés aux cours de l'épisode X .

TABLEAU 4.6: Variation des concentrations en sulfates et des pH de l'épisode IX en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents

NNW-N			ESE-SE			SSE-S			SW-SSW			WSW-W		
dist. ¹	SO ₄ ¹	pH	dist	SO ₄	pH	dist	SO ₄	pH	dist	SO ₄	pH	dist	SO ₄	pH
3.4	1.7	4.21	1.8	4.2	4.30	1.6	3.2	4.20	1.9	4.1	4.30	6.3	1.3	4.00
7.1	1.0	4.20	2.6	4.0	4.10	3.2	6.2	3.90	4.7	7.5	4.37 ²	8.5	1.0	4.50
9.8	1.5	5.00	4.3	3.2	4.05	4.7	4.9	4.00	6.6	7.0	5.40 ²	12.9	0.9	4.65
15.6	1.0	4.11	5.6	4.4	4.20	6.3	5.5	3.70	8.8	4.7	4.50	15.3	1.0	4.15
			8.4	2.7	4.15	6.8	4.5	3.95	12.2	4.8	4.60 ²	16.7	1.0	4.11
			10.8	2.9	3.90	9.7	2.5	4.00	14.0	4.3	5.20 ²			
			14.0	2.9	3.90	9.8	2.2	4.10	18.2	5.3	3.70			
			16.1	3.2	3.97	11.4	2.1	4.10						
						14.5	2.0	4.10						
						15.0	1.5	4.40						

¹ Les distances sont exprimées en km et les sulfates sont exprimés en mg/l.

² Présence de corps étrangers dans les échantillons.

TABLEAU 4.7: Variation des concentrations en sulfates et des pH de l'épisode X en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents

NNW-N			ESE-SE			SSE-S			SW-SSW			WSW-W		
dist. ¹	SO ₄ ¹	pH	dist	SO ₄	pH	dist	SO ₄	pH	dist	SO ₄	pH	dist	SO ₄	pH
3.4	4.8	4.10	1.8	3.5	4.40	1.6	5.3	4.50	1.9	3.1	4.50	6.3	3.8	4.50
7.1	4.5	4.15	2.6	5.8	4.40	3.2	2.5	4.50	4.7	2.3	6.00 ²	8.5	2.5	4.35
9.8	5.3	5.00 ²	4.3	2.2	4.30	4.7	3.9	4.25	6.6	4.5	5.70 ²	12.9	2.2	4.45
15.6	3.0	4.25	5.6	3.7	5.25 ²	6.3	2.5	4.50	8.8	1.7	5.00	15.3	2.0	4.40
			8.4	2.0	5.10 ²	6.8	3.7	5.80	12.2	1.6	4.80 ²	16.7	2.0	4.30
			10.8	1.3	4.35	9.7	2.2	4.90 ²	14.0	-	-			
			14.0	1.7	4.40	9.8	2.0	4.60	18.2	1.3	4.40			
			16.1	1.9	4.40	11.4	2.1	4.40						
						14.5	1.7	4.60						
						15.0	1.6	4.70 ²						

¹ Les distances sont exprimées en km et les sulfates en mg/l.

² Présence de corps étrangers dans les échantillons.

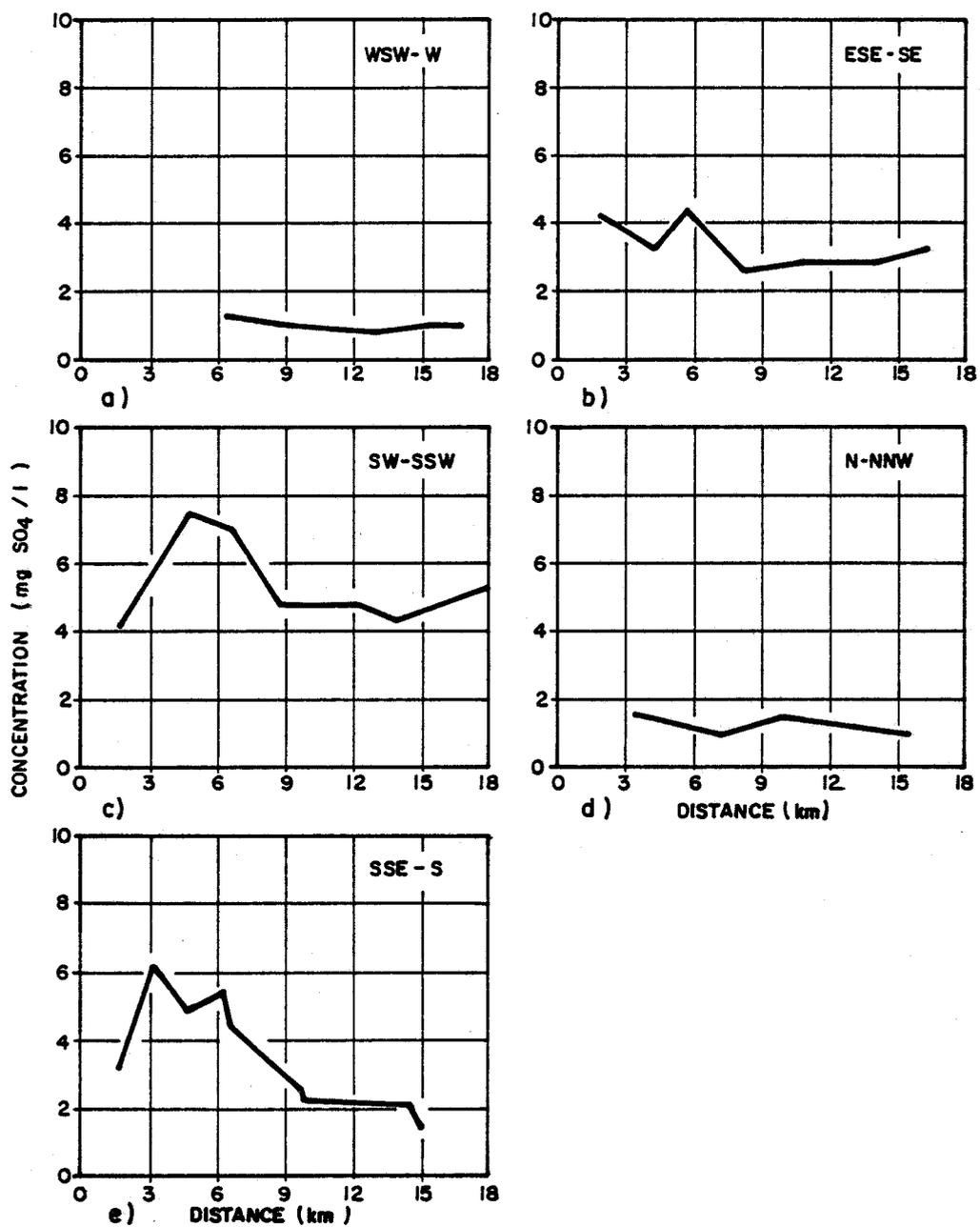


Figure 4.9. Évolution des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode IX en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents.

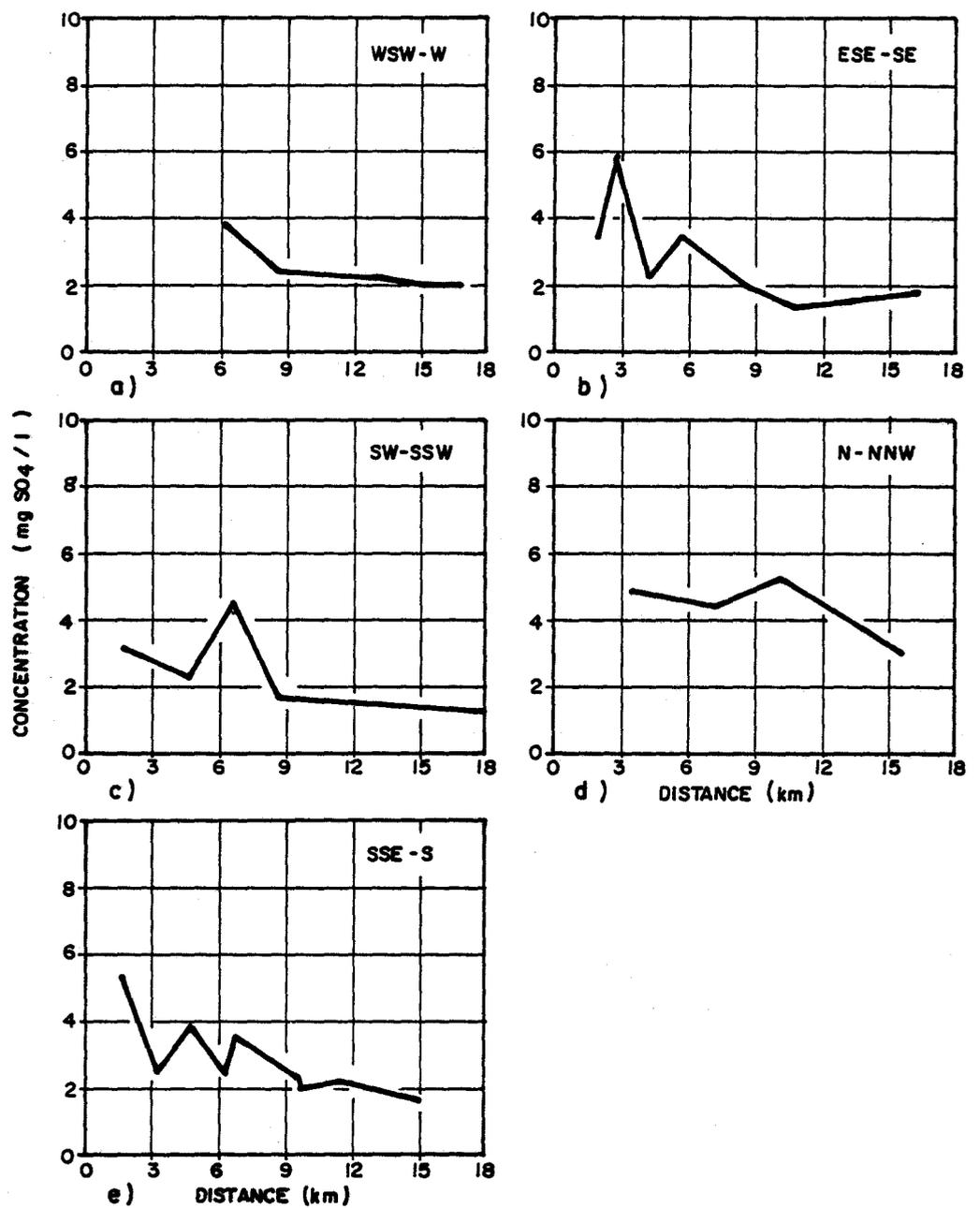


Figure 4.10. Évolution des concentrations en sulfates mesurées au cours de l'épisode \bar{X} en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents.

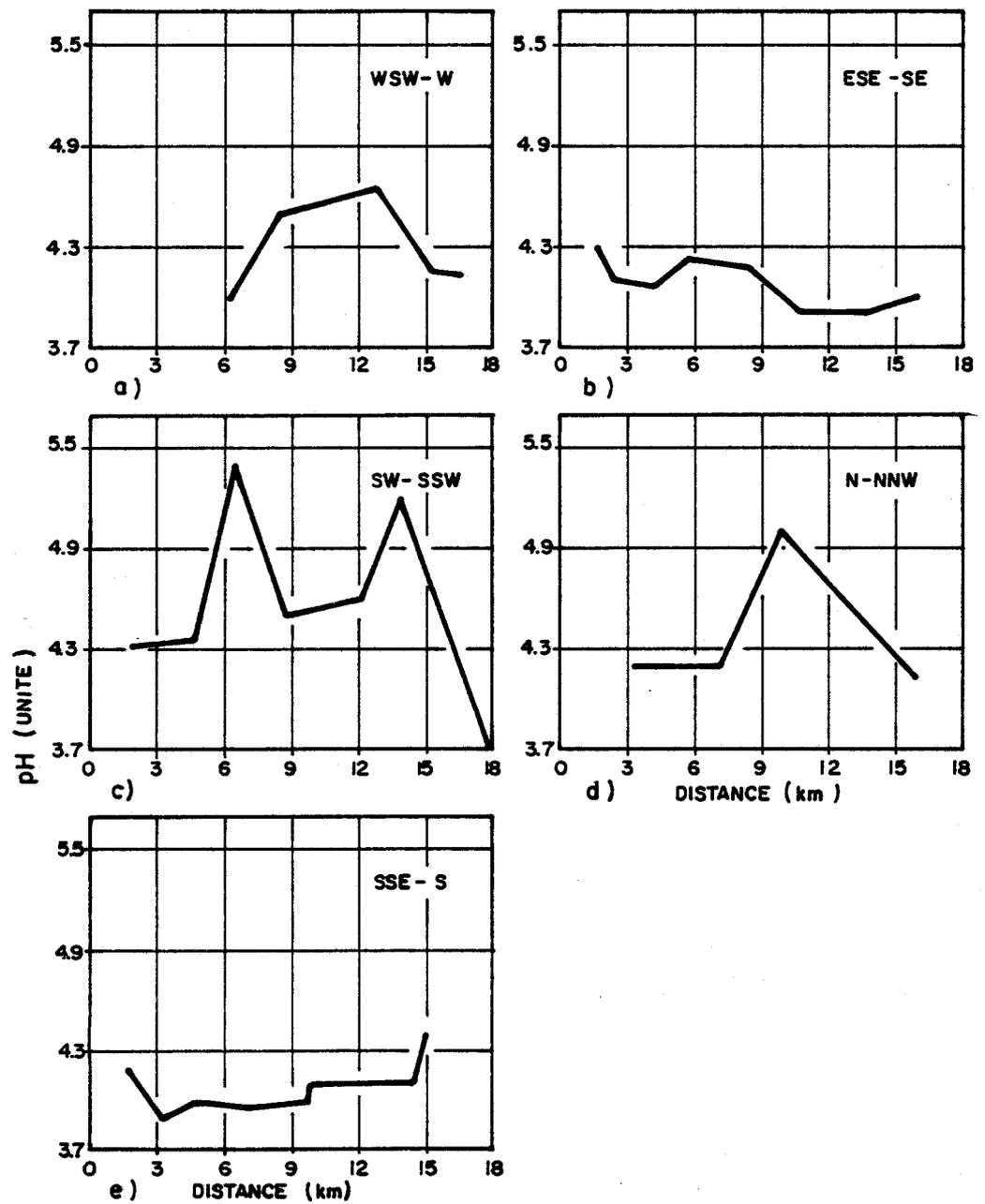


Figure 4.11 . Évolution des pH mesurés au cours de l'épisode IX en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents .

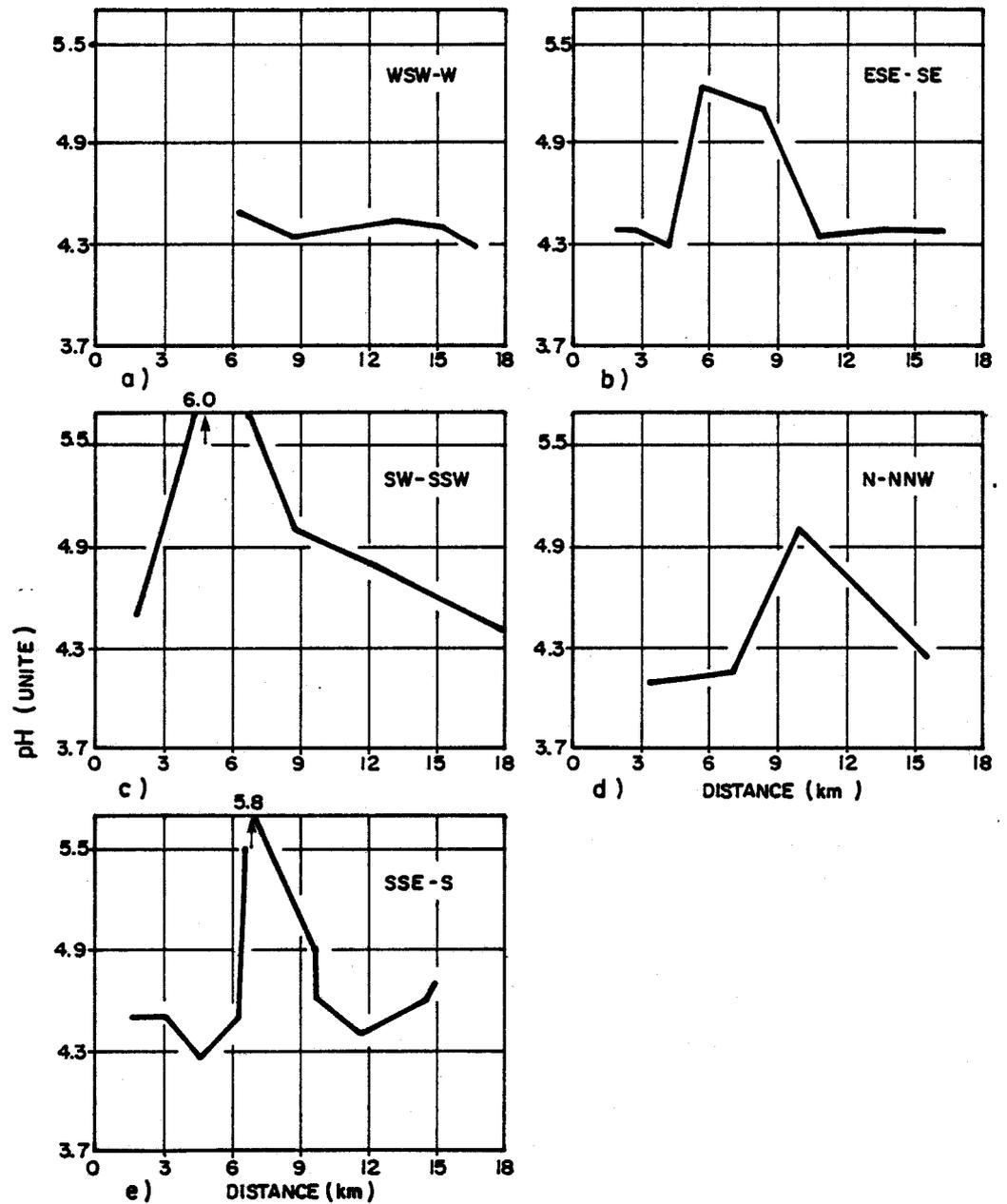


Figure 4.12. Évolution des pH mesurés au cours de l'épisode \bar{X} en fonction de l'éloignement des cheminées, selon cinq axes différents.

soufre sont responsables des principales variations rencontrées à l'échelle de la région étudiée. On note toutefois que les deux valeurs de pH les plus acides (3.70) sont situées au sud-ouest de la ville.

L'épisode X est constitué d'un orage électrique plutôt violent qui a débuté dans la nuit du 26 au 27 juillet. Au cours de cet orage, le vent soufflait presque continuellement du sud-ouest avec une vitesse de 16 à 20 km/h à une altitude de 77 m. La précipitation a été abondante et dépasse 30 mm de hauteur.

En examinant la distribution spatiale des concentrations en sulfates mesurées au cours de cet épisode (figure 4.6), on note la présence de zones de faibles concentrations au sud, à l'est et à l'ouest de la ville et des zones de concentrations plus élevées au nord et dans les environs immédiats de Rouyn-Noranda. L'influence des émanations de SO_2 dans l'atmosphère, transportées par des vents provenant du sud-ouest, explique une fois de plus les zones de variation rencontrées pour les sulfates, même si la quantité de pluie tombée est abondante.

La distribution spatiale des valeurs de pH obtenues pour cet épisode (figure 4.8) montre une plus grande homogénéité des données que pour l'épisode IX en raison d'une plus grande continuité dans les valeurs mesurées d'une station à une autre. Le volume abondant de précipitation recueilli au cours de cet épisode est possiblement responsable de cette homogénéité observée. On a des indications que les rejets de SO_2 dans l'atmosphère contribuent cette fois-ci à une certaine acidification puisque les valeurs de pH les plus faibles se retrouvent au nord.

En fonction de la densité des stations, on a délimité cinq cônes de 45° autour des cheminées; on ne peut délimiter les trois autres cônes à cause de l'absence de stations au nord-est et au nord-ouest (voir section 3.1). On a ensuite porté en graphique les valeurs mesurées dans ces cônes en fonction de l'éloignement des cheminées (tableaux 4.6 et 4.7, figures 4.9 à 4.12). Sur les tableaux 4.6 et 4.7, on indique la présence de corps étrangers dans certains échantillons selon une observation visuelle des observateurs et du technicien qui prenait les mesures. On remarque

ainsi que plusieurs échantillons provenant de stations situées au sud-ouest de Rouyn ont des valeurs de pH douteuses.

Les figures 4.9 et 4.10, qui montrent l'évolution des concentrations en sulfates en fonction des distances à la source dans chacune des directions, font ressortir l'influence du vent sur les niveaux rencontrés. En effet, les concentrations sont plus élevées dans le cône situé dans la direction du vent (figures 4.9c et 4.10d). Indépendamment de la direction du vent, on observe des valeurs élevées à proximité de la source (3 à 6 km) dans presque toutes les directions (figures 4.9b; c; e et 4.10a; b; c; d; e). Cependant, la diminution des concentrations est moins rapide dans les cônes situés dans la direction du vent.

L'évolution des pH en fonction des distances, pour les épisodes IX et X, qui apparaît aux figures 4.11 et 4.12, montre la difficulté de tirer des conclusions sur une influence éventuelle de l'usine de Noranda pour des distances inférieures à 15 km. Au cours de l'épisode IX, la diminution du pH dans le cône de diffusion SW n'est pas apparente, mais une observation visuelle des échantillons lors de la cueillette indique que les mesures de pH obtenues à ces stations sont douteuses, car elles ont probablement été influencées par des contaminations provenant d'excréments d'oiseaux ou d'autres particules en suspension. Pour l'épisode X, le pH apparaît être plus faible dans le cône de diffusion, indiquant une certaine influence des émanations de l'usine de Noranda, malgré un effet de dilution provenant de l'abondance de précipitation qui a tombé au cours de cet épisode.

5. INTERPRETATION DES RESULTATS D'APRES L'ETAT DES
CONNAISSANCES ACTUELLES

5.1 Comparaison des valeurs mesurées avec celles d'autres études

La comparaison des valeurs mesurées d'un site à un autre est toujours difficile à cause des différences rencontrées dans la méthode d'échantillonnage (composés mensuels ou épisodes) et dans le type d'échantillons recueillis (retombées sèches et humides ou humides seulement) qui peuvent changer de façon appréciable les mesures obtenues (Galloway et Likens, 1976).

De plus, la courte période d'observations et les deux populations différentes de valeurs mesurées (figure 4.4) ne justifient pas un calcul de moyenne représentative pour chacune des stations. En effet, pour les épisodes IV à VII, 70% des valeurs mesurées se situent entre 3.6 et 4.0, avec un mode à 3.7, tandis que pour les épisodes VIII à XI, le mode est 4.5 et l'intervalle 4.0 - 4.6 comprend 66% des valeurs. En considérant que les médianes de pH pour chacun des épisodes (tableau 4.4) sont représentatives de la région, on peut utiliser ces valeurs pour calculer un pH moyen régional pour la période considérée. Ce pH moyen est calculé en transformant d'abord les médianes de pH en concentrations en ions hydrogène, puis en calculant une concentration moyenne pondérée par la hauteur de précipitation sur la région, et en transformant ensuite cette concentration moyenne en unité de pH. Le pH moyen calculé sur les épisodes IV à VII, égal à 3.78, est beaucoup plus faible que la valeur 4.18 obtenue pour les épisodes VIII à XI. Sur l'ensemble des épisodes IV à XI, le pH moyen calculé est 3.96.

Le pH moyen obtenu pour les épisodes IV à VII (3.78) est beaucoup plus faible que toutes les valeurs moyennes rapportées dans la littérature, et n'est probablement pas représentatif de la région. La moyenne globale pour les épisodes IV à XI (3.96) est plus représentative et se compare très bien avec les valeurs rapportées par Likens *et al.* (1976) à Hubbard Brook, dans le New-Hampshire, et également avec les valeurs récentes rapportées par Dillon *et al.* (1978) pour le centre-sud de l'Ontario, à environ 350 km au sud de Rouyn-Noranda. Dans cette partie de l'Ontario, le pH moyen, pour 6 stations qui ont recueilli les retombées humides d'un certain nombre d'épisodes pluvieux, se si-

tue entre 3.95 et 4.38. Dillon *et al.* (1978) rapportent également des mesures de pH à six stations situées dans la région de Sudbury. Dans cette région, le pH moyen à chacune des stations se situe entre 4.20 et 4.54 indiquant que la région de Sudbury ne serait pas aussi acide que celle de Rouyn-Noranda.

Il apparaît donc, à partir des mesures de pH rapportées par Cogbill (1976) en 1972-73 pour le nord-est des Etats-Unis, que la région de Rouyn-Noranda serait le prolongement ou l'agrandissement récent de la zone d'acidité identifiée dans cette partie des Etats-Unis et dont le centre se trouverait en Nouvelle-Angleterre. Les valeurs d'acidité sont égales ou même supérieures à celles observées ailleurs, particulièrement en Scandinavie et en Nouvelle-Angleterre. Un réseau de mesures installé à l'échelle du Québec permettrait de vérifier ou confirmer cette constatation.

5.2 Sources ponctuelles de soufre

Les influences des rejets de soufre par les fonderies ou les centrales thermiques sur l'acidité des précipitations ont fait l'objet d'études depuis quelques années (Li et Landsberg, 1974; Larson *et al.*, 1975; Granat et Rodhe, 1973; Hales *et al.*, 1971).

La distance où se produiraient les retombées maximales de soufre et d'acidité serait dépendante des conditions de vent et de la hauteur des cheminées. Li et Landsberg (1974), étudiant la distribution de la concentration en ions hydrogène des précipitations autour d'une centrale thermique dans le Maryland (deux cheminées de 122 m de hauteur), ont montré, par temps calme, une diminution rapide de l'acidité à l'intérieur de 5 km de la source de soufre. Larson *et al.* (1975), au moyen d'un réseau de 43 stations situées entre 1 et 80 km d'une source de soufre provenant d'une fonderie de cuivre près de Seattle, dans l'état de Washington, ont observé, dans une précipitation, un maximum de concentration en acidité et en sulfates situé à des distances entre 20 et 40 km sous l'influence de vents violents.

De façon générale, tous les travaux rapportés ici ont fait ressortir une augmentation plus ou moins apparente des concentrations en sulfates et en acidité dans les précipitations qui tombent dans la zone située sous le cône d'émanation des cheminées. La portée des retombées et le temps de séjour du soufre émis par les sources de SO_2 font l'objet de controverses (Bolin et Granat, 1973). D'après les travaux de Högström (1974), 50 à 100% du soufre émis par la ville d'Uppsala, en Suède, retombe à l'intérieur de 100 km de la source. Les résultats de ces travaux sont cependant en contradiction avec ceux de Granat et Rodhe (1973) et ceux basés sur les études de trajectoire de particules sur le continent européen (Anonyme, 1971; Oden, 1976).

Granat et Rodhe (1973) ont étudié les retombées de soufre d'une centrale thermique située à Stenungsund, en Suède. Cette centrale thermique a une cheminée de 85 m de hauteur. A partir des données fournies par un réseau de 80 stations situées sur deux cercles de 5 et 15 km de rayon, ils ont calculé qu'à peine 5% du soufre émis par les cheminées retombait à l'intérieur de 15 km de la source. Bolin et Granat (1973), commentant les travaux de Högström (1974), ont fait ressortir la difficulté de comparer les retombées de SO_2 provenant d'une haute cheminée avec celles émises par un ensemble de sources localisées dans une ville et situées à des niveaux beaucoup plus bas. Les retombées en provenance de deux cheminées aussi hautes que celles de l'usine de Noranda (160 et 130 m de hauteur) ont probablement une portée encore plus grande que l'échelle de l'étude.

Tous ces travaux indiquent l'état des connaissances actuelles concernant les influences des rejets de soufre sur l'augmentation de l'acidité des précipitations à une échelle locale (inférieure à 50 km). Il faut ajouter que les mécanismes de transformations chimiques du SO_2 en H_2SO_4 dans l'atmosphère sont complexes et font encore l'objet de recherches.

L'examen des zones de variabilité pour les concentrations en sulfates autour de Rouyn-Noranda, pour les épisodes IX et X (figures 4.5 et 4.6), montre un maximum de concentration pour les sulfates à quelques km de la

source de SO_2 dans la direction du cône d'émanation. A cause de la faible étendue du réseau actuel, on ne peut déterminer la distance maximum de portée où on observe une augmentation des concentrations en sulfates, mais si on transpose les résultats de Granat et Rodhe (1973), une faible partie du soufre émis retombe à l'intérieur de la zone étudiée.

L'interprétation des zones de variabilité pour les pH est plus complexe et nécessite préalablement la prise en compte de considérations sur les processus de neutralisation de l'acidité des précipitations.

5.3 Substances neutralisantes dans les précipitations

L'acidité des précipitations est contrôlée dans certaines régions par la présence de substances neutralisantes en circulation à une échelle régionale ou à une échelle globale. Winkler (1976), à partir de la distribution spatiale des valeurs de pH à l'échelle des Etats-Unis, explique que les poussières alcalines en circulation dans l'ouest, dans le sud et dans le centre des Etats-Unis, contrôlent en grande partie le pH des précipitations. Dans ces parties des Etats-Unis, le pH se situe entre 6.0 et 7.0 (Likens, 1976). Par contre, dans le nord-est des Etats-Unis, la présence en abondance de roches cristallines et de forêts ne favorisent par la neutralisation du pH des précipitations à cause de l'absence de ces poussières en circulation.

A une échelle plus réduite, on observe une certaine influence des types de sol sur l'acidité de la pluie. Dillon *et al.* (1978), en Ontario observent que le pH est plus élevé aux stations situées à proximité d'une région dominée par la présence de roches carbonatées qu'aux stations situées sur le Bouclier canadien qui comprend plutôt des roches ignées peu altérables.

Sur le bassin de la rivière Yamaska, Lachance *et al.* (1976) ont observé que les fortes valeurs d'acidité se retrouvaient plutôt dans la partie sud du bassin dominée par la présence de forêt plus abondante et de roches peu altérables. Dans la partie nord du bassin comprise dans la

région dite des basses-terres du Saint-Laurent, les valeurs de pH étaient plus élevées et explicables par des poussières alcalines en circulation.

Likens et Bormann (1974) soutiennent que l'augmentation avec les années de la combustion des hydrocarbures aux dépens du charbon, ainsi que l'augmentation grandissante du nombre de cheminées de plus en plus hautes et l'installation de dispositifs pour précipiter et réduire par conséquent les émissions de grosses particules, ont une incidence sur l'augmentation de l'acidité des eaux atmosphériques. En effet, de plus grandes quantités de SO_2 sont rejetées dans l'air et la dispersion de ces gaz s'étend sur de plus vastes distances sans la présence des grosses particules qui favoriseraient une précipitation du soufre à proximité de la source et qui contiendraient des sels qui neutraliseraient en grande partie l'acidité de la précipitation. Ces chercheurs fondent leur argumentation principale sur des mesures de fortes concentration de soufre dans les précipitations dans l'état de New York, avant les années 1950, alors que le charbon et le bois étaient les principaux combustibles. Le remplacement de ces produits de combustion par le gaz naturel coïncide avec l'augmentation de l'acidité des précipitations.

A proximité des centres urbains, le pH est souvent plus élevé que dans les centres ruraux (Moss, 1975; Högström, 1974). Dans une région du Maine caractérisée par des précipitations acides (pH 3.8 - 5.0), Boyce et Butcher (1976) ont observé des valeurs de pH entre 5.5 et 7.0 dans la région immédiate d'une usine de pâte et papier. Les résultats de ces travaux indiquaient une influence de cette source neutralisante jusqu'à une distance de 20 km. La présence de particules neutralisantes dans les substances émises par cette usine était responsable de la neutralisation partielle des précipitations dans cette partie de la région.

Moss (1975) a comparé des valeurs de pH et de sulfates recueillies dans deux centres urbains, Sheffield, en Grande-Bretagne, et Welland, en Ontario. Les résultats obtenus dans ces deux cas ont montré que le pH était plus élevé dans les parties urbaines et commerciales que dans les régions rurales.

Egalement, Högström (1974) a constaté que les retombées en ions hydrogène étaient minimales à une quinzaine de km de la ville d'Uppsala et qu'elles devenaient ensuite très élevées à des distances de 40 km et plus. Cette neutralisation de l'acidité dans le voisinage immédiat de la source était expliquée par la présence de poussières alcalines en circulation à une échelle locale.

5.4 Distribution spatiale des pH mesurés

A la lumière des connaissances obtenues à partir des travaux rapportés dans la littérature, on peut tenter d'apporter quelques explications sur les zones de variabilité du pH des précipitations dans la région de Rouyn-Noranda.

En examinant la distribution spatiale des pH pour l'épisode X (voir figure 4.8), on voit une diminution apparente des valeurs de pH dans la partie nord de la région qui reçoit une partie du cône d'émanation. Cette observation démontre que les émanations de SO_2 contribuent, à un certain point, à augmenter de façon locale l'acidité des précipitations. Les valeurs de pH plus élevées dans des zones situées autour de la ville peuvent être expliquées par une neutralisation partielle des précipitations par les poussières en circulation. Les valeurs de pH plus faibles à l'est et à l'ouest confirmeraient les observations de Moss (1975) et Högström (1974) à savoir que le pH est plus acide dans les régions rurales que dans les régions urbaines.

La distribution spatiale des pH pour l'épisode IX montre une configuration spatiale plus complexe (voir figure 4.7). Si on tient compte que plusieurs échantillons provenant de la partie sud-ouest sont rapportés contaminés (tableau 4.6) et que les deux valeurs de pH les plus acides (pH = 3.7) sont observées en partie dans la direction du cône d'émanation, on peut affirmer qu'il existe une certaine influence des émanations de SO_2 sur l'acidification des pluies. Les fortes valeurs de pH autour de la

ville s'expliquent en partie par la neutralisation de l'acidité des pluies par des poussières locales en circulation autour de la ville et par une neutralisation des échantillons par des poussières plus ou moins alcalines et des corps étrangers qui se sont accumulés à la surface des collecteurs suite à une absence de pluie dans les 8 jours précédents. Comme pour l'épisode X, on observe encore des pH plus faibles dans les zones rurales et forestières à l'est et à l'ouest de la ville que près de la ville.

Il ressort de cette étude que l'augmentation de l'acidité des précipitations autour de Rouyn-Noranda, suite aux émissions de SO_2 par l'usine de Noranda, est compensée en grande partie par la neutralisation provenant d'une circulation régionale de poussières alcalines. La grandeur du réseau actuel (rayon de 20 km) ne permet pas de connaître l'étendue et la portée de l'influence des émanations de soufre de l'usine de Noranda sur l'acidité des précipitations en général. Cependant, puisque seulement une partie du soufre retomberait à l'intérieur d'une zone d'un rayon de 15 km (Granat et Rodhe, 1973), il est logique de croire que ces émissions de soufre s'ajoutent à d'autres sources existant dans d'autres régions (Sudbury, par exemple) et contribuent à augmenter l'acidification des précipitations à des distances considérables (peut-être supérieures à 1000 km). Les valeurs de pH observées en Ontario, au Québec et aux Etats-Unis montrent que le nord-ouest Québécois fait partie d'une zone de précipitation déjà très acide. A l'intérieur de cette grande zone d'acidité, il existerait des sous-zones de précipitation moins acides influencées par une circulation locale de poussières plus ou moins neutralisantes. Les émissions de SO_2 de l'usine de Noranda auraient donc une influence importante sur l'acidité des précipitations à des distances plus grandes que celles considérées dans cette étude. Un réseau installé à une échelle plus vaste et fournissant des données fiables permettrait de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses.

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les principales conclusions de cette étude sont résumées dans les lignes qui suivent:

- des sources importantes de soufre ont été identifiées dans la partie du Canada incluant l'est de l'Ontario et le nord-est du Québec. L'usine de Noranda, la seconde source en importance au Canada, émet plus de 700,000 tonnes SO_2 /année et contribue à 10% des émissions totales anthropiques au Canada;
- les plus faibles valeurs de pH rencontrées en Europe et en Amérique se retrouvent dans les régions où se trouvent les sources les plus abondantes de soufre;
- on a observé depuis une dizaine d'années une augmentation de l'acidité des précipitations dans le nord-est des Etats-Unis. Les régions où le pH est inférieur à 5.0 couvrent presque tout l'est des Etats-Unis;
- le sud du Québec, le sud de l'Ontario et une partie des provinces maritimes sont le prolongement de cette zone d'acidité qui couvre l'est des Etats-Unis;
- le pH mesuré autour de Rouyn-Noranda (pH moyen = 3.96) est aussi faible que les valeurs rapportées en Scandinavie et en Nouvelle-Angleterre. Au cours de 4 épisodes pluvieux consécutifs, 70% des valeurs de pH se situaient entre 3.6 et 4.0 avec un mode à 3.7;
- il existe des variations importantes dans le pH des précipitations au cours du même mois. Au cours du mois de juillet 1978, les concentrations en ions hydrogène de 4 épisodes pluvieux consécutifs étaient 6.3 fois plus élevées que celles des 4 épisodes suivants;
- les rejets de SO_2 par l'usine de Noranda sont responsables de l'augmentation des concentrations en sulfates dans les précipitations autour de la ville de Rouyn-Noranda et dans la zone influencée par le cône d'émanation des cheminées, avec un maximum atteint à quel-

ques km de la source;

- on observe une légère augmentation de l'acidité dans la zone vers laquelle se dirige le cône d'émanation des cheminées;
- le pH des précipitations dans la ville est plus élevé que les parties rurales situées à plus de 10 km de la ville;
- les poussières locales en circulation dans la région de Rouyn-Noranda dues aux activités urbaines et commerciales compensent en grande partie par neutralisation l'augmentation de l'acidité des précipitations à proximité de la ville;
- les retombées de soufre auraient une influence sur l'acidification des précipitations à des distances beaucoup plus considérables que 15 km parce qu'une faible partie du soufre émis retombe à l'intérieur de cette distance;
- les émissions de SO_2 par l'usine de Noranda s'ajoutent à celles déjà très importantes existant en Ontario et aux Etats-Unis et contribuent à une augmentation encore plus grande de l'acidité des précipitations dans des régions éloignées au nord et au nord-est;
- les effets de l'acidification des précipitations sont très néfastes sur les écosystèmes dont les sols sont pauvres en réserves minérales basiques. Les lacs peu tamponnés qu'on retrouve habituellement dans ces régions sont susceptibles d'être acidifiés à des pH inférieurs à 5.

Devant le problème de l'augmentation de l'acidité des précipitations et les controverses existant sur l'origine et les mécanismes de formation de cette acidité, il est recommandé:

- qu'un réseau d'étude de la qualité des précipitations soit installé à une échelle beaucoup plus vaste (et même à l'échelle du Québec) afin de connaître l'étendue et l'importance de l'acidité des précipitations;

- que les stations recueillent seulement les retombées humides. A cette fin, on pourrait utiliser des collecteurs automatiques munies de détecteur de pluie (Galloway et Likens, 1976) afin de s'assurer d'une meilleure fiabilité des données;
- que les échantillons proviennent d'épisodes pluvieux et que des mesures d'intensité de pluie soient prises parallèlement avec un pluviographe;
- que la période de temps pour l'étude soit suffisamment longue pour obtenir un nombre représentatif d'épisodes pluvieux permettant d'atteindre une bonne précision dans les moyennes obtenues à chaque station;
- que la mesure du pH soit accompagnée par la mesure des sulfates et des nitrates à cause de leur importance dans l'acidité des précipitations;
- que l'ensemble des ions majeurs et certains métaux traces soient mesurés autant que possible afin d'identifier les sources de pollution et les mécanismes de formation de l'acidité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAHAMSEN. (1976).

Acid precipitation - effect on forest ecosystems. Geol. Bull. (Stockholm), 21: 79-86.

ANLAUF, K.G., H.A. WIEBE et R.D.S. STEVENS. (1976).

Some measurements of air quality and precipitation in Saint-John, N.B. Water, Air and Soil Pollution, 5: 507-514.

ANONYME. (1971).

Air Pollution across national boundaries. The impact on the environment of sulphur in air and precipitation (ed. B. Bolin). Sweden's case study for the United Nations conference on the human environment. Stockholm.

ANONYME. (1972).

Sulphur pollution across national boundaries. Ambio, 1(1): 15-20.

BARRETT, E. et G. BRODIN. (1955).

The acidity of Scandinavian precipitation. Tellus, 7(2): 251-257.

BEAMISH, R.J. et H.H. HARVEY. (1972).

Acidification of the La Cloche Mountain lakes, Ontario and resulting fish mortalities. J. Fish. Res. Board Can., 29: 1131-1143.

BEAMISH, J.R. (1976).

Acidification of lakes in Canada by acid precipitation and the resulting effects on fishes. Water, Air and Soil Pollution, 6: 501-514.

BOLIN, B. et L. GRANAT. (1973).

Local fallout and long-distance transport of sulfur. Ambio, 2(3): 87-91.

BOYCE, S.D. et S.S. BUTCHER. (1976).

The effect of a local source on the composition of precipitation in south-central Maine. Water, Air and Soil Pollution, 6: 375-384.

BROSSET, C. (1973).

Air-borne acid. Ambio, 2(1-2): 2-9.

COGBILL, C.V. (1976).

The history and character of acid precipitation in eastern North America. *Water, Air and Soil Pollution*, 6: 407-413.

COGBILL, C.V. et G.E. LIKENS. (1974).

Acid precipitation in the northeastern United States. *Water Res.*, 10(6): 1133-1141.

DICKSON, W. (1975).

The acidification of Swedish lakes. *Inst. Freshwater Res. Drottningholm*, rep. 54: 8-20.

DILLON, P.J., D.S. JEFFRIES, W. SNYDER, R. REID, N.D. YAU, D. EVANS, J. MOSS, et W.A. SCHEIDER. (1978).

Acidic precipitation in south central Ontario: recent observations. *J. Fish Res. Board Can.*, 35: 809-815.

ENVIRONNEMENT CANADA. (1973).

A nationwide inventory of air pollutant emissions. Report EPS 3-AP-73-2. Environmental Protection Service, 123 p. Ottawa.

FROHLIGER, J.O. et R. KANE. (1975).

Precipitation: its acidic nature. *Science*, 189: 455-457.

GALLOWAY, J.N., G.E. LIKENS et E.S. EDGERTON. (1976a).

Acid precipitation in the northeastern United States: pH and acidity. *Science*, 194: 722-724.

GALLOWAY, J.N., G.E. LIKENS et E.S. EDGERTON. (1976b).

Hydrogen ion speciation in the acid precipitation of the northeastern United States. *Water, Air and Soil Pollution*, 6: 423-433.

GALLOWAY, J.N. et G.E. LIKENS. (1976).

Calibration of collection procedures for the determination of precipitation chemistry. *Water, Air and Soil Pollution*, 6: 241-258.

GAMBELL, A.W. et D.W. FISHER. (1966).

Chemical composition of rainfall in eastern North Carolina and southern Virginia. Geol. Surv. Water Supply Paper 1535-K, 41 p.

GATZ, D.F. (1976).

Comment on "acid precipitation in the northeastern United States" by Charles V. Cogbill and Gene E. Likens. Water Res. Res., 12(3): 569-570.

GORHAM, E. (1976).

Acid precipitation and its influence upon aquatic ecosystems - an overview. Water, Air and Soil Pollution, 6: 457-481.

GRANAT, L. et H. RODHE. (1973).

A study of fallout by precipitation around an oil-fired power plant. Atmospheric Environment, 7(8): 781-792.

HALES, J.M., J.M. THORP et M.A. WOLF. (1971).

Final report on field investigation of sulfur dioxide washout from the plume of a large coal-fired power plant by natural precipitation. Battelle Memorial Institute.

HALES, J.M., J.M. THORP et M.A. WOLF. (1970).

Washout of SO_2 from the plume of a coal-fired power plant. Precipitation Scavenging (1970). Proc. Symp. Richland, Wash. 2-4 juin: 293-302.

HOGSTROM, J. (1973).

Residence time of sulfurous air pollutants from a local source during precipitation. Ambio, 2(1-2): 37-41.

HOGSTROM, J. (1974).

Wet fallout of sulfurous pollutants emitted from a city during rain or snow. Atmospheric Environment, 8: 1291-1303.

HUTCHINSON, T.C. et L.M. WHITBY. (1977).

The effects of acid rainfall and heavy metal particulates on a boreal forest ecosystem near the Sudbury smelting region of Canada. *Water, Air and Soil Pollution*, 7: 421-438.

JUNGE, C.E. et R.T. WERBY. (1958).

The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulfate in rain water over the United States. *Journal of Meteorology*, 15: 417-425.

JUNGE, C.E. (1958).

The distribution of ammonia and nitrate in rain water over the United States. *Trans. Am. Geophys. Union*, 39: 241-248.

JUNGE, C.E. (1963).

Air chemistry and radioactivity. Academic Press, New-York and London.

LACHANCE, M. et J.L. SASSEVILLE. (1976).

Etude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Volume 4: secteur des eaux atmosphériques. INRS-Eau, rapport scientifique No 54, 50 p.

LACHANCE, M., G. MORIN et J.L. SASSEVILLE. (1977).

Approche rationnelle à l'étude de la qualité des précipitations sur un bassin. INRS-Eau, rapport scientifique No 80, 118 p. 4 annexes.

LARSON, T.V., R.J. CHARLSON, E. KNUDSON, G.D. CHRISTIAN et H. HARRISON. (1975).

The influence of a sulfur dioxide point source on the rain chemistry of a single storm in the Puget Sound region. *Water, Air and Soil Pollution*, 4: 319-328.

LI, TA-YUNG et H.E. LANDSBERG. (1974).

Rainwater pH close to a major power plant. *Atmospheric Environment*, 9: 81-88.

LIKENS, G.E., F.H. BORMANN et N.M. JOHNSON. (1972).
Acid rain. Environment, 14(2): 33-40.

LIKENS, G.E., N.M. JOHNSON, J.N. GALLOWAY et F.H. BORMANN. (1976).
Acid precipitation: Strong and weak acids. Science, 194: 643-645.

LIKENS, G.E. et F.H. BORMANN. (1974).
Acid rain: A serious regional environmental problem. Science, 184(4142):
1176-1179.

LIKENS, G.E., F.H. BORMANN, J.S. EATON, R.S. PIERCE et N.M. JOHNSON. (1976).
Hydrogen ion input to the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire
during the last decade. Water, Air, and Soil Pollution, 6: 435-445.

LIKENS, G.E. (1976).
Acid precipitation. Chem. Eng. News, 54(48): 29-44.

LODGE, J.P. Jr., K.C. HILL, J.B. PATE, E. LORANGE, W. BASBERGILL, A.L. LAZ-
RUS et G.S. SWANSON. (1968).
Chemistry of United States precipitation. Final report on the national
precipitation sampling network. Laboratory of Atmospheric sciences, Na-
tional center for atmospheric Res. Boulder, Colorado, 66 p.

MOSS, M.R. (1975).
Spatial patterns of precipitation reaction. Environ. Pollut., 8: 301-315.

ODEN, S. (1976).
The acidity problem - an outline of concepts. Water, Air and Soil Pol-
lution, 6: 137-166.

PEARSON, F.J. Jr. et D.W. FISHER. (1971).
Chemical composition of precipitation in the northeastern United States.
Geol. Surv. Water Supply Paper 1535-P, 23 p.

RASMUSSEN, K.H., M. TAHERI et R.L. KABEL. (1975).

Global emissions and natural processes for removal of gaseous pollutants. Water, Air and Soil Pollution, 4: 33-64.

SCHOFIELD, C.L. (1976).

Acid precipitation. Effects on fish. Ambio, 5(5-6): 228-230.

SUMMERS, P.W. et D.M. WHELPDALE. (1976).

Acid precipitation in Canada. Water, Air and Soil Pollution, 6: 447-455.

WINKLER, E.M. (1976).

Natural dust and acid rain. Water, Air and Soil Pollution, 6: 295-302.

WOOD, T. et F.M. BORMANN. (1974).

The effect of an artificial acid mist upon the growth of *Betula Alleghaniensis* Britt. Environ. Pollut., 7: 259-268.

WRIGHT, R.F. et E.T. GJESSING. (1976).

Acid precipitation: changes in the chemical composition of lakes. Ambio, 5(5-6): 219-223.