

**Zeitschrift:** Archives des sciences [1948-1980]  
**Herausgeber:** Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève  
**Band:** 29 (1976)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Importance des apports atmosphériques dans le bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne  
**Autor:** Haubert, Michel  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-739679>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 24.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# IMPORTANCE DES APPORTS ATMOSPHÉRIQUES DANS LE BILAN HYDROCHIMIQUE D'UN BASSIN VERSANT DE MOYENNE MONTAGNE

PAR

Michel HAUBERT <sup>1</sup>

---

## INTRODUCTION

L'air contient une quantité considérable de substances. Un certain nombre d'entre elles reste dans la circulation atmosphérique sous l'action des vents, parce qu'elles sont volatiles ou en particules trop petites pour retomber sur le sol: elles forment des aérosols. Quand elles sont plus grossières, elles sont ramenées au sol sous l'action de leur poids: ce sont les poussières atmosphériques, le « dryfallout » des auteurs américains. Les constituants volatils, ou les particules très fines peuvent être ramenés au sol sous l'action de la pluie qui les dissout ou les alourdit en les mouillant.

L'étude des apports par les précipitations intéresse les auteurs depuis déjà de nombreuses années. Ainsi, CLARKE, en 1924, publie une étude qui rassemble toutes les données obtenues pendant la période 1880-1920. Ce n'est que beaucoup plus tard qu'on accorde un plus grand intérêt à la chimie des précipitations, et surtout à l'origine des éléments qu'elles contiennent, spécialement en Europe du Nord, aux Etats-Unis et en U.R.S.S. En 1955, EGNER et ERICKSSON publient les résultats obtenus dans les pays scandinaves. ERICKSSON, en 1955 et 1960, à partir de la composition des pluies, estime l'importance de l'origine océanique de certains éléments apportés par les précipitations. Les apports océaniques sont, sur la Scandinavie, à l'origine de 1 t/km<sup>2</sup>/an de chlorures et de 3 t/km<sup>2</sup>/an de sulfates.

GORHAM, en 1955, observe dans les précipitations mesurées à 50 km de la mer, en Grande-Bretagne, que les rapports Na/Cl et Mg/Cl sont les mêmes que dans l'eau de mer. Une étude très importante est celle de JUNGE et GUSTAFSON en 1957 qui porte sur 60 stations de mesures réparties sur l'ensemble des Etats-Unis. Une étude similaire est publiée l'année suivante par JUNGE et WERBY. Ils montrent que l'influence océanique décroît très vite lorsque l'on s'éloigne de la mer: ainsi, la teneur

---

<sup>1</sup> Ingénieur au Laboratoire Central d'Hydraulique de France — 94 Maisons-Alfort.

TABLEAU 1  
Analyses moyennes d'apports atmosphériques (en mg/l) sur différents continents

| Lieu de mesure                                 | Période d'étude | Concentration en mg/l |       |       |       |      |                    | Auteur et date               |
|--|-----------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|--------------------|------------------------------|
|  |                 | Ca++                  | Mg++  | Na+   | K+    | Cl-  | SO <sub>4</sub> -- | NO <sub>3</sub> --<br>mg N/l |
| Moyenne pour les Etats-Unis                    | —               | 1,5                   | —     | 0,40  | 0,20  | 0,30 | 2,15               | —                            |
| Moyenne pour l'Europe                          | —               | 1,42                  | 0,39  | 2,05  | 0,35  | 3,47 | 2,19               | 0,27                         |
| Océan Pacifique                                | 1961            | 1,9                   | —     | 28    | 1,8   | 51   | 11                 | —                            |
| Caroline du Nord et Virginie                   | 1962-1963       | 0,65                  | 0,14  | 0,56  | 0,11  | 0,57 | 2,18               | 0,62                         |
| Mojave Desert ( <i>Californie</i> )            | 1965-1966       | 35                    | 4,5   | 132   | 18    | 90   | 108                | 0,3                          |
| Bassin versant d'Alrance<br>( <i>Aveyron</i> ) | —               | 0,35                  | 0,036 | 0,25  | 0,17  | 0,50 | 1,5                | —                            |
| Nord-Est des Etats-Unis                        | 1962-1963       | 0,7                   | 0,17  | 0,62  | 0,11  | 0,65 | 2,3                | 0,63                         |
| Neige de l'Ontario ( <i>Canada</i> )           | 1969            | 3,55                  | 1,13  | 1,78  | 0,75  | —    | 0,58               | —                            |
| Max.   | 1969            | 0,09                  | 0,01  | 0,10  | 0,03  | —    | 0,003              | —                            |
| Min.   | 1970            | 2,9                   | 0,80  | 3,6   | 1,3   | —    | —                  | —                            |
| Northern Cascade Mountains<br>( <i>G.B.</i> )  | —               | 1,40                  | 1,22  | —     | —     | 1,9  | —                  | 1,10                         |
| Amazonie ( <i>Brésil</i> )                     | 1964-1967       | —                     | —     | —     | —     | —    | 2,62               | 0,88                         |
| Delhi ( <i>Indes</i> )                         | —               | 0,002                 | 0,008 | 0,042 | 0,002 | 0,14 | —                  | —                            |
| Neige de l'Antarctique                         | —               | 0,75                  | —     | 0,10  | 0,30  | 0,80 | —                  | —                            |
| Neige de Chamrousse ( <i>France</i> )          | 1972            | 2,95                  | 0,08  | 0,17  | 0,21  | 0,50 | 3,40               | 0,32                         |
| Jura Neuchâtelois ( <i>Suisse</i> )            | —               | —                     | —     | —     | —     | —    | —                  | —                            |

en chlorures décroît rapidement de 8 mg/l sur la côte Est à 0,1 mg/l dans le centre des Etats-Unis. Par contre, ils ont observé le phénomène inverse pour les sulfates: les teneurs augmentent en se rapprochant des zones industrielles, le maximum des concentrations étant situé au-dessus des Grands Lacs.

En 1964, FETH, ROGERS et ROBERSON publient une étude sur la chimie de la neige réalisée dans la Sierra Nevada. Un travail important est celui de GAMBELL et FISHER, en 1966, sur la chimie de la pluie en Caroline du Nord et en Virginie. Ces auteurs mettent en évidence les perturbations liées aux activités humaines, auxquelles s'ajoutent les processus naturels: l'érosion chimique, les processus biologiques, les prélèvements d'éléments nutritifs minéraux par les plantes et le rejet lors de la décomposition de celles-ci, et les échanges d'ions dans les minéraux du sol. Tous ces phénomènes contribuent à modifier la composition initiale des sels de la pluie.

Dans le tableau I, figurent des analyses moyennes d'apports atmosphériques obtenues par différents auteurs sur différents continents.

## I. ECHANTILLONNAGE ET LIEUX DE PRÉLÈVEMENTS

Une très grande variabilité s'observe dans les résultats, selon les auteurs: l'une des raisons est la situation géographique du lieu de mesure (éloignement par rapport à la mer, zone urbaine ou zone désertique). Mais il est très important de noter que les valeurs obtenues par les différents auteurs sont très largement influencées par les différentes méthodes d'échantillonnage utilisées pour prélever les apports atmosphériques. Certaines analyses ne représentent que les éléments présents dans la pluie sous forme dissoute: l'échantillonnage n'a lieu que pendant les épisodes pluvieux.

Certains auteurs, au contraire, désirent obtenir l'ensemble des retombées: les apports par les pluies et par les poussières (« dryfallout » des auteurs américains). C'est ce que WHITEHEAD et FETH (1964) ont défini sous le terme de « Bulk Precipitation ». Ils estiment qu'il est indispensable d'accorder une grande importance aux retombées sèches, il faut donc mesurer l'ensemble des apports atmosphériques. Au Japon, par exemple, les pluies n'amènent que 25% des chlorures (HANYA, 1951), le reste soit 75% provient des poussières.

Des prélèvements de deux types ont été effectués pour notre étude:

— A l'échelle de l'averse, afin de chiffrer les éléments apportés par les pluies sensu-stricto.

— A l'échelle mensuelle, afin de recueillir la totalité des apports atmosphériques: apports par les pluies + poussières. Cette étude porte sur 100 analyses chimiques complètes.

Notons que toutes les analyses ayant été effectuées après filtration des échantillons à  $0,45\ \mu$ , les valeurs ci-après ne représentent que les éléments solubles.

Les mesures ont été faites en Haute-Savoie: à Thonon-les-Bains, et sur le bassin du Brévon situé à 15 km plus au sud (HAUBERT, 1975). Il s'agit d'un bassin versant de moyenne montagne (1180 m d'altitude moyenne), peu peuplé (29 habitants/km<sup>2</sup>), où l'activité essentielle réside en un élevage extensif, occupant 25% de la superficie. Les forêts et les zones rocheuses représentent 75% de la superficie totale qui est de 86 km<sup>2</sup>.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 1000 mm à Thonon et de 1400 mm sur le bassin du Brévon.

Afin de mieux mettre en évidence l'origine des différentes substances, des prélèvements ont été réalisés à des altitudes variées:

— En zone rurale: aux stations de Bellevaux (930 m), de Terramont (1090 m), ainsi qu'aux Favrats (930 m) dans la partie haute du bassin de Thonon.

— En zone montagnaise, à 4 stations étagées entre 1250 m et 1850 m d'altitude.

Pour comparer les observations faites sur le Brévon, des prélèvements sont faits à la station de Thonon-CRG (385 m), en zone urbaine.

## II. RÉSULTATS DES ANALYSES D'APPORTS ATMOSPHÉRIQUES SUR LE BASSIN DU BRÉVON ET A THONON

### I) Les apports à l'échelle de l'averse.

Le tableau 2 donne les moyennes pour tous les prélèvements d'averses ponctuelles réalisés à Thonon (8 analyses) et à Bellevaux. A cette dernière station, une distinction est faite suivant qu'il s'agit de pluie (17 analyses), ou de neige (13 analyses).

Les teneurs mesurées dans la pluie à Thonon sont identiques à celles obtenues sur le bassin du Brévon, pour les éléments suivants:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Sr}^{++}$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{P}_{\text{tot.}}$ . On note, à Thonon, une légère diminution de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et une augmentation de  $\text{SO}_4^{--}$  et de  $\text{HCO}_3^-$ .

La neige prélevée à Bellevaux est plus minéralisée que la pluie: 22 mg/l pour la neige contre 15 mg/l pour la pluie. Les éléments qui prédominent dans la neige sont  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

### 2) Les apports à l'échelle mensuelle: précipitations + poussières.

Dans le tableau 3, figurent les résultats obtenus aux mêmes stations de Thonon et de Bellevaux (moyenne de 30 analyses). A Thonon, les moyennes d'été sont distinguées de celles d'hiver. Ce tableau mentionne, en outre, les résultats à la station de Terramont ainsi que la moyenne des prélèvements faits en montagne entre 1250 et 1850 m d'altitude, durant l'été 1972 (6 analyses).

TABLEAU 2  
Apports atmosphériques à l'échelle de l'averse  
(Concentrations en mg/l)

| Stations                                   | SiO <sub>2</sub><br>mg/l | Cations (mg/l) |              |              |              |                            |              | Anions (mg/l) |                    |                     |                             |                             |              | P <sub>t</sub><br>mgP/l |
|--|--------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------|---------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|
|  |                          | Ca++           | Mg++         | Na+          | K+           | NH <sub>4</sub> +<br>mgN/l | Sr++         | Cl-           | SO <sub>4</sub> -- | HCO <sub>3</sub> -- | NO <sub>3</sub> --<br>mgN/l | PO <sub>4</sub> --<br>mgP/l |              |                         |
|  |                          |                |              |              |              |                            |              |               |                    |                     |                             |                             |              |                         |
| Thonon-CRG<br>(385 m) : Pluie<br>Bellevaux | 0,10                     | 1,5            | 0,13         | 0,35         | 0,94         | 0,33                       | 0,01         | 0,9           | 4,2                | 9,7                 | 0,35                        | 0,025                       | 0,01         | 0,07                    |
| (930 m) : Pluie<br>Neige                   | 0,12<br>0,11             | 1,6<br>5,1     | 0,12<br>0,12 | 0,99<br>1,35 | 0,90<br>1,10 | 0,37<br>0,26               | 0,01<br>0,01 | 1,4<br>1,2    | 3,7<br>3,0         | 4,7<br>9,1          | 0,31<br>0,19                | 0,095<br>0,009              | 0,07<br>0,15 | 0,10<br>0,2             |

TABLEAU 3  
Analyses des apports atmosphériques à l'échelle mensuelle : pluie + poussières  
(Concentrations en mg/l)

| Station et altitude<br>des prélèvements | SiO <sub>2</sub><br>mg/l | Cations (mg/l) |        |      |      |                            | Anions (mg/l) |      |                     |                    |                            | P <sub>t</sub><br>mgP/l |                                |
|---|--------------------------|----------------|--------|------|------|----------------------------|---------------|------|---------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
|   |                          | Ca + +         | Mg + + | Na + | K +  | NH <sub>4</sub> +<br>mgN/l | Sr + +        | Cl – | SO <sub>4</sub> – – | HCO <sub>3</sub> – | NO <sub>3</sub> –<br>mgN/l |                         | PO <sub>4</sub> – – –<br>mgP/l |
| Thonon (385 m) :<br>hiver<br>été        | 0,16                     | 2,4            | 0,20   | 0,70 | 0,26 | 1,9                        | 0,01          | 1,35 | 11,7                | 4,2                | 0,20                       | 0,03                    | 0,04                           |
|   | 0,25                     | 2,6            | 0,25   | 0,60 | 0,62 | 4,4                        | 0,01          | 0,70 | 10                  | 16,0               | 0,15                       | 0,07                    | 0,08                           |
| Bellevaux<br>(930 m)                    | 0,12                     | 2,8            | 0,20   | 0,50 | 0,12 | 3,0                        | 0,01          | 0,50 | 4                   | 14                 | 0,16                       | 0,008                   | 0,02                           |
| Terramont<br>(1090 m)                   | 0,13                     | 2,5            | 0,20   | 0,45 | 0,60 | 2,7                        | 0,01          | 0,60 | 4,4                 | 16                 | 0,18                       | 0,007                   | 0,02                           |
| Stations d'altitude<br>(1250 à 1850 m)  | 0,05                     | 0,0            | 0,0    | 0,34 | 0,65 | 0,18                       | 0,00          | 0,70 | 2,9                 | —                  | 0,14                       | 0,005                   | —                              |

A Thonon et à Bellevaux, les prélèvements faits à l'échelle mensuelle montrent, pour les éléments suivants, des concentrations beaucoup plus élevées que dans les pluies ponctuelles:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  (pour Thonon, seulement) et  $\text{HCO}_3^-$ . L'importance des poussières est donc prépondérante pour ces éléments.

Entre les stations de Thonon, Bellevaux, Terramont et les prélèvements d'altitude, on note, pour la totalité des retombées atmosphériques, une diminution de la plupart des concentrations; c'est le cas pour  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$ . Ce phénomène est à mettre en relation avec l'éloignement par rapport aux zones urbanisées.

La disproportion observée entre les analyses d'averses ponctuelles et les analyses mensuelles incluant les poussières solubles montre l'importance des retombées sèches qui sont, pour certains éléments, à l'origine de près de 50% des teneurs mesurées. Il est donc indispensable, dans un bilan chimique, de mesurer l'ensemble des apports atmosphériques.

### III. ORIGINE DES ÉLÉMENTS CONTENUS DANS LES APPORTS ATMOSPHÉRIQUES

L'interprétation de la présence et de la variation des différents éléments contenus dans les apports atmosphériques est rendue très difficile pour plusieurs raisons:

— Les variations observées concernent des concentrations très faibles. Il en résulte que, pour certains éléments, ces variations sont situées dans le domaine d'erreur possible et ne sont donc pas interprétables.

— Les échantillons collectés à l'échelle mensuelle sont réalisés en prélevant dans le pluviomètre, le dernier jour de chaque mois, l'ensemble des apports atmosphériques du mois. Une partie des apports liquides recueillis a pu être repris par l'évaporation. De plus, l'activité microbiologique dans le pluviomètre peut altérer la concentration chimique. Ce phénomène est capital pour l'ammoniaque et les nitrates, il est sans effet notable pour les autres constituants.

1)  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Sr}^{++}$ : la source principale pour ces éléments est constituée par les poussières du sol (GAMBELL *et al.*, 1966). Toutefois, les teneurs, pour ces constituants montrent une diminution avec l'éloignement de l'influence des zones urbanisées où les concentrations y sont plus fortes qu'en zones montagneuses. Elles atteignent, par contre, des valeurs très proches de zéro au-dessus de 1250 m d'altitude.

2)  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ : ces deux éléments sont très abondants dans le sol: les poussières en provenance du sol apportent à l'atmosphère du sodium et du potassium. La figure I représente l'évolution mensuelle des apports atmosphériques à Thonon.



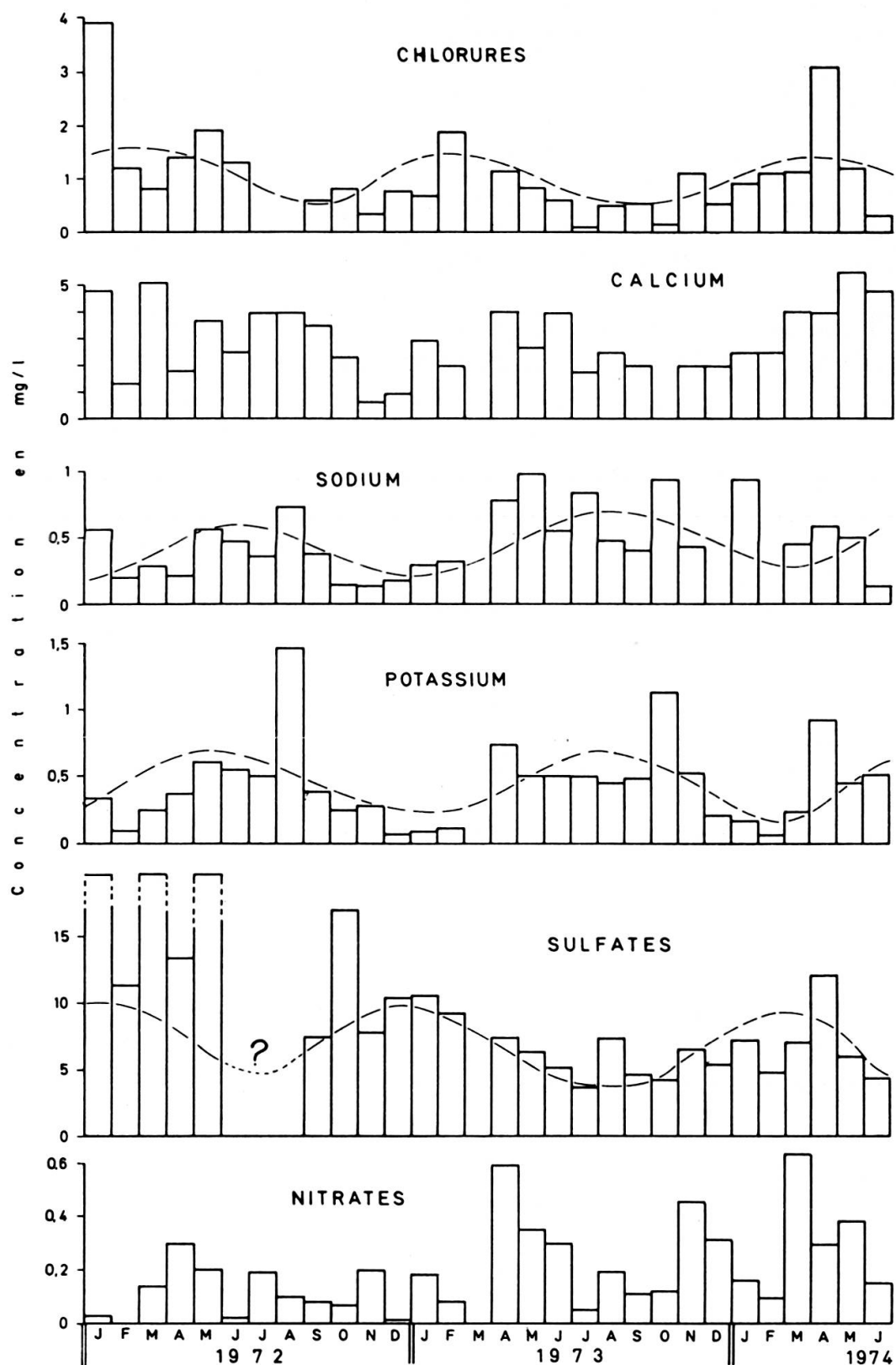


FIG. 1. — Station de Thonon-C.R.G. — concentrations (en mg/l) mesurées dans les précipitations mensuelles.

Courbe de tendance - - - -



Les courbes de tendance montrent pour  $K^+$  un maximum en été, et un minimum en hiver. Cet élément étant prélevé dans le sol, en été, par les plantes, on peut conclure à une participation plus grande pour le potassium, dans les retombées atmosphériques, de poussières d'origine végétale, durant cette saison.

A la station de Bellevaux, les valeurs plus élevées mesurées dans la neige, surtout pour  $Na^+$  s'expliquent par l'utilisation en montagne de chlorures de sodium et de potassium, pour le salage des routes. Une partie de ce sel peut être enlevée sous forme de poussières ou d'aérosols puis repris par les précipitations.

3)  $Cl^-$  et  $SO_4^{--}$ . A Thonon, les concentrations en  $Cl^-$  et  $SO_4^{--}$  sont maximums en hiver, minimums en été. Le cycle est très sensible pour les sulfates, qui varient, de plus, en fonction de l'urbanisation (tableau 3). L'influence humaine est seule responsable de ce phénomène; il s'agit, en effet, de résidus issus des combustions en zone urbaine et industrielle. La combustion du fuel, plus forte en hiver qu'en été, explique les variations saisonnières observées.

Des travaux américains indiquent que, dans les précipitations sur les Bermudes et la Floride, l'essentiel des sulfates provient de la mer (KOIDE, 1971). Mais, à l'intérieur des terres, une carte des concentrations montrent une augmentation des sulfates, plus précisément au-dessus des villes, et des zones industrielles. On estime, dans ces régions du continent américain où l'influence océanique est prépondérante, que les résidus de combustion du fuel sont à l'origine de 30% des sulfates atmosphériques. Ce phénomène est connu depuis de nombreuses années (CONWAY, 1942).

Entre les prélèvements réalisés en altitude, à Bellevaux, à Thonon et à Genève (Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique, 1972), la répartition des teneurs en sulfates dans les pluies montre une augmentation avec l'urbanisme (fig. 2).

#### 4) Origine de l'azote.

La plus grande partie de l'azote apportée par les précipitations dérive de composés gazeux présents dans l'atmosphère (GAMBELL *et al.*, 1966). De nombreuses théories ont été émises sur l'origine de ces composés.

— Les nitrites sont produits sous l'action des éclairs lors des orages, fixant une grande quantité d'azote atmosphérique (REITER *et al.*, 1970). Il y a ensuite oxydation en nitrates dans la pluie (VIEMEISTER, 1960). Cette théorie est très contestée (JUNGE *et al.*, 1958). Après diffusion dans la troposphère, ce composé est assimilé dans la pluie en nitrates (VIRTANEN, 1952).

— L'origine de l'azote présent dans la pluie peut, dans certains cas, être liée à des processus naturels associés aux sols tels que la dégradation de la matière organique (JUNGE *et al.*, 1958).

— L'activité humaine est aussi une source d'azote pour les précipitations. Les nitrates peuvent dériver de composés gazeux associés aux effluents industriels;

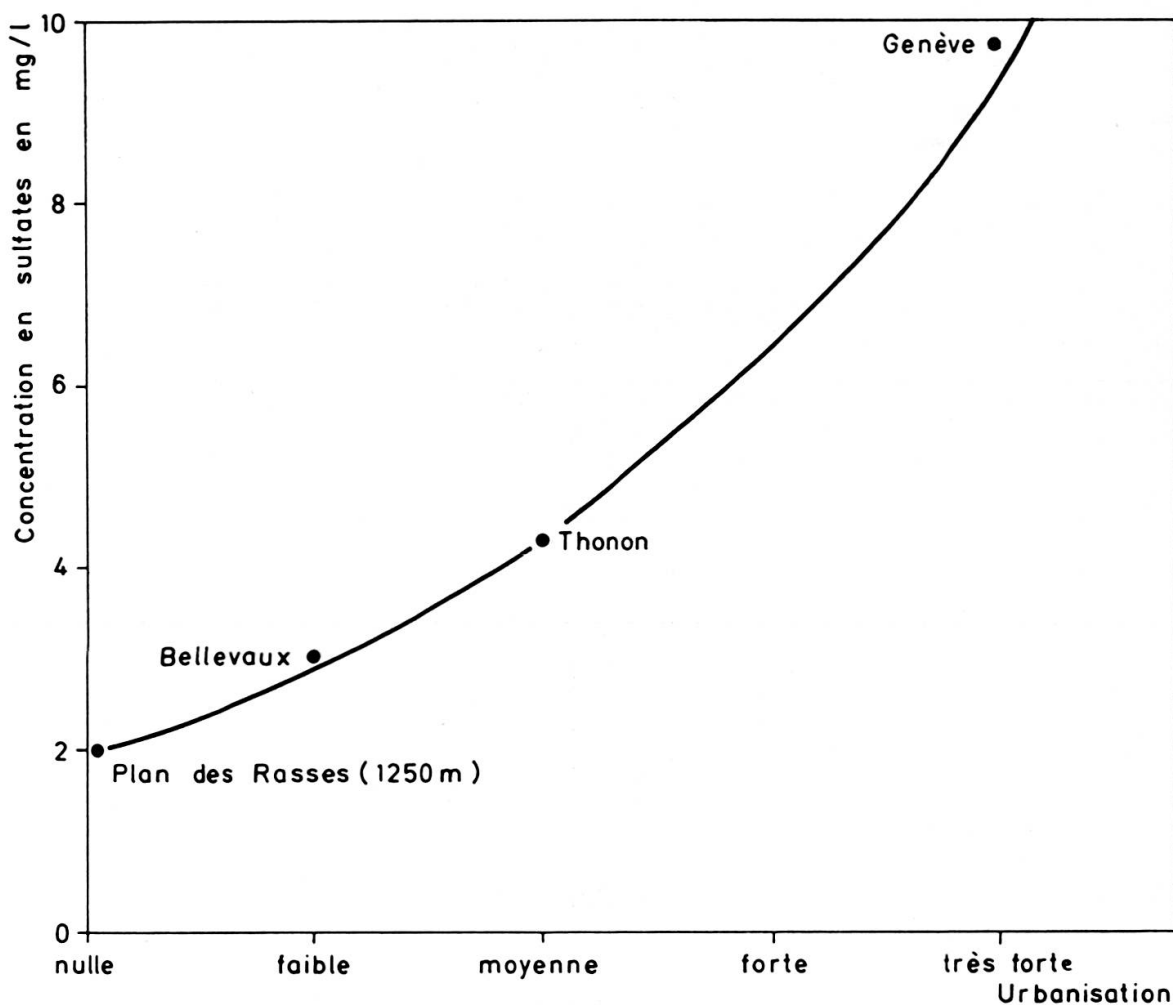


FIG. 2. — Variations des concentrations en sulfates (en mg/l) dans les précipitations avec l'urbanisme.

il est connu que des oxydes d'azote sont formés par les processus de combustion à haute température.

— Le stade d'oxydation le plus fréquent dans les précipitations est très discuté. Il semble que la plus grande partie de l'azote contenu dans les pluies soit sous forme d'ion ammonium (FETH, 1964).

##### 5) Phosphore.

La principale origine du phosphore est les résidus de combustion (CONWAY, 1942). Cet élément provient aussi du sol. L'emploi d'engrais azotés et phosphorés sur les zones cultivées donne une importance de plus en plus grande à cette origine.

TABLEAU 4  
*Apports atmosphériques sur le bassin du Brévon*  
*(en t/an et en t/km<sup>2</sup>/an)*

|                      | SiO <sub>2</sub>              | Ca++       | Mg++      | Na+       | K+        | NH <sub>4</sub> + | Cl-        | SO <sub>4</sub> -- | HCO <sub>3</sub> -- | NO <sub>3</sub> -- | P <sub>t</sub> | Total         |
|----------------------|-------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------|---------------|
| 1969                 | t/an<br>t/km <sup>2</sup> /an | 325<br>3,8 | 26<br>0,3 | 78<br>0,9 | 52<br>0,6 | 390<br>4,5        | 104<br>1,2 | 908<br>10,6        | 1 948<br>22,7       | 23<br>0,3          | 5<br>0,06      | 3 885<br>45,2 |
| 1970                 | t/an<br>t/km <sup>2</sup> /an | 403<br>4,7 | 32<br>0,4 | 97<br>1,1 | 65<br>0,8 | 464<br>5,6        | 129<br>1,5 | 1 128<br>13,1      | 2 419<br>28,1       | 29<br>0,3          | 6<br>0,07      | 4 824<br>56,1 |
| 1971                 | t/an<br>t/km <sup>2</sup> /an | 255<br>3,0 | 20<br>0,2 | 61<br>0,7 | 41<br>0,5 | 306<br>3,6        | 82<br>1,0  | 714<br>8,3         | 1 529<br>17,8       | 18<br>0,2          | 4<br>0,05      | 3 050<br>35,5 |
| 1972                 | t/an<br>t/km <sup>2</sup> /an | 227<br>2,6 | 18<br>0,2 | 54<br>0,6 | 36<br>0,4 | 272<br>3,2        | 73<br>0,9  | 635<br>7,4         | 1 361<br>15,8       | 16<br>0,2          | 4<br>0,05      | 2 714<br>31,6 |
| 1973                 | t/an<br>t/km <sup>2</sup> /an | 334<br>3,9 | 27<br>0,3 | 80<br>0,9 | 53<br>0,6 | 401<br>4,7        | 107<br>1,2 | 936<br>10,9        | 2 006<br>23,3       | 24<br>0,3          | 5<br>0,06      | 4 003<br>46,6 |
| Moyenne<br>1969-1973 | t/an<br>t/km <sup>2</sup> /an | 309<br>3,6 | 25<br>0,3 | 74<br>0,9 | 49<br>0,6 | 371<br>4,3        | 99<br>1,2  | 864<br>10,1        | 1 853<br>21,6       | 22<br>0,3          | 4,8<br>0,06    | 3 995<br>46,5 |

#### IV. BILAN DES APPORTS ATMOSPHÉRIQUES SUR LE BASSIN DU BRÉVON

A partir des hauteurs de pluie moyenne annuelle, et des concentrations mesurées pour chaque élément sur le bassin du Brévon durant la période janvier 1972-juin 1974, il est possible de calculer les apports atmosphériques totaux, comprenant les éléments apportés par les pluies ainsi que les poussières solubles. Le tableau 4 donne les résultats en t/an et en t/km<sup>2</sup>/an.

Ainsi, sur le bassin versant du Brévon, les apports atmosphériques sont en moyenne de 4000 t d'éléments solubles par an, soit une charge spécifique de 46,5 t/km<sup>2</sup>/an, dont 45% sous forme de bicarbonates.

Les apports par les précipitations représentant 20% de ce qui est exporté sous forme dissoute, à l'exutoire du bassin (236 t/km<sup>2</sup>/an).

Il est important de remarquer, (HAUBERT, 1975), que la quantité de nitrates transportée par la rivière le Brévon est identique à celle apportée par les précipitations (0,3 tN/km<sup>2</sup>/an); il en est de même pour les chlorures (1,2 t/km<sup>2</sup>/an). Les sorties en phosphore sont au contraire plus faibles dans la rivière (0,03 tP/km<sup>2</sup>/an) que dans les apports atmosphériques (0,06 tP/km<sup>2</sup>/an). Cet élément, d'origine artificielle dans les précipitations, est en partie fixé dans le sol.

A partir des analyses d'averses ponctuelles et d'apports atmosphériques totaux, il est possible de chiffrer la participation des poussières. Le tableau 5 donne les pourcentages d'apports par les pluies et par les retombées sèches.

Les pluies représentant 60% des apports, les poussières amènent donc 40% des éléments. Une partie de ces poussières sont, certainement, à considérer comme provenant d'un recyclage à l'échelle du bassin.

La participation des apports atmosphériques n'est pas négligeable parmi les différents termes du bilan hydrochimique. Plusieurs processus contribuent à augmenter la charge en provenance de l'atmosphère. Il faut noter l'importance de plus en plus grande des perturbations liées aux activités humaines, ainsi que le montre l'analyse d'une pluie ponctuelle prélevée près de Versailles, dans la banlieue de Paris, en zone très urbanisée (tab. 6). La comparaison de ces chiffres avec la moyenne des averses mesurées à Thonon, montre qu'à Versailles la pluie contient 5 fois plus de calcium, 3 fois plus de magnésium, 2 fois plus de sodium, d'ammoniaque, de sulfates et de nitrates, et 4 fois plus de phosphore. La présence humaine est la cause d'importantes modifications de la composition des apports atmosphériques.

#### CONCLUSIONS

Les apports par les précipitations représentent, sur le bassin du Brévon, 46,5 t/km<sup>2</sup>/an. La participation des poussières atmosphériques est importante: 40% des apports contre 60% pour les éléments dissous dans les pluies. Ces résultats

TABLEAU 5

*Participation respective des pluies et des poussières dans les apports atmosphériques sur le bassin du Brévon  
(en %)*

|   | SiO <sub>2</sub> | Ca++ | Mg++ | Na+ | K+  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>en N | Cl- | SO <sub>4</sub> -- | HCO <sub>3</sub> - | NO <sub>3</sub> --<br>en N | P <sub>t</sub> | Total |
|---|------------------|------|------|-----|-----|--------------------------------------|-----|--------------------|--------------------|----------------------------|----------------|-------|
| Apports dissous<br>dans la pluie (en %) | 55               | 96   | 60   | 100 | 100 | 10                                   | 100 | 57                 | 53                 | 100                        | 100            | 57    |
| Apports par les poussières<br>(en %)    | 45               | 4    | 40   | 0   | 0   | 90                                   | 0   | 43                 | 47                 | 0                          | 0              | 43    |
|   |                  |      |      |     |     |                                      |     |                    |                    |                            |                | 100   |

TABLEAU 6

*Analyse chimique d'une averse en zone très urbanisée*

| Concentrations en mg/l                |                  |        |        |      |      |                                      |        |      |                     |                    |                           |                           |  |                        |
|---------------------------------------|------------------|--------|--------|------|------|--------------------------------------|--------|------|---------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|--|------------------------|
|                                       | SiO <sub>2</sub> | Ca + + | Mg + + | Na + | K +  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>en N | Sr + + | Cl - | SO <sub>4</sub> - - | HCO <sub>3</sub> - | NO <sub>3</sub> -<br>en N | NO <sub>2</sub> -<br>en N | PO <sub>4</sub> - - -<br>en P <sub>t</sub> | P <sup>r</sup><br>en P |
| Versailles:<br>pluie<br>du 26/06/1974 | 0,26             | 7,5    | 0,35   | 0,87 | 0,01 | 0,765                                | 0,01   | 0,56 | 8,9                 | 0,59               | 0,54                      | 0,019                     | 0,007                                      | 0,015                  |

montrent que, dans un bilan hydrochimique, il est absolument indispensable de tenir compte des apports par les précipitations: les éléments dissous dans la pluie et les retombées sèches. Il faut souligner l'importance de l'échantillonnage qui peut influencer très largement les résultats. Il est indispensable de prélever la totalité des éléments d'origine atmosphérique.

Cette source d'apports est d'autant plus importante qu'elle est, de plus en plus, soumise à des perturbations provoquées par la présence humaine. Le développement de l'urbanisme entraîne un accroissement des poussières dans l'atmosphère. L'augmentation des résidus de combustion, ayant pour origine le fuel domestique, et les fumées industrielles, est la cause de teneurs importantes en sulfates et en phosphore.

La participation des apports atmosphériques dans un bilan hydrochimique montre le rôle de la pollution atmosphérique dont l'importance est de plus en plus sensible, même sur un bassin versant de moyenne montagne peu influencé par la présence humaine.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BARICA, J. and F. A. J. ARMSTRONG 1971. Contribution by snow to the nutrient budget of some small Northwest Ontario Lakes. *Limnol. Oceanogr.*, V, 16 (6), 891-899.
- BOUTRON, C., M. ECHEVIN and C. LORIS 1972. Chemistry of polar snows. Estimation of rates of deposition in Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 36, 1029-1041.
- BRINTON, H. C., R. A. PICKETT and H. A. TAYLOR jr. 1969. Diurnal and seasonal variation of atmospheric ion composition; correlation with solar zenith angle. *Journ. Geoph. Res.*, vol. 74, No. 16, 4064-4073.
- BROMFIELD, A. R. 1974. The deposition of sulphur in the rainwater in Northern Nigeria. *Tellus*, XXVI, 3, 408-411.
- CARROLL, D. 1962. Rainwater as a chemical agent of geologic processes. *U.S. Geol. Survey Water Supply Paper*, 1535-G, 18 p.
- CHAMBON, P., B. MINAUD-VAN-PEL et R. CHAMBON 1974. Analyse de suies atmosphériques lyonnaises. *Rev. Cébedeau*, 365, 225-229.
- DELANY, A. C., D. W. PARKIN, J. J. GRIFFIN, E. D. GOLDBERG and B. E. F. REIMANN 1967. Airborne dust collected at Barbados. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, 885-909.
- DEPIERRE, J. W. and M. L. KARNOVSKY 1974. The size of suspended particle matter in air. *Science*, vol. 183, 1098-1099.
- DETRE, J. P. 1967. Conditions météorologiques et pollution atmosphérique dans la région parisienne. *La météorologie*, 5<sup>e</sup> série, N° 2, 273-293.
- EGNER, H. and E. ERICKSSON 1955. Current data on the chemical composition of air and precipitation. *Tellus*, 7, 134-139.
- ERICKSSON, E. 1955. Airborne salts and the chemical composition of river waters. *Tellus*, 7, 243-250.
- 1960. The yearly circulation of chloride and sulfur in nature; meteorological, geochemical and pedological implications, parts I and II. *Tellus*, II, 375-403; 12, 63-109.
- FACY, M. L. 1974. Influence de la modification par les gaz et les poussières industrielles de l'atmosphère hydrométéorologique. Soc. Hydrotechnique de France, XIII<sup>e</sup> journées de l'Hydraulique, Paris, 8 p.
- FETH, J. H., S. M. ROGERS and C. E. ROBERSON 1964. Chemical composition of snow in the Northern Sierra Nevada and other areas. *U.S. Geol. Survey Water Supply Paper*, 1535-J, 39 p.
- 1967. Chemical characteristics of bulk precipitation in the Mojave Desert region, California. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 575-C, 222/227.



- FISHER, D. W. 1968. Annual variations in chemical composition of atmospheric precipitation Eastern North Carolina and Southeastern Virginia. *Geol. Survey Water Supply Paper*, 1535-M, 21 p.
- GAMBELL, A. W. 1963. Sulfate and nitrate content of precipitation over parts of North Carolina and Virginia. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 475-C, 209-211.
- and D. W. FISHER 1966. Chemical composition of rainfall. Eastern North Carolina and Southeastern Virginia. *Geol. Survey Water Supply Paper*, 1535-K, 41 p.
- GATZ, D. F. and A. N. DINGLE 1971. Trace substances in rain water: concentration variations during convective rains, and their interpretation. *Tellus*, XXIII, I, 14-27.
- GORHAM, E. 1955. On the acidity and salinity of rain. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 7, 231-239.
- 1958. The influence and importance of daily weather conditions in the supply of chloride, sulfate and other ions to fresh waters from atmospheric precipitation. *Royal Soc. London Philos. Trans.*, vol. 247, 147-178.
- 1961. Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. *Geol. Soc. of America Bull.*, vol. 72, 795-840.
- GRANAT, L. 1972. On the relation between pH and the chemical composition in atmospheric precipitation. *Tellus*, vol. 24, No. 6, 550-560.
- HAUBERT, M. 1975. Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne: la Dranse de Bellevaux (Brévon) Haute-Savoie. Thèse 330 p., 77 fig., 80 tabl., 67 tabl. annexes, Paris.
- B. CHASSAING, E. SIWERTZ et Ph. OLIVE 1975. Apports en nutriments au Lac Léman pour la période 1963-1972 (II). *Arch. Sc. Genève*, fasc. I, vol. 28, 41-52.
- 1975. Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne. *Bull. B.R.G.M. série 3*, à paraître.
- HOBBS, P. V., H. HARRISON and E. ROBINSON 1974. Atmospheric effects of pollutants. *Science*, vol. 183, 909-915.
- HUTCHINSON, G. E. 1957. The inorganic ions of rain, lakes and rivers. A treatise of limnol., vol. I, Geography, physics and chemistry. Ed. Wiley Londres, 1015 p.
- JOHNSON, N. M., R. C. REYNOLDS and G. E. LIKENS 1972. Atmospheric sulfur: its effect on the chemical weathering of New England. *Science*, vol. 177, 514-516.
- JONES, E. 1960. Contribution of rainwater to the nutrient economy of soil in Northern Nigeria. *Nature*, vol. 188, p. 432.
- JONES, M. J. and A. R. BROMFIELD 1970. Nitrogen in the rainfall at Samaru, Nigeria. *Nature*, vol. 227, 86.
- 1971. Ammonium and nitrate nitrogen in the rainwater at Samaru, Nigeria. *Tellus*, XXIII, 4-5, 459-461.
- JUNGE, C. E. and R. T. WERBY 1958. The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulfate in rain water over the United States. *Journ. Meteorology*, vol. 15, No. 5, 417-425.
- KAPOOR, R. K., L. T. KHEMAMI and Bh. V. RAMANA 1972. Chemical composition of rain water and rain characteristics at Delhi. *Tellus*, vol. 24, No. 6, 575-580.
- KOIDE, M. 1971. Atmospheric sulfur and fossil fuel combustion. *Journ. Geoph. Res.*, 76 27, p. 6589.
- LAZRUS, A. L., H. W. BAYNTON and J. P. LODGE 1970. Trace constituents in oceanic cloud water and their origin. *Tellus*, XXII, I, 106-113.
- LIKENS, G. E. and F. H. BORMANN 1974. Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science*, 184, 1176-1179.
- MEYER, J. and E. PAMPFER 1970. Nitrogen content of rain water collected in the humid central Congo basin. *Nature*, vol. 227, 717-718.
- MISEREZ, J. J. 1973. Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse, Université de Neuchâtel, 300 p.
- MOORE, H. 1974. Isotopic measurement of atmospheric nitrogen compounds. *Tellus*, XXVI, 1-2, 169-174.
- MUNN, R. E. and H. RODHE 1971. On the meteorological interpretation of the chemical composition of monthly precipitation samples. *Tellus*, XXIII, I, 1-12.
- PASCAL, P. 1956. Les constituants occasionnels de l'air. Nouveau traité de chimie minérale, T. I, Masson, Paris, 1100 p.



- PEARSON, F. J. and D. W. FISHER 1971. Chemical composition of atmospheric precipitation in the Northeastern United States. *Geol. Survey Water Supply Paper*, 1535-p, 23 p.
- PEIRSON, D. H., P. A. CAWSE, L. SALMON and R. S. CAMBRAY 1973. Trace elements in the atmospheric environment. *Nature*, 241, 252-256.
- PETERSON, J. T. and R. A. BRYSON 1968. Atmospheric aerosols: increased concentrations during the last decade. *Science*, vol. 162, 120-121.
- PROSPERO, J. M. and E. BONATTI 1969. Continental dust in the atmosphere of the Eastern Equatorial Pacific. *Journ. Geophys. Research*, 74, 13, 3362-3370.
- RAPPORTS SUR LES ÉTUDES ENTREPRISES DANS LE BASSIN LÉMANIQUE, par la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Lac Léman et du Rhône contre la Pollution. (Secrétariat: 23, avenue de Chailly — 1012 Lausanne).
- REITER, R. 1970. On the causal relation between nitrogen-oxygen compounds in the troposphere and atmospheric electricity. *Tellus*, XXII, I, 122-135.
- RODHE, H. 1970. On the residence time of antropogenic sulfur in the atmosphere. *Tellus*, XXII, I, 137-139.
- 1972. A study of the sulfur budget for the atmosphere over Northern Europe. *Tellus*, XXIV, 2, 128-138.
- ROSS, R. D. 1974. La pollution atmosphérique et l'industrie. Entreprise Moderne d'Édition Technique et Documentation, Paris, 406 p.
- THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES AND THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES, 1971. Report of the study of man's impact on climate. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England. 208 p.
- SELEZNEVA, E. S. 1972. Estimation of the background contamination of the atmosphere from the chemical composition of precipitation. *Tellus*, 24, 2, 122-127.
- SIMPSON, J. R. and J. R. FRENEY 1974. Ammonia flux into the atmosphere from a grazed pasture. *Science*, 185, 609-610.
- THORNTON, I. 1965. Nutrient content of rainwater in the Gambia. *Nature*, 205, p. 1025.
- UNGEMACH, H. 1972. Regenwasseranalysen aus Zentralamazonien. *Amazoniana*, III, II, 186-188.
- VADOT, L. 1974. Modifications climatiques dues à la pollution atmosphérique. Soc. Hydrotechnique de France, XIII<sup>e</sup> journées de l'Hydraulique, Paris, 5 p.
- VIEMEISTER, P. E. 1960. Lightning and the origin of nitrates found in Precipitation. *Journ. of Meteorology*, 17, 681-683.
- WEIBEL, S. R., R. B. WEIDNER, J. M. COHEN and A. G. CHRISTIANSON 1966. Pesticides and other contaminants in rainfall and runoff. *Journ. of Amer. Water Works Ass.*, 58, 1075-1084.
- WHITBY, K. T., R. E. CHARLSON, W. E. WILSON and R. K. STEVENS 1974. The size of suspended particle matter in air. *Science*, 183, 1098-1099.
- WHITEHEAD, H. C. and J. H. FETH 1964. Chemical composition of rain, dry fallout and bulk precipitation at Menlo Park, California, 1957-59. *Journ. of Geophys. Res.*, 69, 3319-3333.
- WILSON, A. T. 1959. Surface of the ocean as a source of air-borne nitrogenous material and other plant nutrient. *Nature*, 184, 99-101.

