

Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 27 (1974)
Heft: 1

Artikel: Bilan hydrologique du lac Léman pour la période 1963-1972 [I]
Autor: Siwertz, Erik / Chassaing, Bernard / Haubert, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-739296>

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: 30.01.2026

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

BILAN HYDROLOGIQUE DU LAC LÉMAN POUR LA PÉRIODE 1963-1972 [I]

PAR

Erik SIWERTZ, Bernard CHASSAING, Michel HAUBERT, Philippe OLIVE

Conséquence de l'activité humaine croissante les apports en matières nutritives que supporte le lac Léman ne cessent d'augmenter d'année en année. Ce phénomène quantitatif est à l'origine d'une modification de l'état physicochimique et biologique du lac: la qualité des eaux se dégrade et le lac s'eutrophise.

Afin de mieux mesurer les apports en nutriments qui règlent l'état de trophie du lac, nous tenterons dans une première partie de faire le bilan hydrologique du lac (I). Dans une seconde partie seront étudiés les apports provenant du bassin versant (II). Enfin, la dernière partie sera consacrée à l'état biogéochimique du lac (III).

INTRODUCTION

Le Léman est l'un des plus grands lacs d'Europe occidentale et en particulier le premier pour le volume des eaux. Ses principales caractéristiques morphométriques [1, 2] sont reportées dans le tableau 1:

TABLEAU 1
Caractéristiques morphométriques du lac Léman

| | |
|------------------------|---------------------|
| Altitude du plan d'eau | 372 m |
| Superficie | 580 km ² |
| Volume | 89 km ³ |
| Longueur | 72 km |
| Largeur maximum | 15 km |
| Profondeur maximum | 310 m |
| Profondeur moyenne | 152 m |

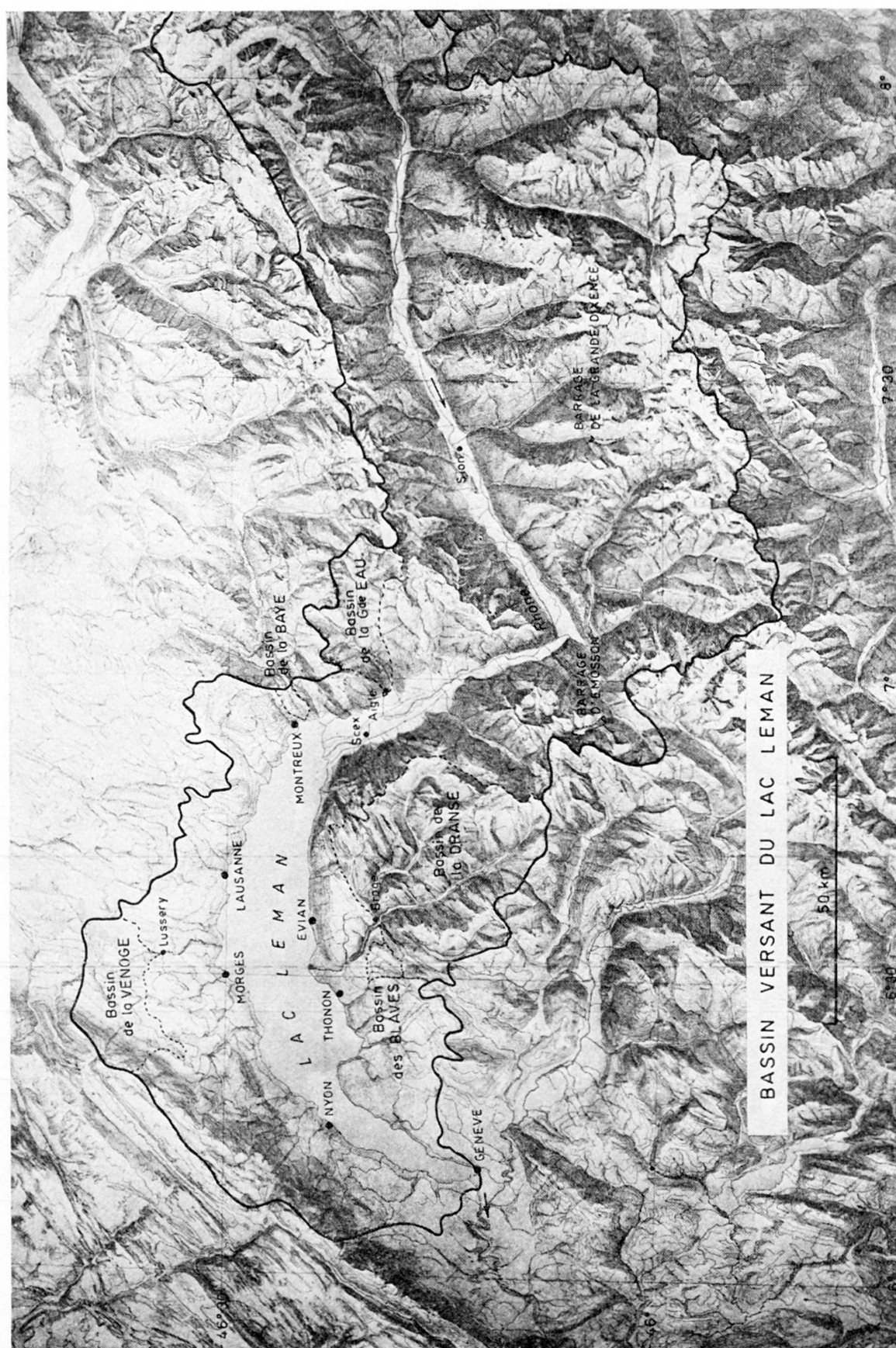


Fig. 1

Le bilan hydrologique d'un lac peut se réduire à la relation simple suivante:

$$P + Q_e = E + Q_s \pm \Delta V$$

où: P = précipitations sur la surface du Lac.

Q_e = volume d'eau apporté par le bassin versant.

E = évaporation à la surface du Lac.

Q_s = volume d'eau écoulé à l'émissaire.

ΔV = variation du volume du lac.

Les différents termes de ce bilan, exprimés en millions de mètres cubes par an ($10^6 \text{ m}^3/\text{an}$), peuvent être appréciés avec plus ou moins de précision, compte tenu de l'équipement hydrologique.

On a porté sur la figure 1 les installations de base dont les résultats ont été utilisés pour cette étude.

I. LES ARRIVÉES D'EAU AU LÉMAN

a) *Les précipitations : P*

Sur le tableau 2, sont reportées les hauteurs annuelles des précipitations, exprimées en mm d'eau, sur 6 stations réparties autour du lac. Les résultats des stations suisses proviennent de l'Institut suisse de météorologie [3]. La moyenne, sur les

TABLEAU 2
Hauteurs des précipitations annuelles sur le Léman en mm d'eau

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|--|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----------|
| Thonon-C.R.G. 385 m | 1 134 | 769 | 1 176 | 992 | 963 | 1 201 | 837 | 1 083 | 669 | 725 | 955 |
| Genève-Cointrin 420 m | 1 013 | 747 | 1 270 | 1 068 | 992 | 1 269 | 931 | 1 039 | 703 | 761 | 979 |
| Nyon 390 m | 1 123 | 816 | 1 485 | 1 079 | 1 078 | 1 258 | 821 | 1 201 | 715 | 745 | 1 032 |
| Morges 380 m | 1 063 | 758 | 1 454 | 1 103 | 1 059 | 1 252 | 845 | 1 211 | 810 | 805 | 1 036 |
| Lausanne-Pierre de Plan 620 m | 1 129 | 810 | 1 373 | 1 123 | 1 113 | 1 374 | 977 | 1 320 | 830 | 789 | 1 084 |
| Montreux-Clarens 410 m | 1 138 | 981 | 1 633 | 1 307 | 1 206 | 1 421 | 1 000 | 1 398 | 957 | 1 026 | 1 207 |
| MOYENNE Thonon, Genève, Nyon, Morges | 1 083 | 773 | 1 346 | 1 060 | 1 023 | 1 245 | 858 | 1 134 | 724 | 759 | 1 000 |

10 années, et pour les 4 premières stations est de 1 m d'eau par an à 5 % près. La valeur enregistrée à Lausanne, plus élevée de 10 % est liée à l'altitude de cette station (620 m). En effet, avec un gradient pluviométrique régional de 0,6 mm/m [4], on retombe sur une valeur proche de 1 000 mm au niveau du lac (372 m). Pour la station de Montreux, la valeur élevée tient probablement à la situation particulière du site. En effet, la montagne, à laquelle est adossée Montreux, constitue un obstacle suffisant sur la trajectoire des masses d'air pour entraîner la formation de précipitations supplémentaires. Il est également possible d'invoquer pour cette station un mécanisme de type Foehn [5].

Les précipitations sont donc à l'origine d'un apport d'eau moyen annuel de 1 m sur les 580 km² de superficie du lac, soit: $580 \cdot 10^6 \pm 30 \cdot 10^6$ m³/an ou $18,4 \pm 0,9$ m³/s.

La variation autour de la valeur moyenne (1 000 mm) des précipitations sur le lac est de 35 %.

Si on se réfère à l'analyse statistique des précipitations à Genève de 1901 à 1970 (fig. 2), la période d'étude couvre un domaine allant de l'année décennale sèche (1971) à l'année centenaire humide (1965 et 1968).

b) *Les apports du bassin versant : Q_e*

1. *Le Rhône du Valais.*

La station limnigraphique, située au Pont-de-Scex à 377 m d'altitude, ferme un bassin de 5 220 km², dont 16,2 % sont couverts de glaciers. L'altitude moyenne est de 2 130 m. Signalons qu'une vingtaine de barrages, situés sur les affluents du Rhône valaisan, et dont les plus importants sont ceux de la Grande Dixence et d'Emosson, retiennent un volume d'eau évalué à $1\,230 \cdot 10^6$ m³ [6].

Sur le tableau 3 sont reportés les débits moyens annuels du Rhône valaisan [7]. La précision des mesures sur cette section est de 5 % environ. De 1963 à 1972, la moyenne est de 168,6 m³/s, c'est-à-dire proche de la valeur obtenue pour la période 1935-1972: 178 m³/s.

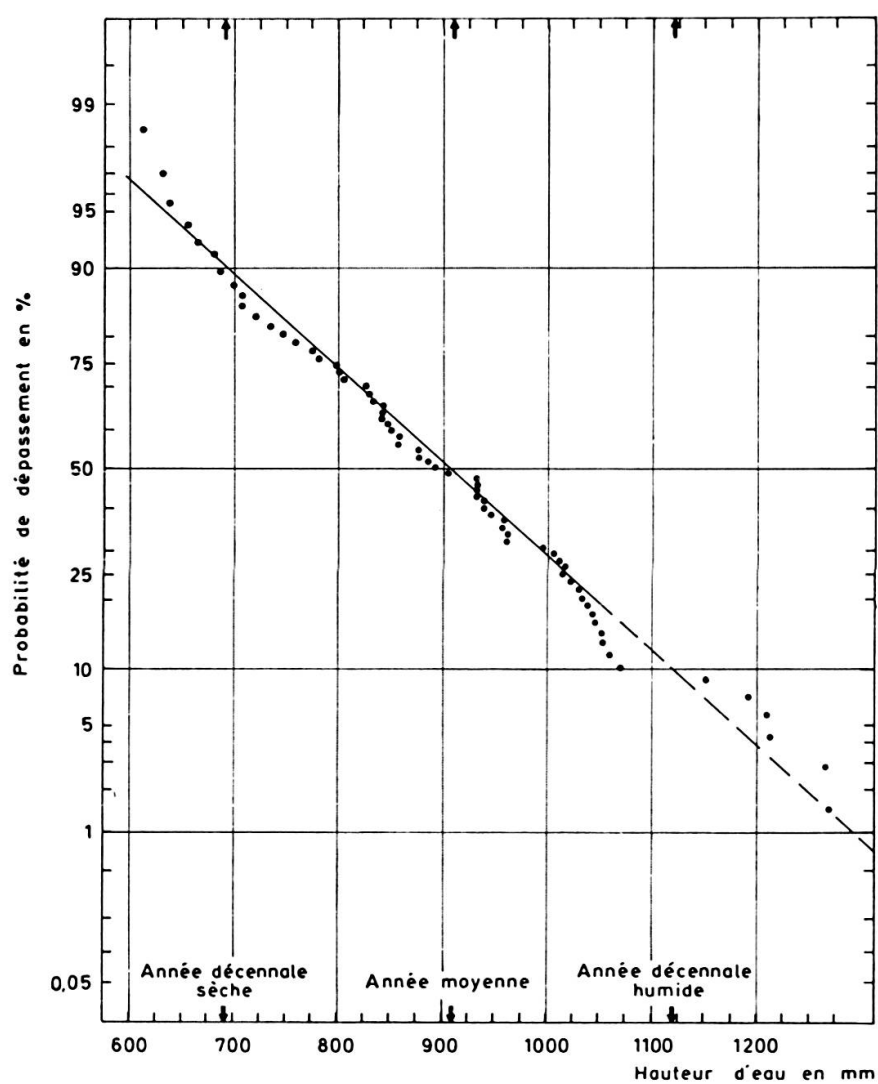
Le Rhône du Valais apporte donc au Léman le volume moyen d'eau suivant:

$$5\,317 \cdot 10^6 \pm 266 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an} \text{ ou } 168,6 \pm 8,4 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Pendant la période d'étude l'écart autour de cette valeur moyenne est de 36 m³/s, soit 20 %.

2. *Les deux canaux latéraux du Rhône valaisan.*

Juste avant qu'il ne pénètre dans le Léman, le Rhône est longé par deux canaux latéraux: le Grand Canal et le Canal Stockalper. Les débits annuels, reportés sur le



AJUSTEMENT A LA LOI NORMALE DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE
A GENEVE (Période 1901-1970)

Figure 2

TABLEAU 3

Débits moyens annuels du Rhône (Pont-de-Scex) en m³/s

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Rhône du Valais | 175 | 140 | 161 | 195 | 186 | 168 | 169 | 207 | 152 | 133 | 168,6 |

TABLEAU 4

Débits moyens annuels des canaux valaisans en m³/s

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|------------------|--------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Grand Canal | (1,70) | 1,6 | 1,9 | (1,80) | 1,6 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 2,6 | 1,85 |
| Canal Stockalper | (5,8) | 4,2 | 5,8 | (6,3) | 6,0 | 5,6 | 5,8 | 6,5 | 5,5 | 6,2 | 5,80 |

tableau 4, résultent de la moyenne des mesures de débits instantanés réalisés mensuellement [8]. La précision sur ces valeurs est de l'ordre de 10 %.

Ces deux canaux apportent annuellement au Léman :

$$243.10^6 \pm 25.10^6 \text{ m}^3/\text{an} \text{ ou } 7,7 \pm 0,8 \text{ m}^3/\text{s}.$$

3. Les petits affluents du Léman.

Ils drainent une surface de 2 200 km², soit presque la moitié de celle du Rhône valaisan, et peuvent être répartis en trois groupes suivant le substratum géologique sur lequel ils coulent.

a) *Les affluents préalpins* drainent, dans les parties orientale et sud orientale du Léman, une surface de 550 km² (à 2 % près). La Dranse du Chablais, fermée à Bioge par une station limnigraphique, occupe à elle seule 90 % de la surface. Sur le tableau 5 figurent les débits spécifiques exprimés en l/s/km², de la Dranse à Bioge (495 km² de superficie et 1 450 m d'altitude moyenne), de la Baye de Montreux à Montreux (14 km² et 1 220 m) et à titre comparatif la Grande Eau à Aigle (132 km²

TABLEAU 5

Débits spécifiques de trois affluents préalpins du Léman en l/s/km²

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Dranse à Bioge (495 km ²) | 51,9 | 26,1 | 44,0 | 54,0 | 34,4 | 47,9 | 40,4 | 64,0 | 27,5 | 32,8 | 42,3 |
| Baye de Montreux à Montreux (14 km ²) | 37,7 | 18,1 | 44,9 | 37,7 | 29,0 | 39,1 | 22,5 | 41,3 | 15,9 | 20,7 | 30,7 |
| Grande Eau à Aigle (132 km ²) | 40,5 | 22,5 | 42,5 | 47,3 | 38,9 | 42,5 | 37,5 | 50,9 | 24,2 | 25,9 | 37,3 |

et 1 560 m). Le débit spécifique des affluents préalpins a été pris comme 90 % de celui de la Dranse et 10 % de la moyenne de la Baye de Montreux et de la Grande Eau.

b) *Les affluents de la molasse* sont essentiellement situés sur la côte suisse où le substratum est constitué par de la molasse recouverte d'une mince pellicule de Quaternaire. La zone drainée est d'environ 1 250 km², à 10 % près. Il existe deux bassins représentatifs de l'écoulement de cette région, celui de la Vénoge à Lussery (165 km² et 800 m) et de la Broye à Payerne (392 km² et 710 m) [7]: tableau 6. On a

TABLEAU 6

Débits spécifiques de la Vénoge et de la Broye en l/s/km²

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Vénoge à Lussery (165 km ²) | 21,3 | 8,3 | 26,1 | 25,8 | 19,1 | 22,9 | 16,4 | 27,5 | 9,3 | 9,8 | 18,7 |
| Broye à Payerne (392 km ²) | 21,1 | 9,9 | 29,1 | 23,0 | 16,1 | 25,8 | 16,6 | 24,7 | 10,6 | 12,0 | 18,9 |

estimé le débit spécifique des affluents de la zone molassique à la moyenne entre celui de la Vénoge et de la Broye.

c) *Les affluents du Quaternaire* drainent les régions de la côte française, plateaux d'Evian et de Thonon essentiellement, où le Quaternaire a une épaisseur de plusieurs centaines de mètres. La superficie, à 10 % près, est de l'ordre de 400 km². On a utilisé les résultats obtenus (tableau 7) sur le bassin versant expérimental des

TABLEAU 7

Débits spécifiques des Blaves en l/s/km²

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|------------------------------|--------|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Blaves (16 km ²) | (10,5) | (3,0) | (16,5) | 12,0 | 7,5 | 12,1 | 10,0 | 10,5 | 3,7 | 3,3 | 8,9 |

Blaves de 16 km² et de 810 m d'altitude moyenne situé au sud de Thonon [4]. Pour les années antérieures à 1966, le débit spécifique a été évalué par corrélation avec celui de la Broye à Payerne.

TABLEAU 8

Débits spécifiques moyens des petits affluents du Léman

| | | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1063- 9172 |
|---------------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| Quaternaire (400 km ²) | | 10,5 | 3,0 | 16,5 | 12 | 7,5 | 12,1 | 10 | 10,5 | 3,7 | 3,3 | 8,9 |
| Préalpes (550 km ²) | | 50,6 | 25,5 | 44,0 | 52,8 | 34,3 | 47,2 | 39,4 | 62,2 | 26,7 | 31,8 | 41,5 |
| Molasse (1 250 km ²) | | 21,2 | 9,1 | 27,6 | 24,4 | 17,6 | 24,4 | 16,5 | 26,1 | 10,0 | 10,9 | 18,8 |
| Moyennes pondérées | l/s/km ² | 26,6 | 12,1 | 29,7 | 29,2 | 19,9 | 27,9 | 21,0 | 32,3 | 13,0 | 14,7 | 23 |
| | m ³ /s | 58,5 | 26,6 | 65,4 | 64,2 | 43,8 | 61,4 | 46,2 | 71,1 | 28,6 | 32,3 | 50 |

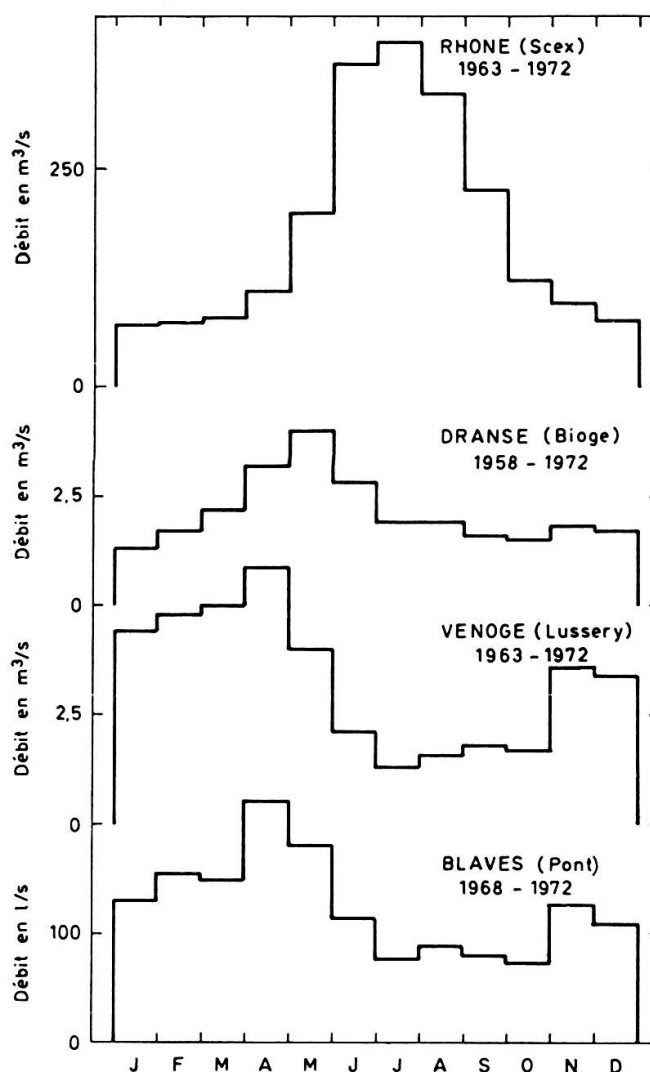
d) *Evaluation du débit.* En tenant compte de l'importance relative des trois groupes d'affluents et des débits spécifiques évalués sur les bassins équipés, on a calculé le débit spécifique moyen des petits affluents du Léman (tableau 8), en pondérant chaque domaine avec sa superficie. Pour la période 1963-1972, ce débit est de 22,7 l/s/km², soit $1\,575 \cdot 10^6$ m³/an. La précision sur cette valeur peut être évaluée à 35 % (5 % sur la superficie, 5 % sur la mesure du débit et 25 % sur la représentativité du débit spécifique). Les petits affluents apportent donc au Léman:

$$1\,575 \cdot 10^6 \pm 551 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}, \text{ soit } 50 \pm 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le régime de ces affluents reflète l'altitude moyenne de leur bassin d'alimentation. Ainsi, sur la figure 3, on a porté les débits moyens mensuels de trois rivières caractéristiques: la Dranse pour le domaine préalpin, la Vénoge pour le domaine molassique et les Blaves pour le Quaternaire. A titre de comparaison figurent également les débits moyens du Rhône valaisan.

Pour les bassins versants de basse altitude moyenne, la Vénoge et les Blaves (800 m), les débits élevés provoqués par la fonte des neiges s'observent en avril. Ce maximum est décalé en mai pour la Dranse (1 450 m) et en juillet pour le bassin du Rhône valaisan (2 130 m) où la fonte des neiges est plus tardive.

En définitive on peut évaluer l'apport global au Léman à $7\,715.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, la participation des petits affluents étant de 21 %, celle du bassin du Rhône de 72 % et celle des précipitations de 7 %.



RÉGIME DES AFFLUENTS DU LAC LEMAN

Figure : 3

II. LES SORTIES D'EAU DU LÉMAN

a) L'évaporation à la surface du lac : E

L'évaporation est mesurée en mm à la station de Thonon-C.R.G. sur un bac Colorado et à l'évaporomètre Piche: tableau 9. La valeur du Piche est plus faible de 20 % car l'appareil est situé à l'abri du vent. Aussi l'évaporation moyenne annuelle peut-elle être évaluée à 545 mm à 25 % près.

TABLEAU 9

Hauteurs de l'évaporation annuelle à Thonon-C.R.G., en mm d'eau

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Bac | 510 | 615 | (545) | 605 | 566 | 524 | 528 | 540 | 482 | 531 | 545 |
| Piche | (410) | 485 | (410) | 465 | 407 | 402 | 420 | 423 | 458 | 465 | 435 |

On a porté sur la figure 4 les valeurs moyennes mensuelles pour la période 1966-1970 des divers paramètres affectant l'évaporation à la station de Thonon-C.R.G. On remarque le déphasage entre la température de l'air et de l'eau de surface et surtout la forte humidité relative qui ne descend pas en dessous de 73 % et limite ainsi l'évaporation. En effet l'évaporation potentielle à Thonon est de 650 mm alors que l'évaporation mesurée n'est que de 550 mm.

La figure 5 illustre les variations comparées, de 1963 à 1972, de la température de l'eau à la surface du lac, du pourcentage de calme à Genève [9] et de l'évaporation à la surface du lac. Il faut remarquer la constance de l'évaporation qui ne répercute que faiblement les écarts thermiques de l'eau en surface. Si on compare les années « chaudes »: 1963, 1964 et 1971 avec les années « froides »: 1965, 1968 et 1972, on constate que l'évaporation reste sensiblement constante. Le facteur essentiel pourrait donc être le vent dont la fréquence est très comparable d'une année à l'autre.

L'évaporation enlève donc au lac:

$$316.10^6 \pm 80.10^6 \text{ m}^3/\text{an}, \text{ soit } 10 \pm 2,5.10^6 \text{ m}^3/\text{s}.$$

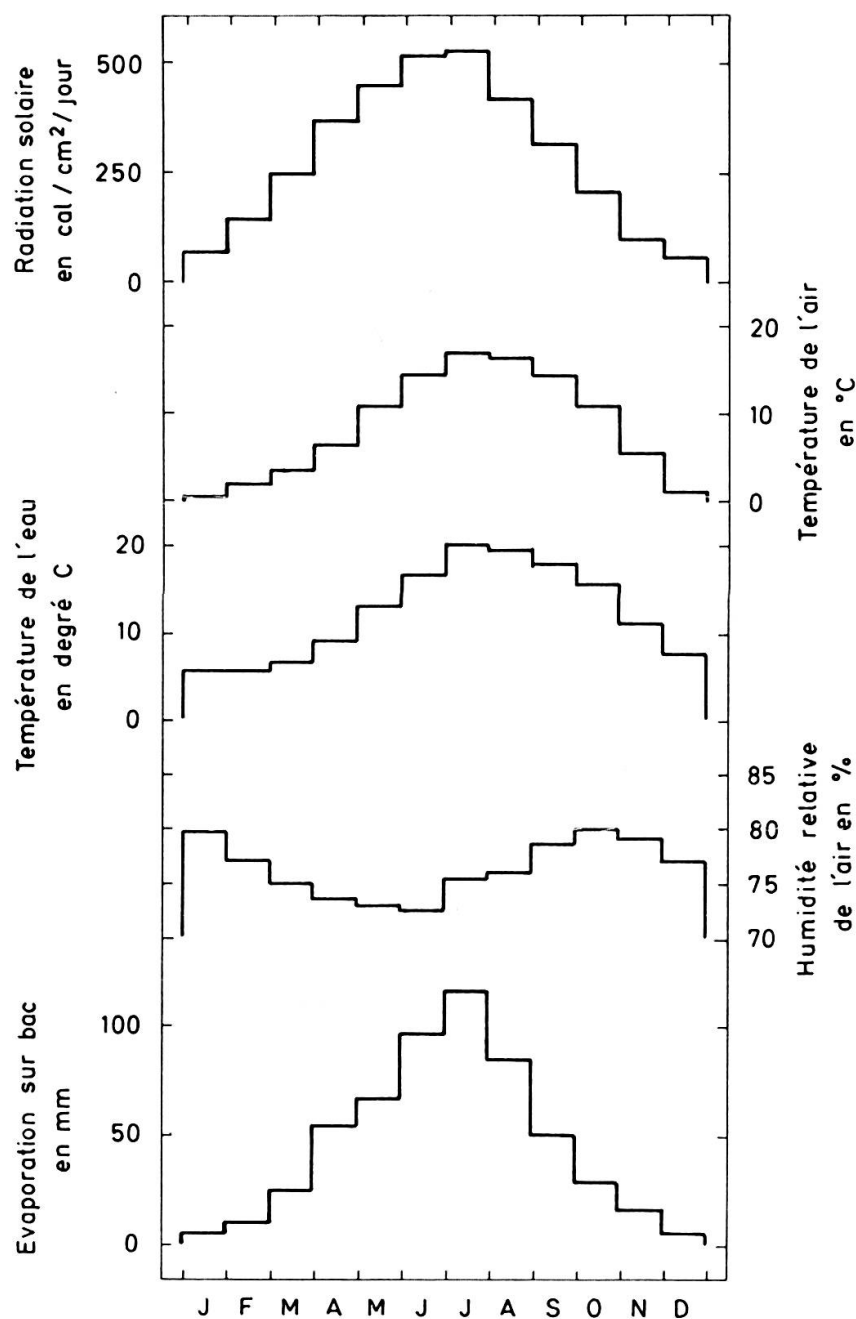
b) *Le Rhône à Genève : Q_s*

La station limnigraphique est située à Pont-Sous-Terre (369 m) et ferme un bassin de 8 000 km² occupé par 10,6 % de glaciers et dont l'altitude moyenne est de 1 670 m. Le débit moyen du Rhône est de 228 m³/s (tableau 10) pour la période 1963-1972. Il est donc comparable à celui de la période 1935-1972: 239 m³/s.

TABLEAU 10

Débits moyens annuels du Rhône à Genève (Pont-sous-Terre) en m³/s

| 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1963-1972 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| 247 | 167 | 245 | 266 | 248 | 240 | 226 | 285 | 188 | 168 | 228 |

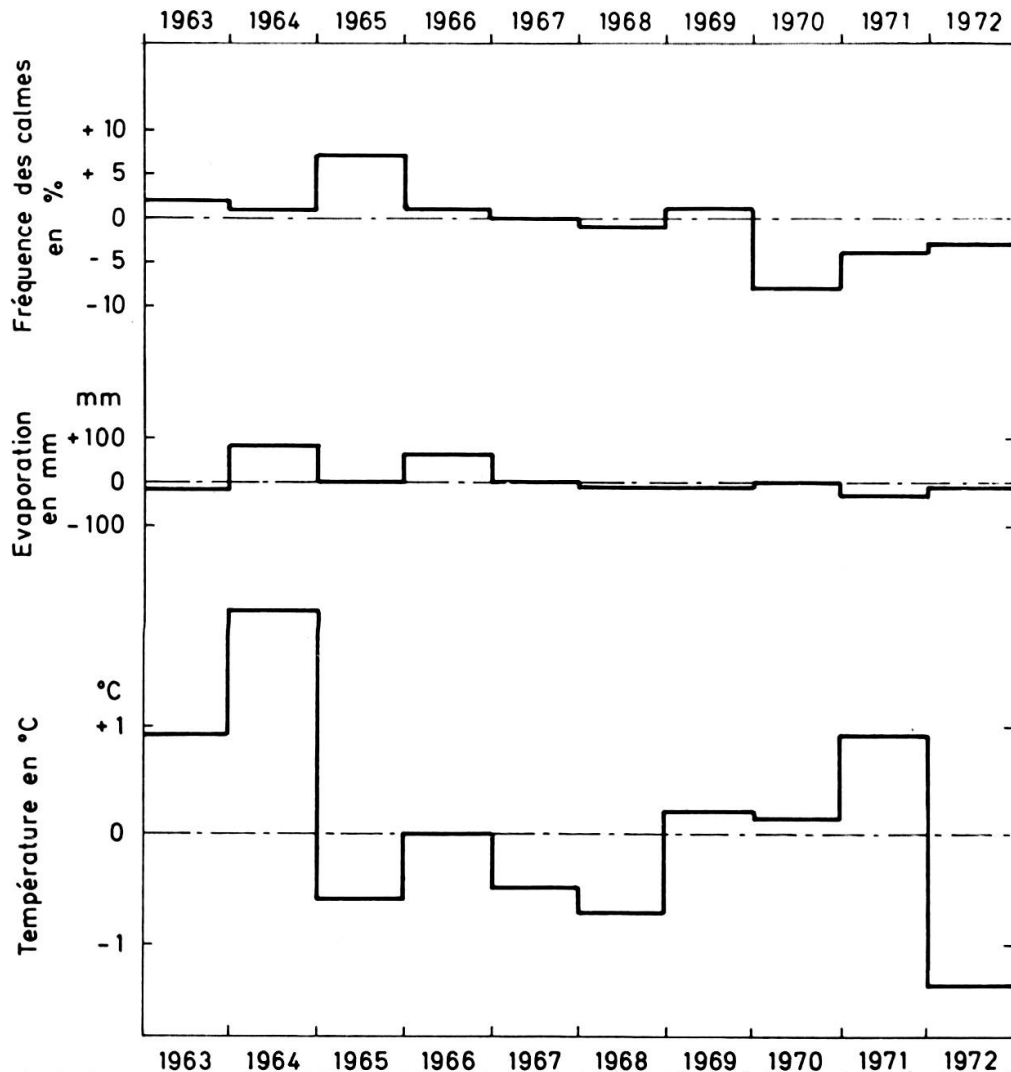


PARAMETRES HYDROMETEOROLOGIQUES A
LA STATION DE THONON (1966-1970)

Figure : 4

Compte tenu de l'erreur de 5% sur l'évaluation de ce débit, il sort chaque année du Léman par le Rhône:

$$7\,190.10^6 \pm 360.10^6 \text{ m}^3/\text{an}, \text{ ou } 228 \pm 11,5 \text{ m}^3/\text{s}.$$



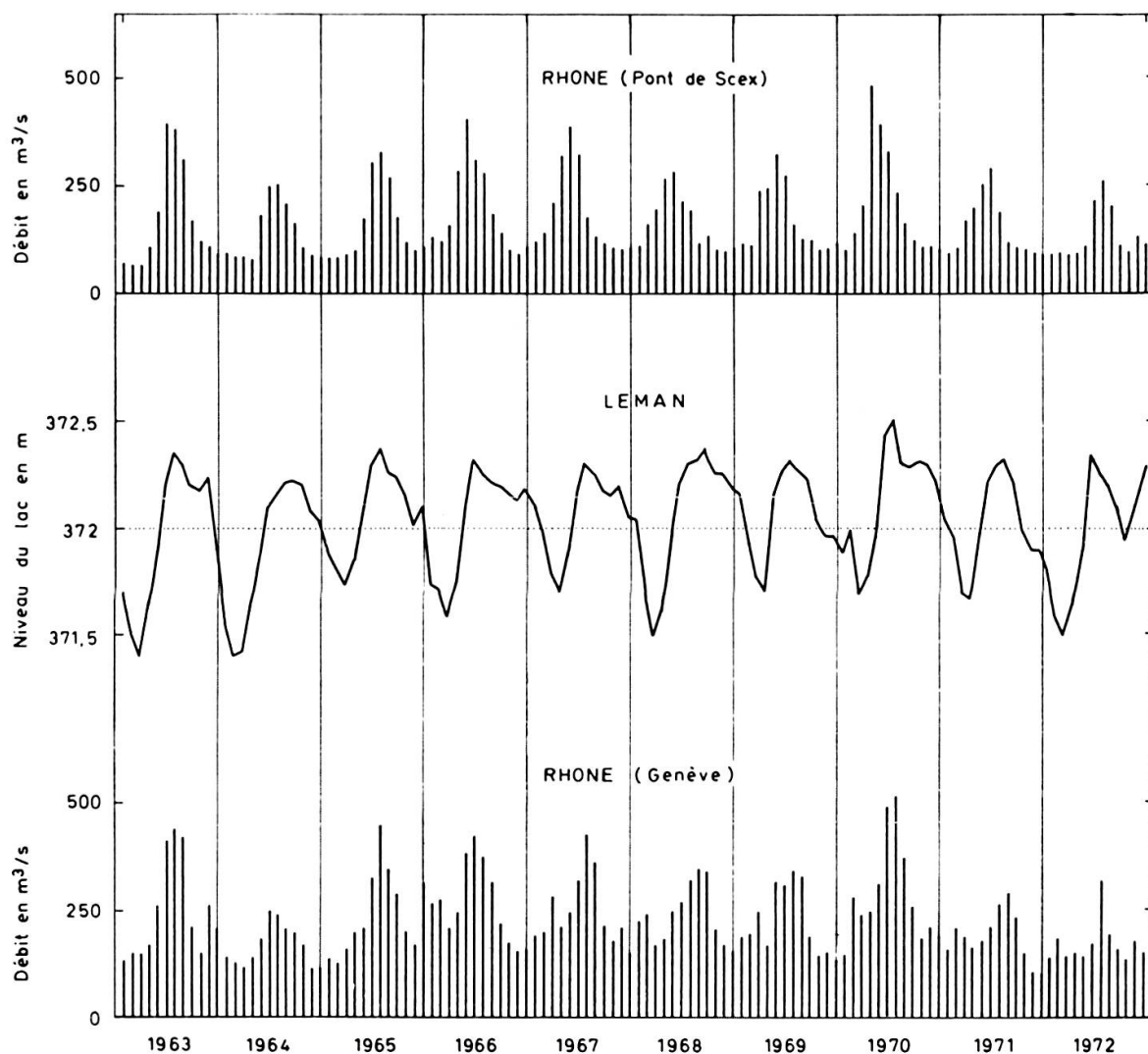
ECARTS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DE LA FREQUENCE
DES CALMES DE L'EVAPORATION ET DE LA TEMPERATURE
A LA SURFACE DU LAC

Figure : 5

c) *Variation du volume du lac : ΔV*

Le volume d'eau, écoulé à l'exutoire du Léman doit être corrigé des fluctuations du volume du lac. Ces fluctuations peuvent être évaluées à partir de celles du niveau du lac (fig. 6). Le 1/1/63 le lac était à 371,7 m et le 31/12/72 à 372,2 m, un volume de 290.10^6 m^3 a donc été stocké dans le lac, soit en moyenne $30.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Notons que ces fluctuations sont relativement faibles car le niveau du lac est régulé par des vannes à Genève.

La valeur corrigée de l'écoulement par l'émissaire du lac est donc $7\,220 \pm 360.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.



VARIATIONS COMPAREES DU DEBIT DU RHONE A SCEX ET A GENEVE ET DU NIVEAU DU LAC

Figure : 6

III. BILAN D'EAU DU LÉMAN

a) Bilan moyen 1693-1672

Les éléments du bilan sont portés sur le tableau 11. Compte tenu des marges d'erreur, le bilan peut être considéré comme équilibré avec une valeur moyenne de $240 \pm 20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Notons que ce bilan est en bon accord avec ceux établis précédemment [1, 8, 10, 11]: tableau 12.

TABLEAU 11

Bilan hydrologique du lac Léman (1963-1972)

| | 10 ⁶ m ³ /an | m ³ /s | % |
|---|------------------------------------|-------------------|-----|
| Précipitations (580 km ²) | 580 ± 30 | 18,4 ± 0,9 | 7 |
| Rhône du Valais (5 220 km ²) | 5 560 ± 290 | 176 ± 9 | 72 |
| Petits affluents (2 200 km ²) | 1 575 ± 550 | 50 ± 18 | 21 |
| TOTAL DES ENTRÉES | 7 715 ± 870 | 244,4 ± 27,9 | 100 |
| Evaporation (580 km ²) | 316 ± 80 | 10 ± 2,5 | 4 |
| Rhône à Genève (8 000 km ²) | 7 220 ± 360 | 229 ± 11,5 | 96 |
| TOTAL DES SORTIES | 7 536 ± 440 | 239 ± 14 | 100 |
| Valeur moyenne adoptée (1963-1972) | 7 570 ± 630 | 240 ± 20 | |

b) *Bilan annuel de 1693 à 1972*

L'ensemble des résultats figure sur le tableau 13. Pendant la période d'étude, la variation de ce bilan atteint 2 000.10⁶ m³, soit 25% du volume moyen mobilisé (fig. 7). Un calcul des apports en nutriments au lac, pour être significatif, doit donc être fait à l'échelle annuelle.

Le déficit pluviométrique de 1964, 1971 et 1972 apparaît nettement sur le tableau 2 ainsi que sur la figure 6, alors que les années 1965 et 1968 (années centenaires humides)

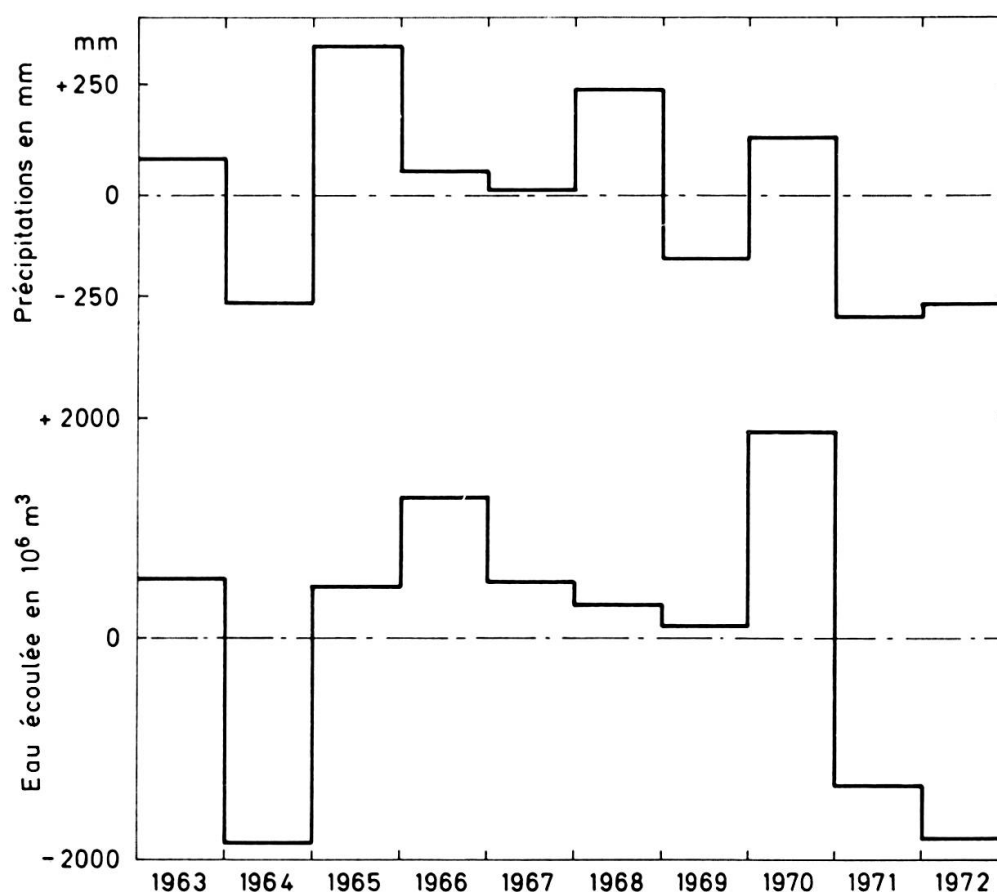
TABLEAU 12

Bilans hydrologiques du lac Léman en m³/s

| | Forel | Blavoux <i>et al</i> | Burkard | Meybeck | Siwertz <i>et al</i> |
|-------------------|--------------|----------------------|---------|---------|----------------------|
| Précipitations | ≈ 18 | 19 | — | — | 18,4 ± 0,9 |
| Rhône du Valais | 150 | 181 | 205 | } 231 | 176 ± 9 |
| Petits affluents | 17 < Q < 983 | 48 | 49 | | 50 ± 18 |
| TOTAL DES ENTRÉES | | 248 | | | 244,4 ± 27,9 |
| Evaporation | 14 | 16 | — | — | 10 ± 2,5 |
| Rhône à Genève | 253 | 243 | 226 | 238 | 229 ± 11,5 |
| TOTAL DES SORTIES | 267 | 259 | | | 239 ± 14 |

TABLEAU 13
Bilans hydrologiques annuels du lac Léman en $10^6 m^3$

| | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Précipitations | 628 | 448 | 781 | 615 | 593 | 722 | 498 | 658 | 420 | 440 |
| Rhône du Valais | 5 755 | 4 598 | 5 320 | 6 405 | 6 105 | 5 338 | 5 569 | 6 790 | 5 024 | 4 472 |
| Petits affluents | 1 845 | 839 | 2 062 | 2 025 | 1 381 | 1 936 | 1 457 | 2 242 | 902 | 1 020 |
| TOTAL DES ENTRÉES | 8 228 | 5 885 | 8 163 | 9 045 | 8 079 | 7 996 | 7 524 | 9 690 | 6 346 | 5 932 |
| Evaporation | 296 | 357 | 316 | 351 | 328 | 304 | 306 | 313 | 280 | 308 |
| Rhône à Genève | 7 789 | 5 267 | 7 726 | 8 389 | 7 821 | 7 569 | 7 127 | 8 988 | 5 929 | 5 298 |
| Variation du niveau du lac | -58 | +174 | -116 | +232 | -58 | +116 | +174 | +58 | -290 | +406 |
| TOTAL DES SORTIES | 8 027 | 5 798 | 7 926 | 8 972 | 8 091 | 7 989 | 7 607 | 9 359 | 5 919 | 6 012 |



ECARTS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES PRECIPITATIONS
 SUR LE LAC ET DU VOLUME D'EAU ECOULE ANNUELLEMENT
 DANS LE BASSIN VERSANT DU LEMAN

Figure : 7

ne se traduisent pas par une forte augmentation du volume écoulé. Il faut donc admettre que la pluviométrie, bien qu'excédentaire (40 % des précipitations annuelles de juillet à septembre), n'est pas entièrement parvenue au lac par suite de l'évaporation. Par contre, l'année 1970 avec des précipitations inférieures à 1965 et 1968 entraîne un fort écoulement. Il faut y voir la conséquence de l'enneigement exceptionnel de l'hiver 1969-1970: 785 mm d'équivalent en eau ont été enregistrés de novembre 1969 à avril 1970 aux Favrats à 930 m d'altitude sur le bassin de Thonon (490 mm durant la même période de l'hiver 1970-1971). Cette importance de l'enneigement a entraîné une augmentation considérable du débit des affluents de montagne du Léman.

IV. RENOUVELLEMENT DES EAUX DU LAC

Le lac est un réservoir dont l'eau se renouvelle par le jeu des apports et des sorties d'eau. En admettant que le lac, dont le volume est V , est en équilibre hydrologique avec un débit moyen d'alimentation et de perte Q , le temps de renouvellement est égal à $\tau = V/Q$ soit 12 ans dans le cas du Léman. Les études isotopiques entreprises depuis 1964 ont permis d'aboutir aux résultats suivants [12], reportés sur le tableau 14:

TABLEAU 14
Renouvellement des eaux du Léman

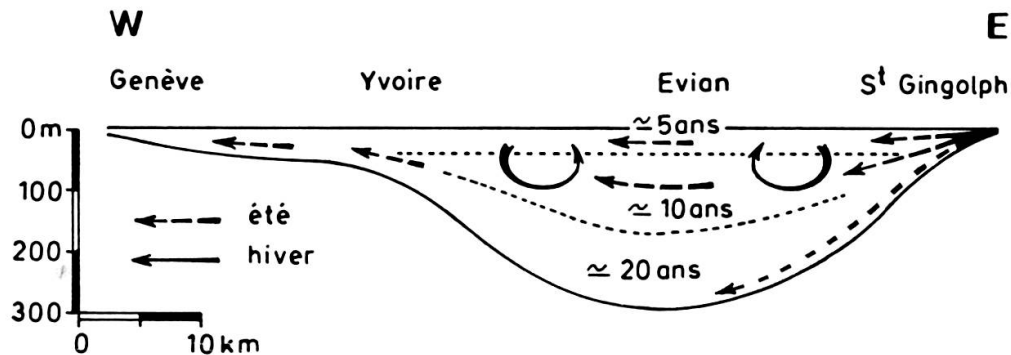
| couches d'eau | % du volume des eaux | temps de renouvellement moyen |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| superficielle: 0 à \simeq 50 m | \simeq 30 % | \simeq 5 ans |
| moyenne : \simeq 50 à 200 m | \simeq 55 % | \simeq 10 ans |
| profonde : \simeq 200 à 310 m | \simeq 15 % | \simeq 20 ans |

Au printemps et en été, l'aspect dominant résulte de l'arrivée des rivières en crue qui impulsent le renouvellement des eaux du lac. Elles pénètrent dans le lac en surface où elles se propagent rapidement et à mi-profondeur où leur individualité se conservera pendant plus d'une année (fig. 8).

En hiver, au contraire, ce sont les eaux lacustres qui imposent l'aspect dominant, alors que les rivières en étiage pénètrent dans le lac en profondeur. C'est à cette époque que se développent les mouvements de convection thermique, caractéristiques de la dynamique lacustre. Ces mouvements intéressent toujours la couche superficielle mais aussi la couche moyenne avec une intensité variable suivant les hivers.

Dans la couche superficielle se développent également des courants plus ou moins aléatoires liés à la direction des vents dominants dans chaque région du lac [13].

Dans tous les cas la couche profonde conserve son individualité. Il est même possible qu'elle ne soit renouvelée qu'à la faveur des courants de turbidité qui ne se produisent qu'en période de crue. Ils peuvent probablement à eux seuls justifier un



SCHEMA DE LA DYNAMIQUE DES EAUX DANS LE LEMAN

Figure : 8

temps de renouvellement d'une vingtaine d'années. Ainsi l'homogénéité totale des eaux du Léman n'a jamais été observée depuis 1964. Cela oblige à revenir en partie sur une notion largement admise en limnologie: le retournement hivernal des eaux, notion d'ailleurs valable pour des lacs moins profonds, comme celui d'Annecy [14].

CONCLUSIONS

1) Le système lémanique peut être considéré comme à l'équilibre avec un apport de $240 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 30 litres par seconde et par km^2 de bassin versant.

2) L'incertitude de près de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ sur les apports au Léman peut masquer d'autres apports comme le ruissellement direct ou des sources sous-lacustres qui avaient été évalués par différence à $11 \text{ m}^3/\text{s}$ [11]. Cette incertitude est surtout liée au débit des petits affluents du Léman. L'installation de bassins représentatifs sur le pourtour du Léman permettra d'améliorer cette connaissance.

*Centre de recherches géodynamiques
74203 Thonon-les-Bains*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FOREL, F. A. (1892-1904). Le Léman. Monographie limnologique, t. I: 543 p. (1892); t. II: 611 p. (1895); t. IIIa: 411 p. (1902); t. IIIb: 304 p. (1904). F. Rouge, Lausanne. (Réédité par Slatkine, Genève, 1969.)
- [2] DELEBECQUE, A. (1898). Les lacs français. Béranger, Paris, 435 p.
- [3] INSTITUT SUISSE DE MÉTÉOROLOGIE. (Krähbühlstrasse 58, 8044 Zürich.)
- [4] SIWERTZ, E. (1973). Etude expérimentale par le tritium et l'oxygène-18 de l'infiltration sur les lysimètres et le bassin versant de Thonon. *Thèse*, t. I: 170 p., 41 fig., 15 tabl.; t. II: 121 p., 20 fig., 71 tabl., Paris.
- [5] LAURENT, P., M. MERCIER, C. SAMIE et B. SEGUIN (1971). Influence du lac Léman sur la climatologie régionale de la Haute-Savoie. *Lacustrine Climatology. Proc. Inter. Congr. Côme*, mai 1971, pp. 333-344.
- [6] LINK, H. (1970). Bassin d'accumulation des Alpes. *Cours d'Eau et Energie*, 9, 358 p.
- [7] ANNUAIRE HYDROGRAPHIQUE DE LA SUISSE. Office fédéral de l'économie hydraulique (Bollwerk 27, 3001, Berne).
- [8] BURKARD, P. Rapport sur les études et recherches 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.)
- [9] AUBERT, C. Centre météorologique de Genève-Cointrin, communication personnelle.
- [10] MEYBECK, M. (1971). Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. *Thèse*, 245 p., 56 fig., 30 tabl., Paris.
- [11] BLAVOUX, B., B. DUSSART, H. MANEGLIER et Cl. SALVETTI (1962). La région du Léman au point de vue hydrométéorologique. *Le Globe*, 102, pp. 49-68.
- [12] HUBERT, P. (1972). Apport du tritium à la limnologie physique. Application au Léman (lac de Genève). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 18, pp. 435-441.
- [13] PLAUCHU, J. (1971). Etude des courants du lac Léman du Rhône à la frontière Vaud-Genève, 1969-1970. *Rapport du Bureau d'études et de travaux hydrologiques et d'océanologie côtière*, Genève, 98 p.
- [14] BENEDETTI-CROUZET, E. et M. MEYBECK. (1971). Le lac d'Annecy et son bassin versant. Premières données climatologiques, hydrologiques, chimiques et sédimentologiques. *Arch. Sci.* Genève, 24, 437-486.

Manuscrit reçu le 11 janvier 1974.