

<b>Zeitschrift:</b>	Archives des sciences [1948-1980]
<b>Herausgeber:</b>	Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
<b>Band:</b>	24 (1971)
<b>Heft:</b>	3
<b>Artikel:</b>	Le lac d'Annecy et son bassin versant : premières données climatologiques, hydrologiques, chimiques et sédimentologiques
<b>Autor:</b>	Benedetti-Crouzet, Edith / Meybeck, Michel
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-739715">https://doi.org/10.5169/seals-739715</a>

### **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:** 13.01.2026

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

# LE LAC D'ANNECY ET SON BASSIN VERSANT

## Premières données climatologiques, hydrologiques, chimiques et sédimentologiques

PAR

**Edith BENEDETTI-CROUZET et Michel MEYBECK**

Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon

---

### INTRODUCTION

L'intérêt scientifique pour le lac d'Annecy et sa région s'éveille à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle avec le « Voyage dans les Alpes » de DE SAUSSURE qui réalise les premiers « sondages » de profondeur. Il faudra attendre ensuite un siècle pour que BOLTSHAUSER donne les premières caractéristiques topographiques de la cuvette lacustre. Puis FOREL, le grand savant suisse créateur de la limnologie, fait en 1883 une étude zoologique et thermique. C'est en 1890 que DELEBECQUE et LEGAY dressent la remarquable carte bathymétrique du lac, grâce à plus de 3000 coups de sonde. Dès lors la topographie lacustre est bien connue et cette carte fait encore référence aujourd'hui. Quelques années après, DUPARC fait en 1894 la synthèse des connaissances acquises sur le lac qu'il complète par une très intéressante étude physico-chimique des vases superficielles, des eaux du lac et de ses affluents. Après ces études, les recherches vont se raréfier et se spécialiser. Citons les travaux de LE ROUX (1907) et de JUGET (1958) en biologie, de HUBAULT (1947), DUSSART et SUCHET (1954) en physico-chimie des eaux. En 1944, ONDE s'intéresse particulièrement à l'hydrologie du lac et de son bassin versant.

En 1966, la Faculté des Sciences de Lyon (ROUGIER-MICHAUD, 1966 et BALVAY, 1967) puis l'Institut National de la Recherche Agronomique (LAURENT et BALVAY) entreprennent une surveillance régulière de la qualité biologique du lac. Le Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon, avec notamment l'appui financier du Syndicat Intercommunal des Communes Riveraines du lac d'Annecy, entreprend une étude du lac et de son bassin versant réalisée en trois étapes :

- 1) Etablissement du bilan hydrologique et mise en évidence des caractères climatiques du bassin.

- 2) Etude qualitative et quantitative des apports dissous et solides au lac.
- 3) Etude sédimentologique du lac et de la dynamique des eaux.

Ce programme a tout d'abord été effectué par DANLOUX (1968). C'est ainsi qu'un premier bilan hydrologique a pu être réalisé pour l'année 1966-1967. Depuis 1968, M<sup>me</sup> E. BENEDETTI a continué l'établissement du bilan hydrologique pour les années 1968-1969 et 1969-1970 et réalisé les points 2 et 3 du programme. En février 1971 le Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon a transporté sur le lac d'Annecy son bateau, le « Moïse », spécialement équipé pour l'étude des lacs.

Cette note a pour but de présenter les principaux résultats de ces travaux effectués par le Centre de Recherches Géodynamiques. Les résultats complets seront publiés dans la thèse de l'un d'entre nous (E. BENEDETTI-CROZET).

## I. CARACTÈRES DU BASSIN VERSANT

### 1. HYDROLOGIE

Le bassin versant du lac d'Annecy est situé à l'extrême N. d'une des vallées transversales de la zone subalpine des Alpes occidentales, entre le massif des Bornes au N.-E. et le massif des Bauges au S.-W.

Nous résumerons les caractéristiques morphométriques dans le tableau 1:

TABLEAU 1. — *Caractères morphométriques du bassin versant*

Superficie du bassin versant	278 km <sup>2</sup>
Superficie du lac	26,5 km <sup>2</sup>
Superficie du bassin d'alimentation	251 km <sup>2</sup>
Rapport superficie: Lac/bassin total	9,5 %
Altitude maximale (pointe de la Bajula)	2 254 m
Cote du plan d'eau	446,5 m
Altitude moyenne du bassin d'alimentation	900 m
Pente moyenne du bassin d'alimentation	6 %

Les principaux affluents du lac proviennent de la partie S. du bassin (fig. 1). Le plus important est l'Eau Morte, qui représente 40% environ des apports liquides puis l'Ire (15% environ) et le Laudon (12%). Le régime des affluents est de type nivo-pluvial. Le débit moyen mensuel maximum s'observe en avril lors de la fonte des neiges, et le minimum en septembre. A ce phénomène périodique s'ajoutent les crues de redoux en hiver et les crues d'orages en été. Ces crues peuvent être très violentes, en effet la pente générale des rivières est élevée: 8,7% pour l'Eau Morte en amont de Faverges et 4,9% pour le Laudon. En raison de la forte pluviosité sur

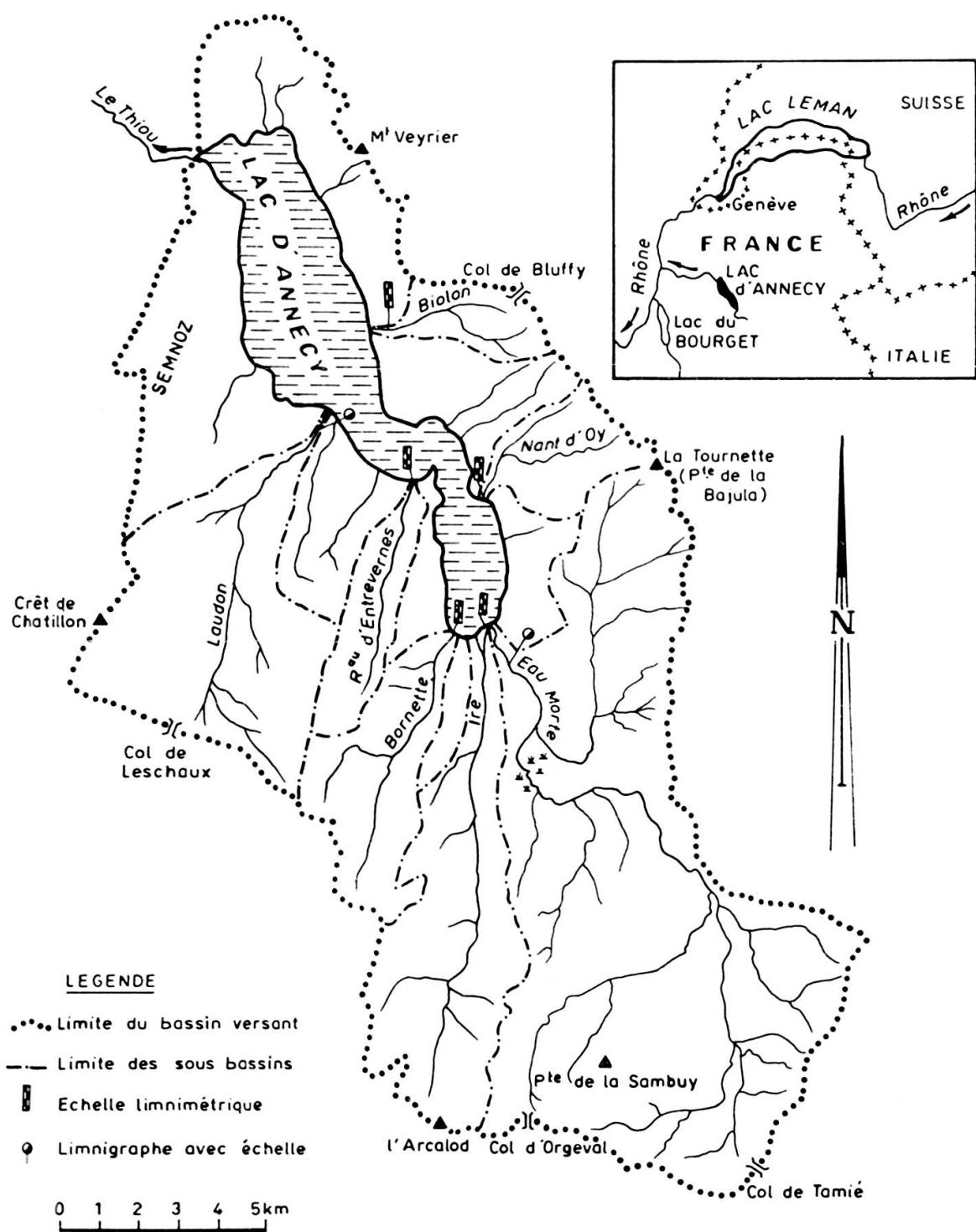


Fig. 1 - BASSIN VERSANT DU LAC D'ANNECY

RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET  
EQUIPEMENT HYDROMETRIQUE

le bassin (1450 mm), les débits spécifiques sont élevés: de 30 à 45 l/s/km<sup>2</sup>. Ce type de régime est typique des cours d'eau de moyenne altitude et d'extension glaciaire nulle, qui caractérisent ces régions comme la Dranse du Chablais (SAYAR, 1966). Une étude du ruissellement par une méthode isotopique (CROUZET *et al.*, 1970) a révélé des coefficients de ruissellement de 54% pour des crues de moyenne amplitude.

L'étude hydrologique du bassin a débuté en octobre 1966 puis s'est poursuivie jusqu'en septembre 1970. L'équipement est constitué de deux limnigraphes, l'un sur l'Eau Morte installé en septembre 1966, l'autre sur le Laudon, et d'échelles limnémétriques sur les autres affluents. (Huit en 1966-1967, sept en 1968-1969, deux en 1969-1970, relevées quotidiennement.) Les rivières étudiées représentent environ 70% des apports liquides au lac.

Nous donnons dans le tableau 2 les caractéristiques hydrologiques des rivières pour les trois années hydrologiques étudiées par le Centre de Recherches Géodynamiques: 1966-1967, 1968-1969, 1969-1970. L'étude hydrologique détaillée, qui n'entre pas dans le cadre de cet article, sera publiée ultérieurement.

## 2. PRINCIPAUX CARACTÈRES CLIMATOLOGIQUES

La région du lac d'Annecy est sous la double influence océanique et continentale. Le bassin versant, ainsi que le lac qui en occupe l'extrême N., sont orientés N.-N.-W.-S.-S.-E., tandis que les reliefs et les vallées sont disposés obliquement, selon une direction S.-S.-W.-N.-N.-E. Ainsi le lac et le bassin versant sont-ils largement ouverts aux vents du N. Le climat sera donc influencé d'une part par la morphologie (orientation des vallées, exposition des versants aux vents dominants...) et d'autre part par la présence adoucissante du lac.

En 1966, le bassin était équipé (fig. 2) de trois stations pluviométriques appartenant au Centre hydrométéorologique de l'Electricité de France, une appartenant à l'Office national météorologique, et deux à Faverges et à Annecy, cette dernière installée par les Ponts et Chaussées. Cette station comprend également une installation thermométrique (thermomètre normal à maxima et à minima), une girouette pour observation de la direction des vents, et un solarigraph<sup>1</sup>. Le réseau a été complété par 17 autres postes pluviométriques répartis sur la totalité du bassin versant. En outre 5 postes thermométriques ont été associés à des postes pluviométriques (Borny, Faverges, Tamié, Glières et Montmin). Deux stations d'évaporation (Bacs colorado) ont été installées à Glières et Saint-Jorioz, équipées par ailleurs d'anémomètres totalisateurs pour la mesure des vitesses des vents. Les données du poste de Bluffy appartenant à un particulier ont également été utilisées. Depuis 1968, le réseau a été ramené à 14 postes pluviométriques. Les résultats présentés ici sont

<sup>1</sup> Nous remercions ici M. Laine, Ingénieur des Ponts et Chaussées d'Annecy, qui nous a aimablement communiqué les résultats de la station d'Annecy, ainsi que M. Huot, à Bluffy.

TABLEAU 2. — *Caractères hydrologiques des principaux affluents du Lac d'Annecy*  
*Moyennes des trois années hydrologiques*  
(1966-1967, 1968-1969 et 1969-1970)

Affluent	Superficie du sous-bassin (km <sup>2</sup> )	% des apports liquides <sup>1</sup>	Débit spécifique moyen (1/s/km <sup>2</sup> )	Pente moyenne	Débit moyen interannuel (m <sup>3</sup> /s)	Débit moyen du mois de hautes eaux (m <sup>3</sup> /s)	Débit moyen du mois de basses eaux (m <sup>3</sup> /s)	Débit moyen journalier maximum (m <sup>3</sup> /s)	Débit moyen journalier minimum (m <sup>3</sup> /s)
Eau Morte	91,0	42	38,5	en amont de Faverges 8,7%	3,5	6,81	0,88	40 04/02/70	0,40 30/09/70
Ire	27,6	15	44,5	3,9%	1,2	(2,6)	0,30	23 21/02/67	0,11 01/09/67
Laudon	29,5	12	35	4,9%	1,03	1,96	0,23	30 13/04/70	0,0 01/09/67
Bornette	13,2	7,0	44,0		0,58	—	—	4,9 21/02/67	0,01 02/08/67
Nant d'Oy	7,9	4	43		0,32	(0,90)	(0,06)	3,6 25/12/67	0,00 07/10/66
Ruisseau d'Entrevernes	6,7	1,5	21		0,14	0,30	0,05	3 24/06/69	0,00 01/09/67
Biolon	5,6	1,5	23		0,13	—	—	4 08/06/66	0,00 01/09/67
<b>TOTAL</b>	<b>181,5</b>	<b>83,0</b>							

<sup>1</sup> Valeur estimée.

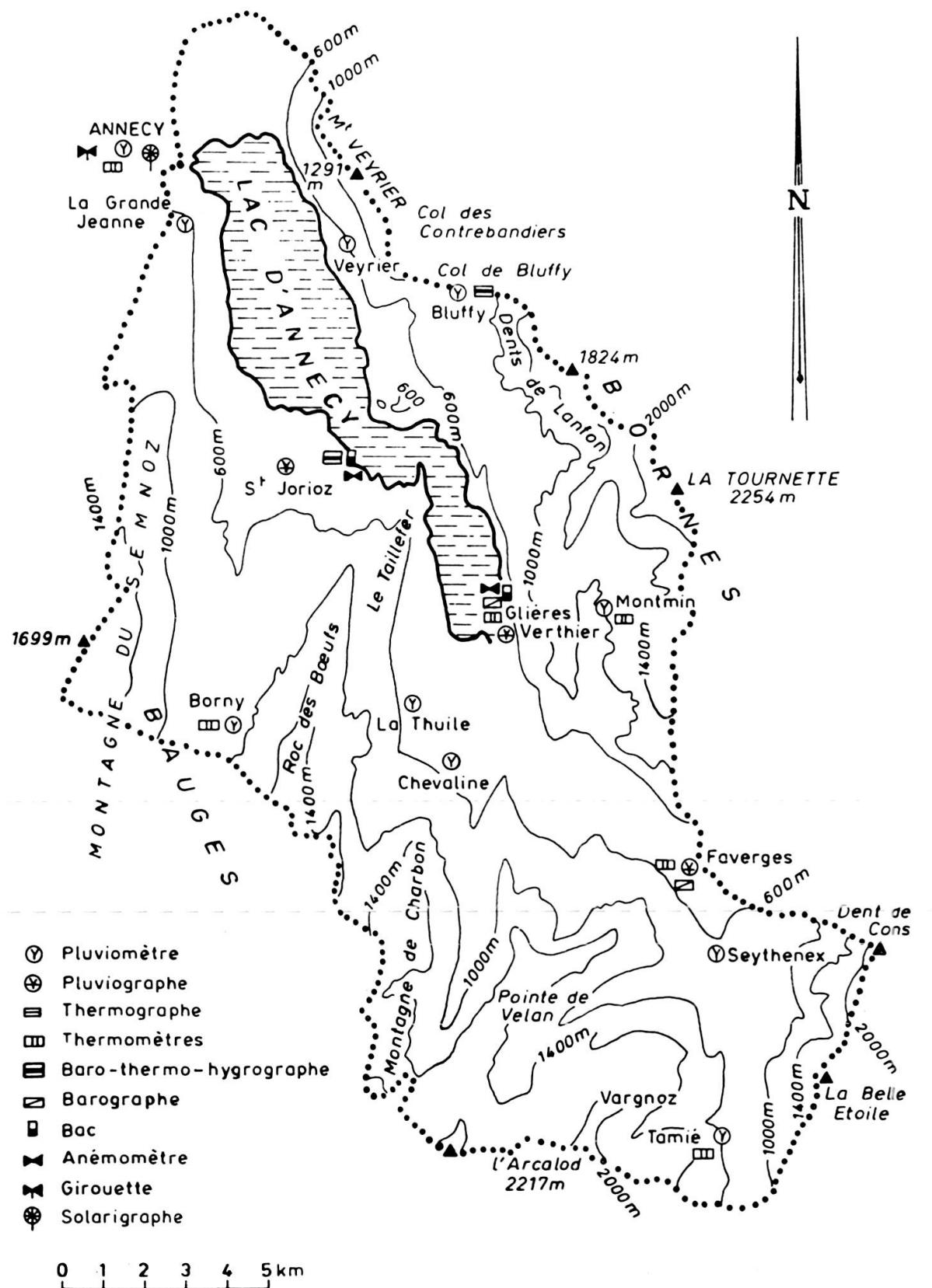


Fig : 2 - EQUIPEMENT METEOROLOGIQUE DU BASSIN D'ANNECY

en général des moyennes pour les trois années hydrologiques 1966-1967 (d'après DANLOUX), 1968-1969 et 1969-1970.

### a. *Les vents*

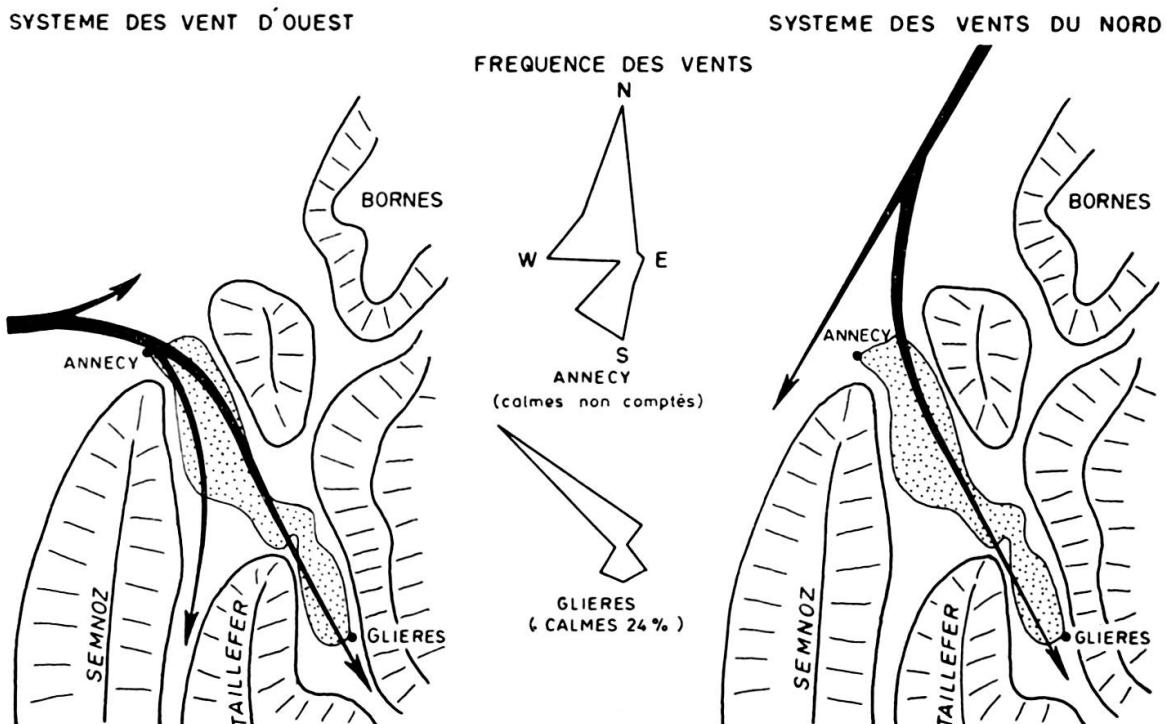
Les vents à la station d'Annecy ont fait l'objet d'une petite étude de CHEVALIER en 1959 dans laquelle cet auteur donne les principaux vents d'Annecy et le type de temps qui les accompagne. Pour notre part, nous disposons de deux stations, celle d'Annecy nous donnant la direction des vents, et celle de Glières munie d'une girouette et d'un anémomètre totalisateur relevés quotidiennement.

*Direction des vents* (fig. 3).

Les vents déterminent pour une grande part les types de temps, aussi leur étude est-elle importante. Dans cette région, les vents d'Ouest sont des vents humides d'origine océanique alors que les vents du Nord sont généralement secs. Ces deux types de vents sont largement dominants à la station d'Annecy et nous avons pu vérifier qu'en cet endroit les précipitations sont amenées essentiellement par des vents d'Ouest.

A Glières par contre, les principaux vents sont ceux du N.-W., et nous avons remarqué que dans 75% des cas lorsqu'un vent d'Ouest accompagné de pluie souffle

Fig. 3 - ROSE DES VENTS A ANNECY ET GLIERES  
REGIME DES VENTS PRINCIPAUX



à Annecy, c'est un vent du N.-W. pluvieux qui est observé à Glières et que lorsqu'il y a à Annecy un vent sec du Nord, le vent du N.-W. à Glières l'est également. *Nous pouvons donc dire qu'à Glières, les vents du Nord et les vents d'Ouest sont canalisés par la dépression du lac en un vent de Nord-Ouest, tantôt sec, tantôt humide selon son origine initiale* (fig. 3).

Un autre vent régional est le vent du Sud. Presque toujours humide, il s'accompagne généralement d'orages en été. Sa fréquence est plus faible ainsi qu'on peut en juger d'après la répartition de la fréquence des vents.

A ces vents principaux, s'ajoutent des vents locaux liés essentiellement à la topographie locale. Citons notamment le « Bauju » et le « Rumilian » qui descendant des vallées des Bauges, de direction Sud à Ouest, ils s'accompagnent souvent de pluie.

### b. *Les températures*

Les températures journalières sont calculées à partir de la moyenne des valeurs maximales et minimales mesurées. Les températures moyennes annuelles calculées sur les trois années hydrologiques étudiées sont de 10,3° C à Annecy (448 m) et de 9,5° C à Glières (448 m). A l'échelle de l'année, la température est plus basse à Glières et l'amplitude annuelle des températures moyennes mensuelles est plus faible (16,5° C à Glières pour 19,6° C à Annecy). En effet, il fait plus chaud l'été à Annecy qu'à Glières et il fait plus doux l'hiver à Glières. *Le lac a donc un effet tampon certain qui adoucit le climat, cet effet est maximum à Glières* qui est situé après le plan d'eau par rapport aux vents dominants du N.-W. Un effet analogue avait été noté par BLAVOUX *et al* (1962) pour le Léman.

Dans le tableau 3 nous indiquons les températures moyennes mensuelles calculées sur les trois années de notre période d'observation, aux stations d'Annecy, Glières et Montmin, ainsi que les minima et maxima absolus observés.

#### *Effet d'altitude.*

La station la plus élevée (Montmin 1020 m) présente, pour la période d'étude considérée une température moyenne interannuelle de 6,0° C. Compte tenu des températures moyennes interannuelles calculées de la même façon sur les 7 stations, nous avons pu déterminer *un gradient thermométrique négatif de 0,6° C pour 100 m*, ce qui est tout à fait comparable aux valeurs observées dans le Chablais au voisinage du Léman (BLAVOUX, 1969).

La région du col de Bluffy qui présente une température beaucoup plus élevée, n'a pas été considérée en raison de son orientation particulière, plein Sud, créant un microclimat.

### c. *Les précipitations*

L'influence océanique se traduit sur le bassin d'Annecy par une pluviosité importante. La moyenne calculée à Annecy sur les quatre-vingt-quinze dernières

TABLEAU 3. — *Températures moyennes mensuelles, maxima et minima journaliers absolus observés pour trois années hydrologiques (1966-1967, 1968-1969 et 1969-1970)*

années est de 1300 mm. En raison des températures et de la pluviosité, le bassin est très enneigé en hiver: l'épaisseur de neige dépasse 2 m sur les sommets où la neige subsiste huit mois par an environ. Le mois le plus pluvieux est généralement février. Le mois d'octobre est le plus sec.

Nous donnons dans le tableau 4 les moyennes mensuelles et annuelles calculées à partir de nos trois années d'observation pour 8 stations. Nous avons ainsi déterminé *un gradient pluviométrique positif de 70 mm/100 m* pour l'ensemble du bassin ce qui est également comparable aux observations faites dans le Chablais (BLAVOUX, 1969: 65 mm/100 m). *Pendant la période étudiée il est tombé 1450 mm d'eau en moyenne sur le bassin et environ 1250 mm au niveau du lac et plus de 2000 mm sur les sommets.*

TABLEAU 4. — *Pluviométrie moyenne calculée sur 3 années hydrologiques de 8 stations*  
(en mm)

	Annecy (448 m)	Faverges (510 m)	Glières (448 m)	Montmin (1 020 m)	St-Jorioz (468 m)	Chevaline (514 m)	Veyrier (505 m)	Seythenex (733 m)
Octobre	64	58	78	65	65	48	63	55
Novembre	115	128	137	157	144	158	132	136
Décembre	118	150	150	188	124	130	144	136
Janvier	69	73	79	98	77	63	85	82
Février	125	152	150	188	148	155	139	165
Mars	75	99	93	123	87	96	104	123
Avril	117	133	144	141	144	150	131	138
Mai	117	101	98	128	110	109	131	98
Juin	109	103	125	129	131	127	134	101
Juillet	93	90	89	104	85	87	85	126
Août	90	104	99	122	108	107	98	105
Septembre	67	84	76	92	84	74	76	95
<b>TOTAL</b>	<b>1 160</b>	<b>1 275</b>	<b>1 320</b>	<b>1 535</b>	<b>1 310</b>	<b>1 305</b>	<b>1 325</b>	<b>1 360</b>

#### d. *L'humidité atmosphérique*

L'humidité relative est mesurée à Annecy grâce à un psychromètre de station relevé le matin à 9 h. La valeur moyenne annuelle sur trois ans est de 66,5%; il y a un maximum en décembre (77%) et un minimum en juin et juillet (58%). L'humidité relative au niveau du lac a été mesurée à Glières depuis 1966 à l'aide d'un psychromètre fronde. La moyenne annuelle observée pendant l'année hydrologique 1966-1967 est de 85% (J. DANLOUX), valeur nettement plus élevée qu'à Annecy en raison de l'influence lacustre que nous avons déjà notée.

TABLEAU 5. — *Humidité moyenne mensuelle en % à Annecy (1968, 1969 et 1970)*

Janvier	76
Février	69
Mars	62
Avril	60
Mai	61
Juin	58
Juillet	58
Août	64
Septembre	63
Octobre	73
Novembre	74
Décembre	77
MOYENNE	66,5

e. *L'ensoleillement*

L'ensoleillement est mesuré à Annecy à l'aide d'un solarigraphe exploité par les Ponts et Chaussées. Les totaux annuels ont été consignés dans le tableau suivant:

TABLEAU 6. — *Ensoleillement en nombre d'heures à Annecy*

1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
2 261	1 665	1 757	1 944	1 665	1 848	1 590	1 721	1 993	1 762	1 748	1 573

f. *L'évaporation*

L'évaporation a été mesurée à la station de Glières sur bac « type Colorado » de 1 m<sup>2</sup> et 0,60 m de profondeur, associé à un pluviomètre pour la mesure de la tranche d'eau tombée. Le niveau du bac est remis à zéro toutes les semaines. L'évaporation a été mesurée depuis 1966. Nous avons voulu comparer les valeurs ainsi obtenues aux valeurs du déficit d'écoulement D en mm calculé par la formule de TURC. Cette formule s'exprime ainsi:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ avec } L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

avec P: précipitations annuelles en mm, et T: température moyenne annuelle en °C. Dans le tableau 7 nous donnons pour trois années les valeurs de l'évaporation mesurée et du déficit d'écoulement calculé, les différences entre les deux ne sont que de l'ordre de 10%. *Les pourcentages évaporés sont autour de 45% et varient nettement d'une année à l'autre.*

Remarquons que l'année hydrologique 1969-1970 a été plus fraîche, moins ensoleillée et plus arrosée que les années précédentes, le rapport évaporation/précipitation est donc le plus faible. Il nous est actuellement difficile de déterminer à l'intérieur de quelle marge varie l'évaporation au niveau du lac faute de longues séries de mesures. L'évaporation au bord du Léman a été déterminée de la même façon de 1966 à 1970: pour cette période, l'évaporation représente de 44% à 61% des précipitations selon les années (E. SIWERTZ: communication orale), ce qui est comparable à nos valeurs.

TABLEAU 7. — *Evaporation à la station de Glières*

	Octobre 66-Septembre 67	Octobre 68-Septembre 69	Octobre 69-Septembre 70
Précipitations annuelles (mm)	1 195	1 255	1 455
t° moyenne annuelle (°C)	9°5	10°0	8°9
Evaporation mesurée (mm)	720	540	555
Déficit d'écoulement calculé (mm)	525	545	525
Pourcentage d'évaporation mesurée par rapport aux précipitations	60%	43%	33%
Nombre d'heures d'ensoleillement à Annecy	1 840	1 760	1 610

### 3. GÉOLOGIE ET LITHOLOGIE

#### a. *Géologie sommaire de la région d'Annecy*

Nous ne présentons ici qu'un aperçu général sur la géologie de la région d'Annecy. On pourra se reporter pour plus de détails aux travaux de GERMAIN (1894), LEROUX et MORET (1920), LUGEON (1900), pour la tectonique et la stratigraphie, et de DELEAU (1969) pour le Quaternaire.

Le bassin versant du lac est situé dans la zone la plus externe des Alpes ou zone subalpine. Il débouche au Nord sur la zone molassique. Le bassin correspond à l'emplacement d'une vallée transversale, comme celles de l'Arve ou de l'Isère, et sépare le massif des Bornes au Nord du massif des Bauges au Sud.

Les sédiments les plus anciens rencontrés sont du Jurassique. Le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur sont représentés par des dépôts marneux (synclinal de Leschaux) et calcaires. Ces derniers formant actuellement les falaises des barres Tithonique (chaîne de Saint-Germain) et Urgonienne (Dents de Lanfon, Taillefer).

Dès le début du Crétacé, se produisent dans cette zone des mouvements précurseurs des plissements alpins. Une zone de fracture, située au niveau du lac actuel et dirigée S.-E.-N.-W. vers le Vuache se dessine et coupe obliquement les chaînons déjà formés des Bauges et des Bornes.

Au Miocène, l'ensemble de la région est occupé par un lac dans lequel se dépose la molasse, sédiment essentiellement détritique provenant de l'érosion active des massifs pendant cette période d'orogénèse. Ce dépôt affleure surtout dans la vallée du Laudon.

Les mouvements paroxysmaux suivront cette phase de sédimentation, replissant cette région (anticlinal du Semnoz, synclinal perché du Charbon). La zone de fracture dont nous avons parlé rejoue et décale les plis les uns par rapport aux autres et crée une zone d'abaissement d'axe. Ainsi d'après LE ROUX et MORET (1920), le synclinal des Contrebandiers correspondrait au vallon d'Entrevernes. A la fin du Tertiaire la dépression du lac existe vraisemblablement.

Au Quaternaire la région est périodiquement recouverte par les glaciers. Il ne subsiste actuellement dans la région d'Annecy que les dépôts de la dernière glaciation (Würm). La zone actuelle du lac est alors occupée par une langue glaciaire ainsi que ses vallées affluentes, le tout se raccorde à un grand glacier situé plus au N.-E. Ces glaciers forment des moraines jusqu'à l'altitude de 900 m environ (DELEAU, 1969), et des torrents déposent des alluvions fluviatiles composées de cailloux et d'argile, formant notamment un barrage au nord du lac actuel.

A la fin du Würm il y a une période de reculs et d'avancées des glaciers. Barré au nord, le glacier opère un important surcreusement à l'emplacement du lac actuel. Lors des phases de déglaciation, un affluent dépose une masse considérable de cailloux dans la plaine des Fins. Lors du retrait du glacier, il y a environ 15 000 ans, un ancien lac se forme déjà.

D'après GERMAIN (1894) et DELEAU (1969) ce premier lac était beaucoup plus grand et s'étendait de Faverges jusqu'à la Mandallaz au nord où des dépôts lacustres ont été trouvés à Epagny. Le Fier, qui en était l'émissaire s'écoulait vers le N.-E. entre la Mandallaz et la montagne d'Age. A ce moment cet émissaire doit creuser son lit dans ses propres alluvions post-glaciaires et laisse deux séries de terrasses visibles à Brogny. Le lac, soumis aux différentes variations climatiques post-glaciaires, a sans doute vu son niveau varier jusqu'à une époque très récente.

En résumé la dépression du lac d'Annecy est tout d'abord d'origine tectonique (LE ROUX et MORET, 1920) puis est remodelée par le surcreusement glaciaire (DELEAU, 1969).

### b. *Lithologie du bassin d'alimentation*

Le bassin est situé dans des formations jurassiques et post-jurassiques, c'est-à-dire essentiellement dans une zone calcaire et marneuse. Le tertiaire n'est que faiblement représenté par la molasse miocène.

Ainsi pour l'ensemble du bassin, *les calcaires dominent (33%)*. Ils constituent les sommets en voûte (Semnoz) ou en falaise (Charbon, Roc des Bœufs, Tournette, etc.). *Les marnes représentent 30% du bassin*. Elles constituent en général les pentes et les vallées synclinale. *Le quaternaire : moraines, fluvio-glaciaire et alluvions, forme 31% du bassin versant*, il tapisse toute la bordure du lac et les vallées des affluents. Enfin 6% du bassin est constitué par de la molasse. Ce dépôt gréseux plus ou moins consolidé se rencontre surtout dans la vallée du Laudon où il représente 28% de ce sous-bassin. Cette vallée est la seule où les calcaires et les marnes sont moins représentés que les sédiments facilement érodables (56% de quaternaire et de molasse), nous en verrons l'influence sur la sédimentologie du lac plus loin.

## II. LES APPORTS AU LAC

### 1. APPORTS DISSOUS

#### a. *Caractères des apports dissous*

Les apports dissous au lac ont été étudiés sur 7 affluents représentant 70% des apports au lac: les prélèvements en vue d'analyses chimiques ont été effectués à proximité immédiate des embouchures. Les éléments suivants ont été systématiquement dosés:  $\text{SiO}_2$  réactive,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ . Les cations  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Sr}^{++}$  ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique, la silice, les nitrates, les chlorures par spectrophotométrie, les sulfates par turbidimétrie et les bicarbonates par titrimétrie. Avant 1969  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  étaient analysés par photométrie de flamme,  $\text{Ca}^{++}$  et  $[\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}]$  par complexométrie,  $\text{Mg}^{++}$  étant calculé par différence.

Des études particulières en crue et en régime normal ont été réalisées pour préciser le comportement des éléments azotés ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) et phosphorés (P soluble et P total) dont les résultats complets seront publiés ultérieurement. On sait que le lac d'Annecy va être entièrement ceinturé par un collecteur circulaire des eaux ménagères usées. Les travaux ont commencé en 1964 et seront terminés

en 1975. En 1971, les parties Annecy-Talloires et Annecy-Duingt étaient réalisées. Ce collecteur permettra d'éliminer les apports effectués par les égouts des villages riverains dont beaucoup se déversaient directement dans le lac ou indirectement par l'intermédiaire des rivières. Les eaux usées sont acheminées sur Annecy où elles sont traitées. Ce collecteur n'aura sans doute pas d'effets sur les apports en éléments majeurs ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , etc.) essentiellement amenés par les eaux souterraines, mais permettra de réduire la quantité d'éléments nutritifs (N et P) entrant dans le lac.

*Les eaux du bassin sont essentiellement bicarbonatées calciques*, ces deux éléments représentant plus de 90% des éléments minéraux dissous. Viennent ensuite les sulfates et le magnésium. Les faibles teneurs de ces derniers éléments s'expliquent facilement par l'absence totale de gypse sur le bassin contrairement aux rivières du bassin du Léman. *La minéralisation globale est relativement forte, allant de 250 mg/l pour l'Ire à 325 mg/l pour le Laudon.*

Nos études antérieures (MEYBECK, 1970, SIWERTZ *et al.*, 1971) montrent qu'en général les concentrations des eaux de la région sont extrêmement variables. Pour la plupart des éléments, la variation principale est due au débit mais il existe des variations secondaires dues aux saisons, aux styles d'épisodes hydrologiques, etc. En cas de pollution, ces variations « naturelles » seront complètement perturbées, en particulier les relations concentrations-débits ne pourront plus être mises en évidence. C'est pourquoi nous avons étudié tout d'abord dans chaque affluent la variation des éléments en fonction du débit.

#### *Variation en fonction du débit.*

En général les concentrations des eaux superficielles et des eaux souterraines sont différentes. Lors des crues, il y a alors dilution des eaux souterraines chargées par les eaux superficielles moins minéralisées. Il y aura ainsi diminution des concentrations quand le débit augmente suivant une loi du type:

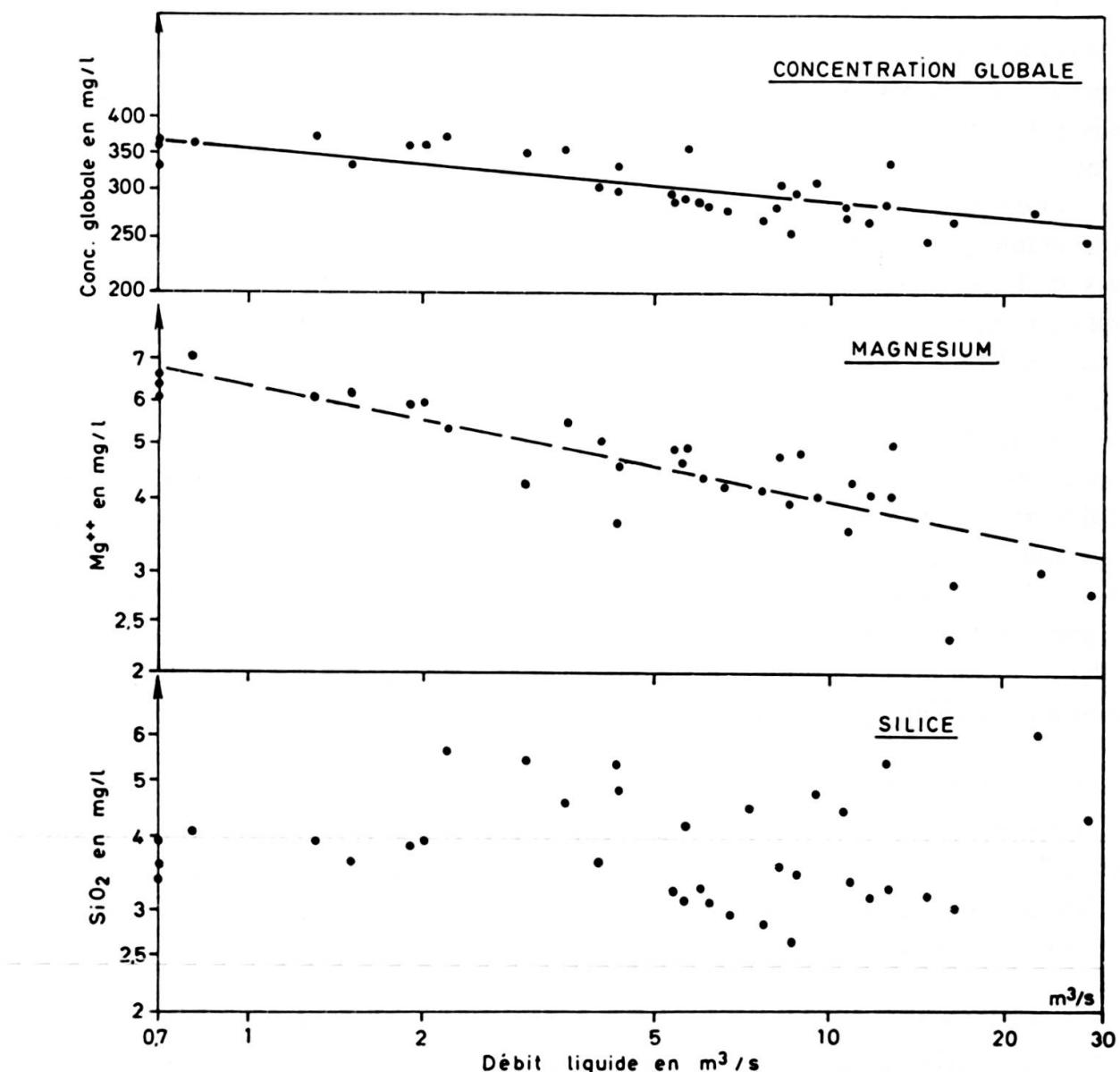
$$C_d = a Q_l^b$$

où  $Q_l$  est le débit liquide à un instant donné (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) et  $C_d$  la concentration en  $\text{mg/l}$  de l'élément considéré au même instant,  $a$  et  $b$  sont des coefficients avec  $b < 0$ .

Le graphe d'une telle fonction est une droite en coordonnées bilogarithmiques.

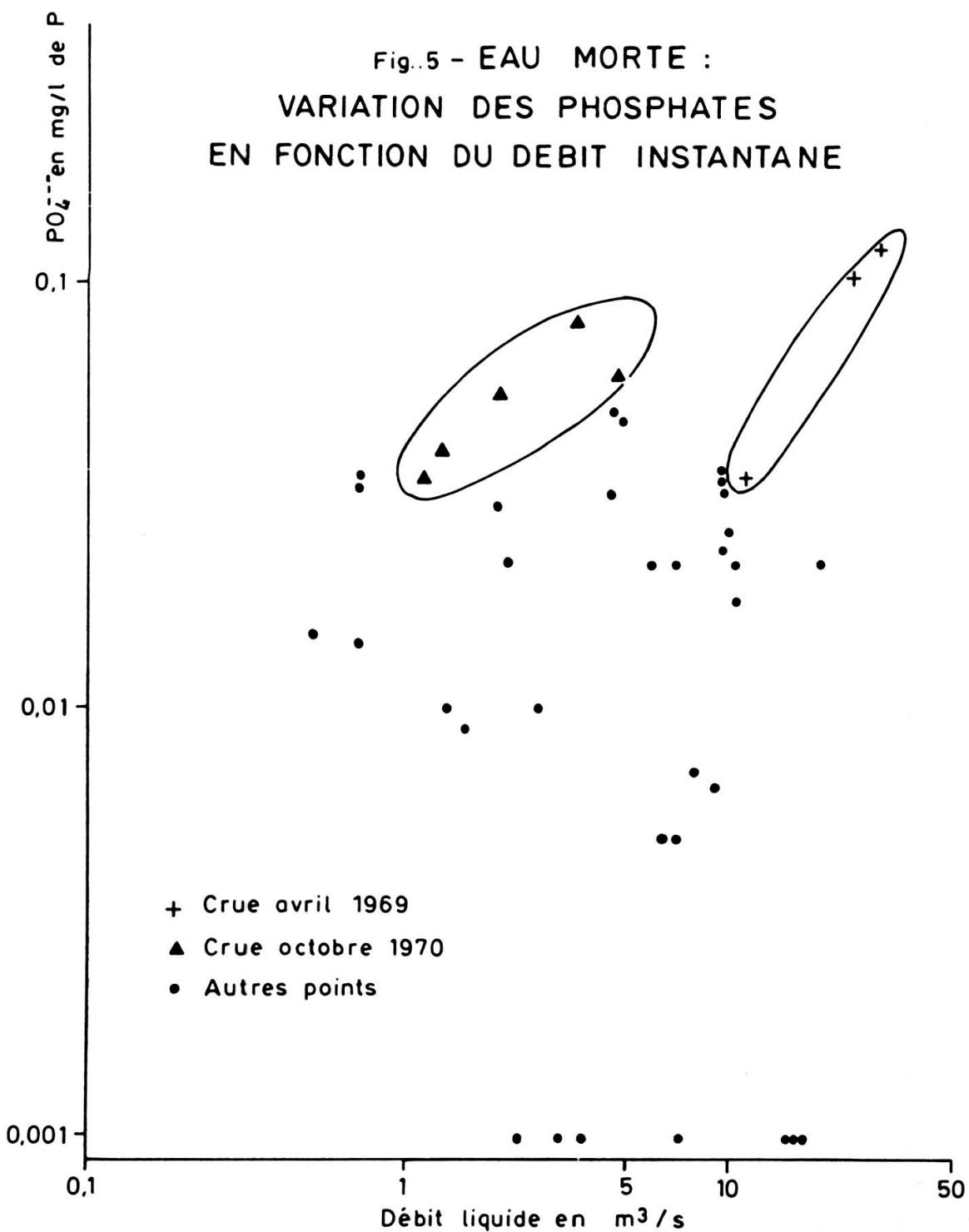
*Si sur le bassin du Léman les rivières présentent de nettes variations des concentrations avec le débit* (MEYBECK, 1970), *il n'en est pas de même pour la région d'Annecy : la plupart des éléments majeurs varient très peu*, il en sera de même des concentrations globales calculées (somme de  $\text{SiO}_2 + \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{--} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-$ ). Sur la figure 4, nous avons porté les concentrations en  $\text{SiO}_2$ , en  $\text{Mg}^{++}$  ainsi que la concentration globale calculée pour l'Eau Morte : les eaux souterraines ont donc une composition chimique voisine des eaux superficielles. Nous avons pu vérifier cette similitude par l'analyse de 14 sources sur le

Fig. 4 - EAU MORTE : VARIATION DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS DISSOUS AVEC LE DEBIT INSTANTANE



bassin versant. Les teneurs en  $\text{Ca}^{++}$  sont comprises entre 35 mg/l et 115 mg/l, les teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  entre 126 mg/l et 352 mg/l, valeurs très proches de celles observées sur les rivières. De plus nous avons déjà remarqué sur le bassin du Léman que les bicarbonates et le calcium variaient beaucoup moins que les sulfates et le magnésium et que les premiers éléments étaient soumis à des variations secondaires dépendant de la température et de la saison. Etant donné que 90 % des ions dissous sont constitués par des bicarbonates et du calcium, la constance de ceux-ci entraînera naturellement la constance de la concentration globale.

Les éléments suivants,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  et dans une moindre mesure le  $\text{Mg}^{++}$  présentent des variations de faibles amplitudes suivant les prélèvements (voir tableau 8). La silice est déjà beaucoup plus variable. Une étude sur la Dranse du Chablais (SIWERTZ *et al.*, 1971) a révélé une variation saisonnière avec un maximum des concentrations en hiver et un minimum en été. Le manque d'analyses ne nous a pas permis de chercher une telle relation.



Les nitrates et les chlorures sont plus dispersés, on peut cependant remarquer quelquefois une diminution des concentrations avec le débit. Enfin les phosphates présentent une dispersion remarquable (fig. 5). En effet pour cet élément *le phosphore naturel est le plus souvent masqué par le phosphore artificiel* provenant des sources diverses: engrais, détergents, fumier, rejets industriels, etc. Sa concentration dans les rivières dépendra surtout de l'état de lessivage du bassin, aussi a-t-on un groupement net par épisode hydrologique comme c'est le cas pour l'Eau Morte.

#### *Caractères des affluents.*

En raison de l'homogénéité lithologique du bassin, les compositions chimiques des affluents sont très proches. Les eaux sont toutes bicarbonatées calciques et, à part l'Ire (252 mg/l), la concentration globale moyenne est comprise entre 293 et 393 mg/l. Nous avons reporté dans le tableau 8 les valeurs moyennes des concentrations pour les 7 affluents et le Thiou. Les rivières ne diffèrent que par leur concentration en éléments secondaire ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) ou nutritifs ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{---}$ ) plus influencés par les facteurs locaux (lithologie, lessivage, etc.). C'est ainsi que le Biolon a de fortes valeurs en sodium et chlorures, probablement dues à des pollutions et que le ruisseau d'Entrevernes n'a presque pas de magnésium (1,4 mg/l). Les éléments nutritifs sont encore plus variables et il est d'autant plus difficile d'en faire l'étude car pour certaines rivières le collecteur circulaire des eaux usées a été mis en place pendant l'étude. Notons que pour l'Eau Morte et le ruisseau d'Entrevernes, non encore atteints par le collecteur au moment de notre étude, les teneurs en nitrates sont relativement élevées (0,4 mgN/l et 1,0 mgN/l). Pour le Laudon les valeurs sont également fortes (0,6 mgN/l) et il est encore difficile de juger de l'efficacité du collecteur mis en service pour ce bassin en automne 1970.

Le bilan des apports dissous au lac d'Annecy sera discuté plus loin dans la partie consacrée aux caractères chimiques du lac.

#### *2. Les apports en suspension*

L'évaluation de la masse de sédiments apportés en suspension au lac est fondamentale pour l'étude de la sédimentation actuelle dans le lac d'Annecy. Elle nous permettra également de connaître l'érosion détritique qui s'opère sur l'ensemble du bassin.

La mesure des apports en suspension au lac d'Annecy a débuté en 1968: c'est la première étude de ce type effectuée sur le bassin versant. Un bilan complet n'était guère possible vu le nombre important d'affluents que nous aurions dû contrôler, aussi nous nous sommes limités à l'évaluation des apports en suspension de l'Eau Morte, principal affluent et qui a fait l'objet de très nombreuses mesures, et du Laudon. Vu leurs caractères morphologiques, il est vraisemblable que le Laudon et l'Eau Morte représentent les valeurs extrêmes de l'érosion détritique sur le bassin.

## du Lac d'Annecy en mg/l (1968-1971)

Affluent	SiO <sub>2</sub>	Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-	SO <sub>4</sub> --	HCO <sub>3</sub> -	NO <sub>3</sub> - enN	Concentration totale
Eau Morte	3,9	69,0	4,7	1,2	0,90	1,0	9,1	215	0,40	305
35 mesures	2,6	55,0	2,3	0,7	0,60	0,2	5,4	175	0,05	250
	5,9	80,0	6,8	1,8	1,8		13,5	260	0,88	370
Laudon	M	5,2	72,0	5,7	1,9	1,7	6,7	230	0,60	325
20 mesures	Min.	2,8	65,0	3,8	1,1	1,0	4,8	205	0,27	295
	Max.	7,7	80,0	8,2	4,3	4,7	9,2	275	1,9	380
Ire	M	2,4	59,0	2,8	1,4	0,60	0,5			
19 mesures	Min.	0,67	52,5	1,4	0,6	0,25	0,1			
	Max.	4,0	67,5	3,8	2,3	1,15	1,1			
Ruisseau	M	3,1	72,5	1,4	0,60	0,25	10,0			
Entrevernes	Min.	2,35	59,0	0,39	0,53	1,0	4,3	175	0,10	250
15 mesures	Max.	4,2	84,0	3,4	3,20	5,2	14,5	205	0,01	220
Bornette	M	2,9	70,0	1,7	1,4	2,2	8,3	215	1,0	305
14 mesures	Min.	2,0	56,0	0,78	0,59	1,0	0,86	170	0,46	245
	Max.	4,5	78,0	2,5	2,80	5,2	3,8	265	2,0	380
Nant d'Oy	M	3,6	71,0	3,0	1,4	0,70	0,9			
16 mesures	Min.	2,75	63,0	0,58	0,69	0,40	0,0			
	Max.	4,95	79,0	6,0	2,3	1,75	2,05			
Biolon	M	4,6	90,0	3,6	4,1	1,6	6,9			
14 mesures	Min.	(0,66)	82,0	0,78	1,6	1,2	2,35	16,0	0,6	395
	Max.	6,4	101,0	5,5	9,3	2,85	11,5 (18,5) <sup>1</sup>	230	0,30	360
Thiou	M	2,7	50,5	3,6	1,6	0,9	1,6			
15 mesures	Min.	0,46	41,5	3,1	0,90	0,75	1,05	10,5	0,06	195
	Max.	3,72	53,0	3,9	1,85 (3,65) <sup>1</sup>	1,10	2,10 (4,75) <sup>1</sup>	170	0,26	245
Concentration moyenne des appports étudiés										
		3,65	68,0	4,0	1,4	1,0	1,15	9,4	210	0,38
										300

<sup>1</sup> Ces valeurs maximales, dues sans doute à des appports extérieurs, n'ont pas été prises en compte pour la moyenne.

Nous extrapolerons ensuite les données de ces deux affluents aux affluents secondaires, pour arriver à une évaluation globale des apports en suspension au lac.

Il n'est pas dans notre propos ici d'étudier en détail la variabilité des concentrations en suspension, ceci sera développé ultérieurement par l'un d'entre nous (E.B.C.) Il est bien connu que la principale cause de variation est le débit liquide, mais à débit égal, des augmentations extrêmement fortes peuvent s'observer lors de la montée des eaux en crues, la place de la crue lors de hautes eaux (la première crue étant toujours la plus « turbide »), l'origine de la crue (orage, fonte des neiges, etc.). D'autre part, nous avons pu vérifier que la « crue solide » précède toujours la crue liquide. Ces faits ont été remarqués depuis fort longtemps, notamment dans l'étude des apports du Rhône par FOREL (1895).

Il est extrêmement important de tenir compte des phénomènes de crue dans l'établissement des bilans. En effet, la concentration en suspension peut être multipliée par mille comme nous l'avons observé sur l'Eau Morte et le Laudon. On doit ainsi corrélérer le débit solide (Kg/s) avec le débit liquide instantané ( $m^3/s$ ) et non pas les débits moyens annuels ou mensuels.

#### *Méthode de mesures.*

Les prélèvements ont été effectués pour les deux affluents, à proximité des embouchures, et pour un très large éventail de débits; des prélèvements très nombreux et très rapprochés ont été effectués lors des différents types de crues: fonte des neiges au printemps, redoux, orages d'été. Nos prélèvements, généralement d'un litre, ont été effectués en surface, au voisinage des berges: nous avons donc là une valeur par défaut. Les échantillons ont été filtrés sur filtre Millipore  $0,45\mu$  puis les charges pesées après passage à l'étuve à  $60^\circ C$  et rapportées à 1 litre.

#### *Méthode de calcul des apports en suspension.*

Nous avons dit plus haut que la variation principale des concentrations en éléments en suspension était due au débit. La relation est de la forme:

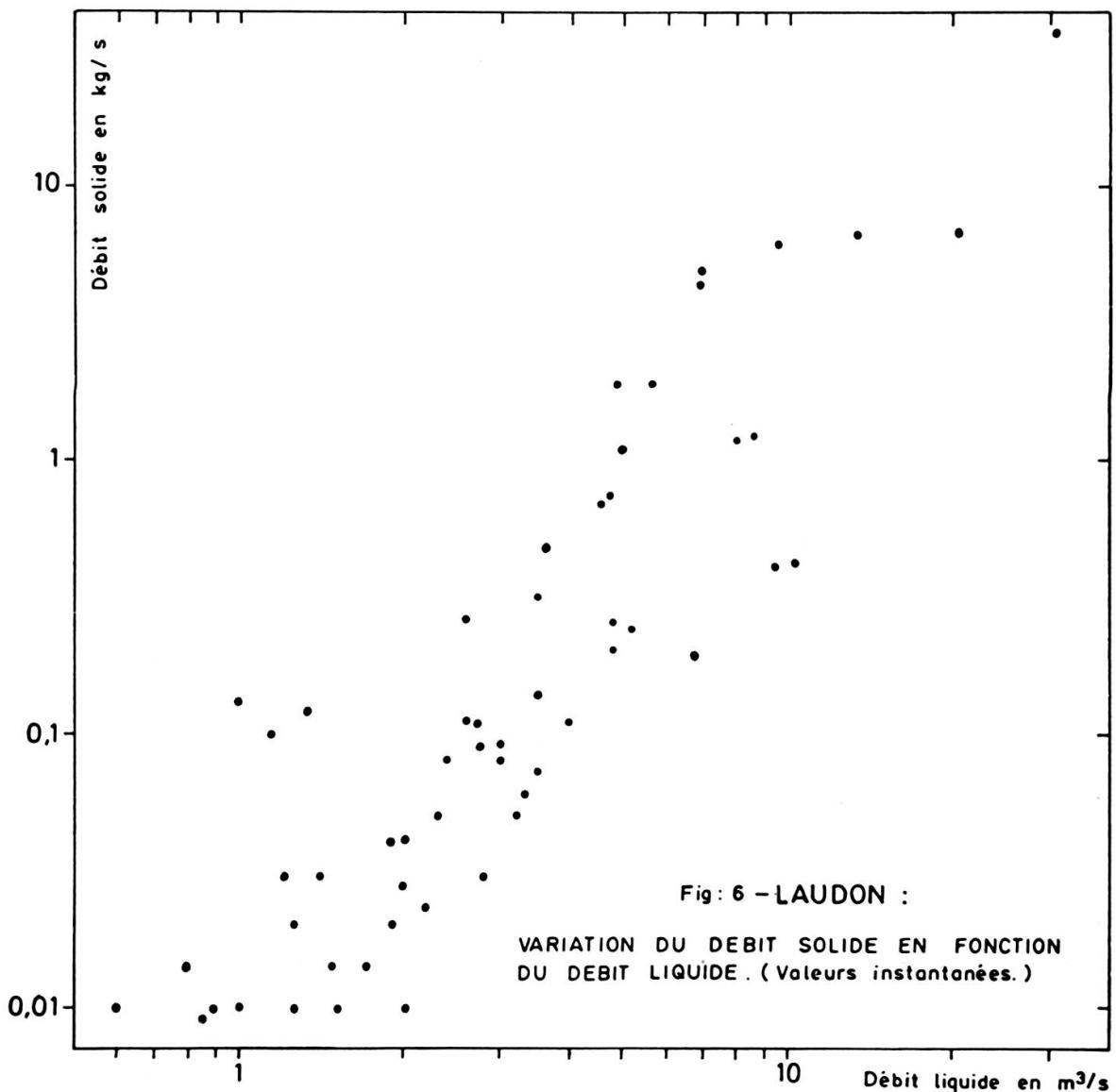
$$C_s = a Q_l^b$$

avec  $C_s$  en  $g/m^3$  et  $Q_l$  en  $m^3/s$ ,  $a$  et  $b$ : coefficients avec  $b$  toujours positif.

Cette relation a été mise en évidence pour le Laudon et l'Eau Morte. Pour l'Eau Morte nous avons par ailleurs établi des relations concentrations-débits différentes en séparant les points de montées de crues, des points de descente de crues et de tarissement.

Nous avons calculé les apports de l'Eau Morte et du Laudon mois par mois pour l'année 1969-1970, le maximum de mesures ayant été effectué durant cette période, et la quasi totalité des crues de l'Eau Morte ayant été étudiée. La quantité globale d'apports en suspension par chaque crue de l'Eau Morte a été déterminée par planimétrage du débit solide (kg/s) en fonction du temps. Pour les périodes des

basses eaux, nous avons utilisé la relation débit liquide-concentration en basses eaux, la valeur lue étant comparée à la concentration du dernier prélèvement effectué à la fin de la crue précédent cette période. Pour le Laudon, nous avons pu mettre en évidence une relation débit liquide-débit solide (fig. 6).



Nous avons ainsi pu déterminer les apports mensuels en suspension et annuels de l'Eau Morte et du Laudon. Pour illustrer le rôle joué par les crues, citons le cas de l'Eau Morte qui lors de la crue du 3 au 5 février 1970 apporta en trois jours les 2/3 du tonnage du mois entier, et le Laudon qui les 13 et 14 avril 1970 apporta 26 000 tonnes en suspension en deux jours soit plus de la moitié des apports de l'année. Les résultats sont portés au tableau 9.

Nous avons calculé les valeurs des érosions détritiques spécifiques (t/km<sup>2</sup>/an) sur la bassin de l'Eau Morte et le bassin du Laudon. En raison de la grande éroda-

TABLEAU 9. — *Apports en suspensions en tonnes de l'Eau Morte, du Laudon et des affluents du Lac d'Annecy (1969-1970)*

	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Total annuel	Erosion déritique spécifique (t/an/km <sup>2</sup> )
Eau Morte	27	1 000	97	300	2 830	525	2 350	740	3 270	485	430	26	12 000	135
Laudon	25	1 800	300	290	10 800	240	27 150	190	330	27	34	25	41 000	1 400
Ire													(22 000)	(800)
Bornette													(10 500)	(800)
Nant d'Oy													(6 300)	(800)
Ruisseau d'Entrevernes													(5 400)	(800)
Biolon													(4 500)	(800)
Affluents restant													(58 000)	(800)

( ) Valeurs estimées.

bilité du sous-sol molassique et quaternaire, *l'érosion spécifique mesurée sur le Laudon (1400 t/km<sup>2</sup>/an) est tout à fait comparable à celle observée sur la Dranse du Chablais (MEYBECK, 1971), l'Arve, etc., alors que l'Eau Morte avec 135 t/km<sup>2</sup>/an a un taux d'érosion beaucoup plus faible, lié à ses conditions topographiques et hydrographiques.* Rappelons que cette rivière a, en amont de Faverges une pente forte (8,7%), mais dans le cours inférieur, la pente devient pratiquement nulle, et la rivière se perd en un marais.

*En prenant la valeur moyenne de 800 t/km<sup>2</sup>/an pour les autres affluents, on aboutit pour l'ensemble du bassin à un apport annuel de l'ordre de 160 000 tonnes.* Cette valeur n'est évidemment qu'indicative, seule une longue série d'observations pourrait fournir une valeur précise. La valeur proposée est sûrement plus élevée que la moyenne en raison de la pluiosité importante de l'année 1969-1970.

### III. LE LAC

#### 1. BILAN HYDROLOGIQUE

Le premier bilan hydrologique fut établi par DELEBECQUE en 1898. Il estime les entrées d'eau au lac à  $356.10^6$  m<sup>3</sup> (pluie et affluents) et les sorties (émissaire et évaporation) à  $340.10^6$  m<sup>3</sup>. Sachant qu'il sous-estime l'évaporation, il croit devoir attribuer le déficit du bilan à des apports non mesurés et d'origine sous-lacustre, en particulier par la source sous-lacustre du Boubioz dont nous verrons les caractéristiques plus loin.

Nous avons établi le bilan hydrologique pour deux années 1968-1969 et 1969-1970 (voir tableau 10). Les précipitations sur le plan d'eau, les sorties à l'émissaire, les pompages, l'évaporation sont mesurées directement. La première année 7 rivières ont été contrôlées, la deuxième année seules 2 rivières ont pu être gardées (Eau Morte et Laudon). Nous avons donc dû estimer les apports des affluents non jaugés et des interfluves, pour cela nous avons attribué au restant du bassin versant un débit spécifique proche des rivières jaugées voisines. Pour 1968-1969 année moyenne, nous avons pris 25 l/s/km<sup>2</sup> pour les 70 km<sup>2</sup> restants et pour 1969-1970, année très humide, nous avons pris 35 l/s/km<sup>2</sup> pour 132 km<sup>2</sup>. En tenant compte de la variation de niveau du lac (réserve) les deux bilans s'équilibrent bien (tab. 10) malgré l'erreur importante de l'ordre de 20% pour le bilan 1968-1969, et encore supérieure pour le bilan 1969-1970. Aussi est-il très difficile dans le cas du lac d'Annecy de mettre ainsi en évidence des apports sous-lacustres: même si ceux-ci sont bien connus ils sont encore trop faibles pour être remarqués, ils sont vraisemblablement inférieurs à 2 m<sup>3</sup>/s au total. Nous verrons plus loin qu'en effet l'influence du Boubioz est limitée et que cette source est sans doute intermittente.

*Variation des niveaux du lac.*

Les amplitudes de variations du niveau du lac sont faibles, 50 cm au plus, du fait du contrôle des débits de sorties. Ce contrôle a été rendu nécessaire à cause de la rapidité de réponse du lac. ONDE (1944), qui a étudié l'hydrologie du lac avant la mise en service des nouvelles vannes des canaux du Thiou (1965), avait constaté que le lac répondait aux averses immédiatement comme une rivière et le comparait à un « immense pluviomètre ». Le lac pouvait ainsi monter de 40 cm en une nuit!

TABLEAU 10. — *Bilan hydrologique du lac d'Annecy*

	Entrées en $10^6 \text{ m}^3$	Sorties en $10^6 \text{ m}^3$	
1968-1969	Précipitations sur le plan d'eau	33	émissaire 275
	Affluents contrôlés (7)	210	pompage 11
	Affluents non contrôlés ( $25 \text{ l/s/km}^2$ )	55	évaporation 15
	Réserves (variation niveau du lac)	0,5	—
1969-1970		298	301
	Précipitations sur le plan d'eau	37	émissaire 335
	Affluents contrôlés (2)	181	pompage 11
	Affluents non contrôlés ( $35 \text{ l/s/km}^2$ )	147	évaporation 22
	Réserves	3	—
		368	368

Actuellement, ce phénomène ne se produit plus. Le niveau moyen du lac se situe à la cote 60-65 cm de l'échelle du « Pont de la route nationale 508 ». Le niveau le plus bas observé par nous est 47 cm le 23.1.69, et le plus haut: 103 cm le 4.2.70.

*Temps de renouvellement.*

*A l'aide de ce bilan hydrologique, nous avons pu évaluer à 3,8 ans le temps de renouvellement des eaux du lac.* Cette valeur est analogue à ce que donnait DELEBECQUE (en 1898), en prenant pour base un débit de  $10,7 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le Thiou.

*Les apports sous-lacustres.*

Les éventuels apports sous-lacustres seraient essentiellement *dus au Boubioz, qui est l'exemple type des sources sous-lacustres*. Celle-ci sort au fond d'un trou situé à proximité d'Annecy, au lieu dit la Puya. Elle était connue depuis fort longtemps des riverains du lac. Aux dires des pêcheurs (BOLTSCHAUSER, 1860), c'est « une immense source pouvant déverser assez d'eau dans le lac pour inonder Annecy et toute la plaine des Fins... ». Située à 200 m de la rive, elle s'ouvre en un cône de forme elliptique, jusqu'à une profondeur de 80,6 m au moins d'après DELEBECQUE

et LEGAY, qui la décrivent en se basant sur les données thermiques que nous verrons plus loin. En février 1971 notre sonde est allée jusqu'à 82 m.

*Le fond de l'entonnoir est dépourvu de vase, indiquant des arrivées d'eau, empêchant la sédimentation fine de se faire. Nous y avons recueilli des sables de granulométrie très hétérogène.*

Du point de vue géologique, cet entonnoir se trouve dans le prolongement d'une faille locale affectant les calcaires urgoniens du Semnoz. Sur l'ensemble du bassin ces formations sont souvent karstifiées. L'eau s'infiltrant à l'air libre, pourrait ressortir à la faveur de cette faille au fond du Boubioz. Mais les réseaux karstiques de la région nord du Semnoz sont mal connus. Comme nous le verrons un peu plus loin, il nous semble exagéré de dire que l'aire d'influence du Boubioz s'étend, comme l'affirment DELEBECQUE puis DUSSART (1954) à tout le Grand Lac. A plus forte raison, l'opinion des pêcheurs rapportée par BOLTSCHAUSER est une légende.

D'autres sources sous-lacustres, de plus faible importance il est vrai, existent sur le talus du lac, en particulier dans la région de Talloires, de Menthon et de Bredannaz où l'une d'entre elles sort en un petit geyser même par temps sec sous 12 à 15 m d'eau<sup>1</sup>.

## 2. Morphologie de la cuvette lacustre

Le lac d'Annecy se compose de deux cuvettes, le Grand Lac profond de 65 m, situé au nord, séparé du Petit Lac profond de 55 m par un rétrécissement formé par l'avancée du Roc de Chère et la pointe de Duingt. Cette morphologie est due à la structure géologique de la région: le Roc de Chère, considéré par LUGEON (1900) comme un bloc effondré descendu des chaînes de la Tournette, se situe dans le prolongement de l'anticlinal du Taillefer. Celui-ci s'abaisse axialement au niveau du lac. Le Roselet, îlot rocheux sous-lacustre, en est le dernier jalon. Le seuil séparant les deux cuvettes est situé entre le Roc de Chère et l'embouchure du Laudon, à une profondeur de 49 m.

D'après la carte de Delebecque et les profils d'échosondeur (82 km en tout) réalisés lors de la campagne de février 1971, on peut considérer un certain nombre d'ensembles morphologiques schématisés sur la figure 8.

Le centre des deux cuvettes est constitué par une *plaine centrale* plate et régulière. Elle se raccorde généralement à la côte par un talus de forte pente et une *beine* de pente douce et d'extension variable.

*La beine*, d'une profondeur de quelques mètres, résulte de l'action des vagues sur le rivage. Elle est extrêmement réduite dans le Petit Lac. Dans le Grand Lac par contre, elle est très étendue de part et d'autre du Laudon, où elle atteint 600 m de large, ainsi que dans la baie d'Annecy.

<sup>1</sup> Ces faits nous ont été communiqués par M. Jean Baptiste, plongeur à la ville d'Annecy.

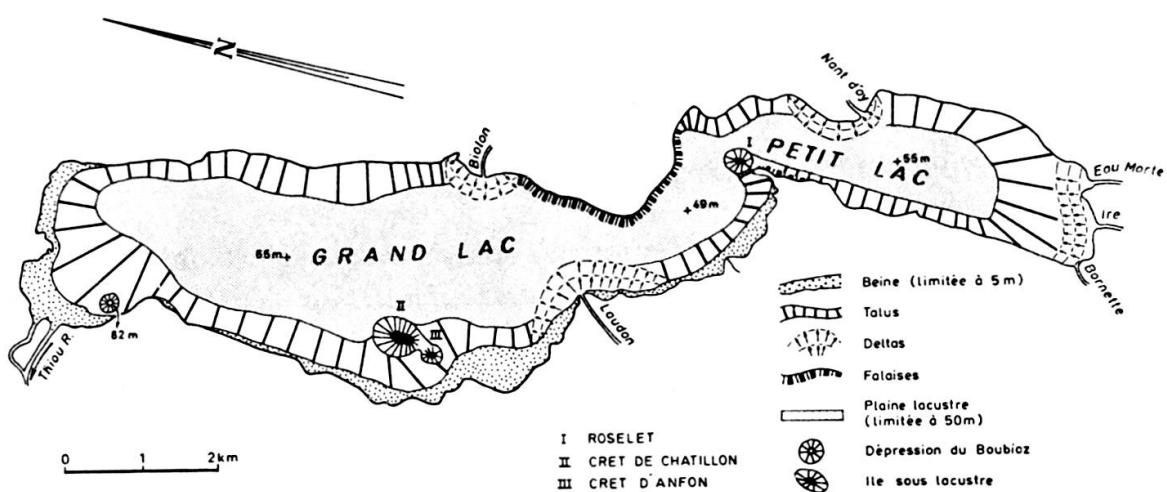
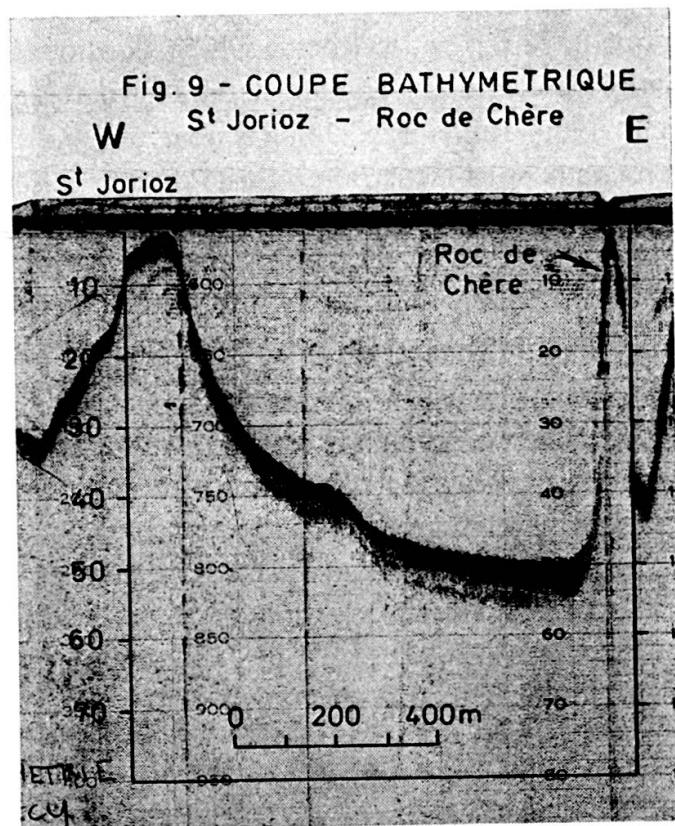


Fig. 8 - SCHEMA MORPHOLOGIQUE DU LAC D'ANNECY

Le talus est régulièrement développé autour du lac, sauf au Roc de Chère, sa pente est généralement comprise entre 4 et 40%.

Au Roc de Chère, le talus et la beine sont inexistant et à la plaine centrale succède directement une falaise presque verticale qui se prolonge à l'air libre, atteignant ainsi une hauteur totale de 100 m. Le profil bathymétrique d'échosondeur de la figure 9 illustre bien cette morphologie. La presqu'île de Duingt présente également une petite falaise au Château de Ruffy.



Le talus est localement recouvert par les *cônes de déjection* des affluents. Les principaux sont ceux du Laudon, du Biolon, du Nant d'Oy, et le delta commun de l'Ire, de l'Eau Morte et de la Bornette. Le plus vaste et le plus actif est le cône du Laudon, ceci étant lié à la nature des régions qu'il traverse et à la pente du bassin comme nous l'avons vu plus haut.

Notons que le delta de l'Eau Morte est très différent. En effet les apports de cette rivière sont beaucoup plus fins, le delta a donc une pente douce. Cette différence s'observe également pour le Léman entre les deltas du Rhône et de la Dranse. L'Ire par contre ainsi que la Bornette, sont plus actifs et comblent par des apports plus grossiers la partie méridionale du Petit Lac.

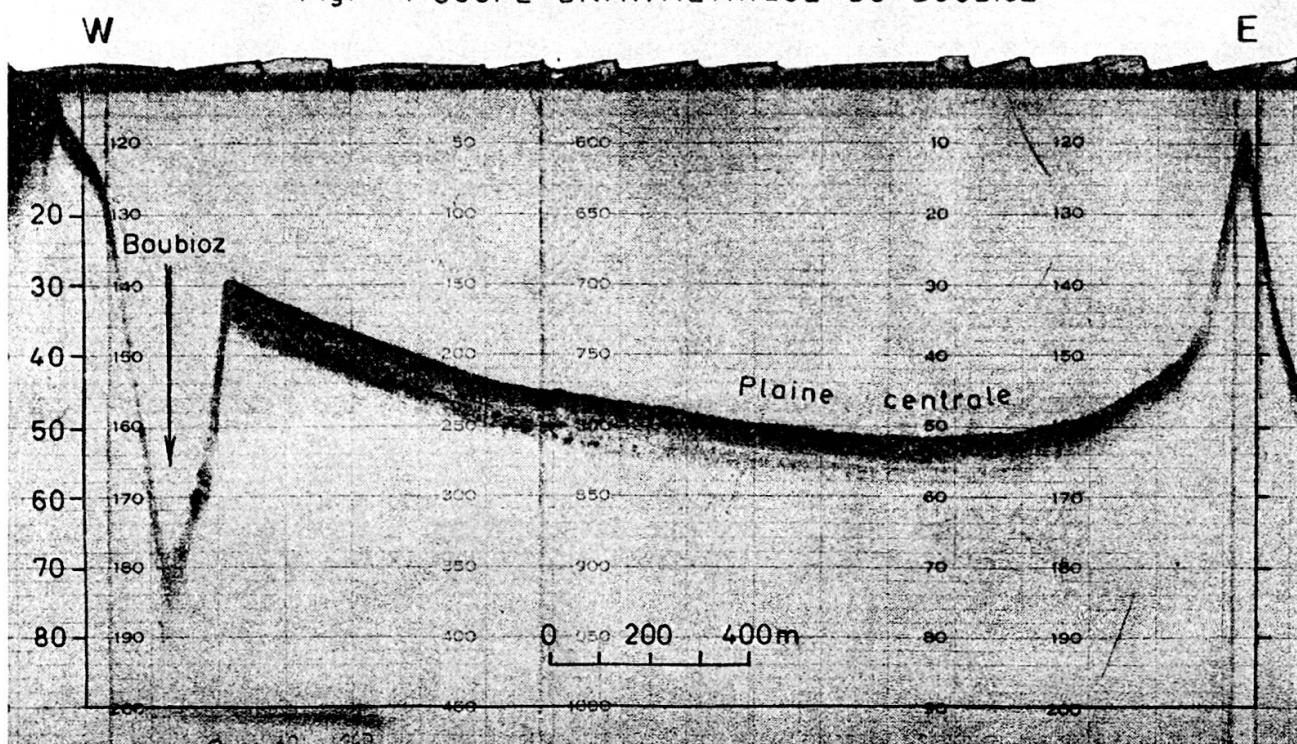
Le lac présente d'autre part de nombreuses particularités morphologiques :

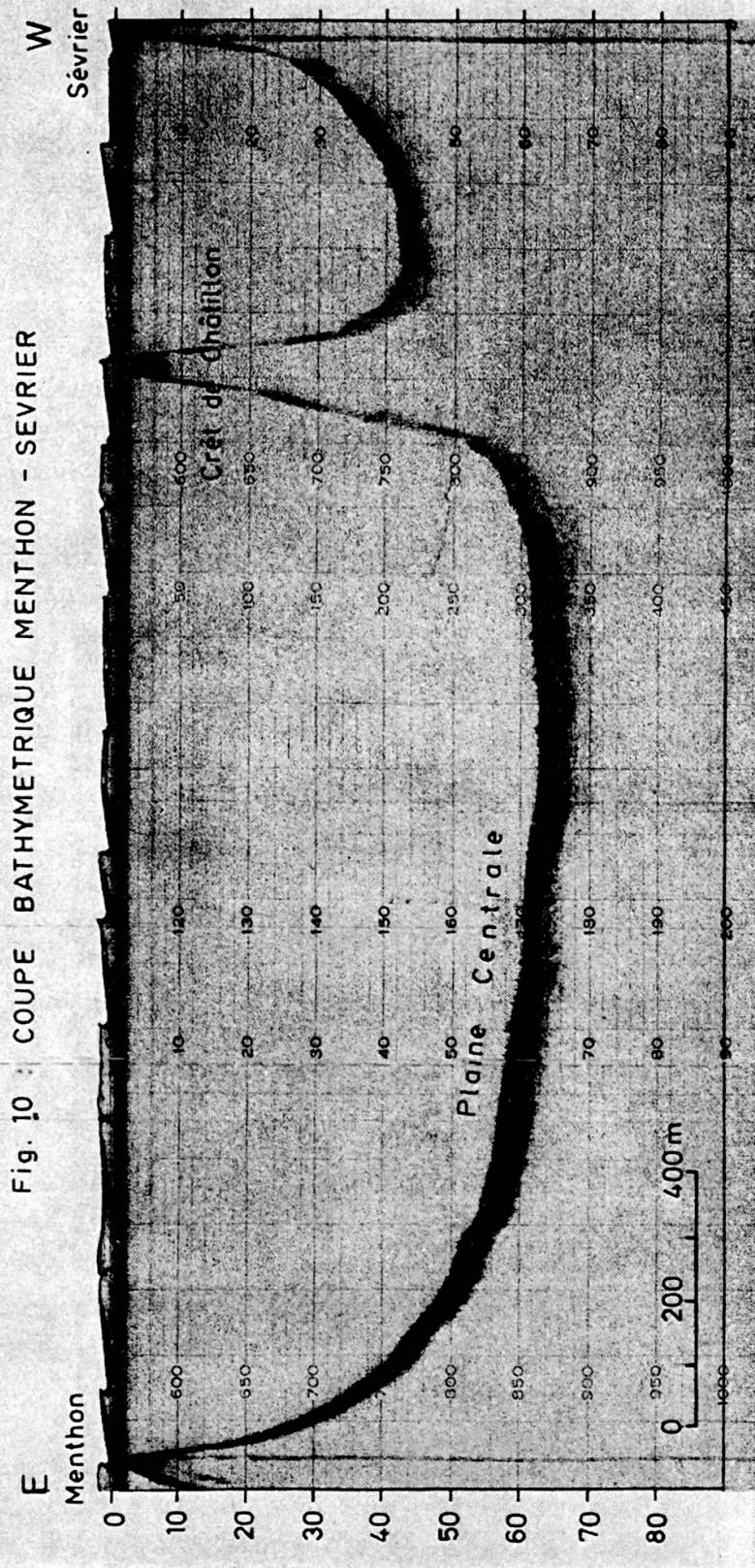
— *L'îlot du Roselet* situé sous un mètre d'eau. Il prolonge la montagne du Taillefer et est séparé de la côte par un petit chenal d'une profondeur de 17 m.

— *Les hauts fonds du Crêt de Chatillon et du Crêt d'Anfon* se trouvent sous 3 mètres et 8 mètres d'eau à une distance de 800 m et 500 m de la côte (voir profil d'échosondeur sur la figure 10). L'origine géologique de ces hauts fonds est encore difficile à préciser. Ils sont couramment considérés (DUPARC, 1894) comme des blocs ératiques.

— *L'entonnoir du Boubioz* dont nous avons parlé plus haut (fig. 7) est constitué par un cône d'une profondeur de 82 m (sondage de la campagne de février 1971); son ouverture est une ellipse de 250 m sur 200 m située par des fonds de 30 m.

Fig. 7 : COUPE BATHYMETRIQUE DU BOUBIOZ





— Enfin un peu au large du Rocher du Cyclope, vers Chavoire, se trouve un bloc de rocher immergé de 12 à 14 mètres<sup>1</sup>.

Les principales caractéristiques morphologiques du lac sont consignées dans le tableau 11.

### 3. THERMIQUE ET DYNAMIQUE DU LAC

Un lac est un milieu dans lequel interagissent 4 ensembles: la masse d'eau définie par ses propriétés physiques et dynamiques, les éléments dissous (gaz, électrolytes et matières organiques), la biomasse, enfin les éléments minéraux en suspension et les sédiments. Aussi l'étude d'un des ensembles exige nécessairement de connaître les caractères principaux des autres ensembles. Nous étudierons donc successivement les caractères de ces 4 ensembles.

TABLEAU 11. — *Caractéristiques morphométriques du lac d'Annecy*

	Lac d'Annecy	« Grand Lac »	« Petit Lac »
Altitude du plan d'eau (m)	446,5		
Superficie (km <sup>2</sup> )	26,5	20,25	6,25
Volume (km <sup>3</sup> )	1,123		
Longueur (km)	13,7	≈ 10	≈ 4
Largeur maximum (km)	3,1	3,1	1,5
Profondeur maximum (m)	65 (1)    82 (2)	65 (1)    82 (2)	55
Profondeur moyenne (m)	41,5		

(1) Plaine centrale.

(2) Boubioz.

#### a. Thermique

FOREL (1884) puis DELEBECQUE (1890) ont effectué les premières études de thermique lacustre. DELEBECQUE met en évidence l'homogénéité des températures en hiver, la stratification thermique en été et classe le lac parmi les « lacs tempérés ». D'après DUSSART (1963) *le lac est dimictique de premier ordre* c'est-à-dire qu'il présente deux périodes de stratification:

<sup>1</sup> Communication de M. Jean Baptiste, plongeur à la ville d'Annecy.

- Stratification directe en été, les couches les plus chaudes se trouvent en surface.
- Stratification inverse en hiver, les couches les plus chaudes se trouvent au fond; elles sont voisines de 4° C, alors que les eaux de surface plus froides peuvent atteindre 0° C, donc geler.

En fait la plupart du temps le lac d'Annecy est monomictique comme le Léman, en effet il ne gèle que rarement. La congélation totale s'est produite trois fois seulement au siècle dernier (1830-1880-1891). Durant la saison froide, il s'agit plutôt d'homothermie. Les eaux sont alors très proches du maximum de densité (4,2° C en surface, 4,1° C en profondeur). La stratification thermique directe est maximale en août-septembre. Le gradient de température au niveau de la thermocline, vers 10 à 15 m de profondeur, peut atteindre alors près de 7° C/m (ROUGIER-MICHAUD, 1969).

#### *Cas du Boubioz.*

Le Boubioz est un des exemples les plus spectaculaires de sources sous-lacustres. Etudiée pour la première fois par DELEBECQUE et LEGAY en 1891, la source jaillit au fond d'un entonnoir d'une profondeur de 80 m dans la baie d'Annecy (voir figure 7). Ces auteurs avaient mesuré une température au fond de l'entonnoir de 11,8° C alors que les eaux étaient gelées en surface. Cette température relativement très élevée n'a pourtant jamais été mesurée depuis et il semble que l'influence thermique soit généralement beaucoup plus faible. JUGET (1958) ne note en août 1955 qu'un réchauffement de 1,4° C entre 60m et le fond, et pour ROUGIER-MICHAUD (1969) ce gradient est encore plus faible (1° C dans les tous derniers mètres). En hiver le débit de la source doit être beaucoup plus faible. En février 1971 nous n'avons observé qu'un léger réchauffement dans les tous derniers mètres.

#### *b. Dynamique*

Le temps de renouvellement des eaux du lac, calculé en divisant le volume du lac par le volume d'eau apporté annuellement, est de 3,8 années. Nous avons essayé de préciser ce processus par la méthode isotopique déjà utilisée sur le Léman en utilisant le tritium contenu dans les eaux.

On sait que le tritium, isotope radioactif de l'hydrogène, est un traceur idéal de la molécule d'eau. Depuis 1952 le tritium artificiel produit par les explosions thermonucléaires masque complètement le tritium naturel produit par l'interaction des rayons cosmiques sur la haute atmosphère. Aussi cet isotope qui permet des études en échelle espace (traçage) et en échelle temps (datations relatives) (OLIVE, 1970) est-il particulièrement adapté à l'étude de la dynamique des lacs (CROUZET *et al*, 1969; MEYBECK *et al*, 1970; HUBERT, 1971). L'étude isotopique du lac commencée en 1967 est encore en cours. Sur la base des 60 premières analyses, nous pouvons déjà remarquer qu'il n'y a pas de différence majeure entre les eaux du Petit Lac et

celles du Grand Lac. De même il n'y a pas de différenciation isotopique des eaux que ce soit en hiver ou en été sur une même verticale.

Dans l'ensemble les eaux du lac d'Annecy sont donc très homogènes, l'âge réel de chaque molécule d'eau est donc peu éloigné de l'âge moyen des eaux du lac. Les phénomènes de mélanges sont largement dominants par rapport aux phénomènes de stratification.

C'est un comportement bien différent de celui du Léman pour lequel nous avions pu mettre en évidence trois couches distinctes, la couche profonde entre 200 et 300 m étant presque inerte (HUBERT *et al.*, 1970; HUBERT, 1971).

Cette différence ne doit pas surprendre; le lac d'Annecy est beaucoup moins profond que le Léman et encore beaucoup moins creux, aussi les phénomènes de mélange dus à diverses origines (courants de retour, mélange hivernal, etc.) y sont beaucoup plus complets.

L'étude isotopique du Boubioz confirme que l'influence de la source est bien limitée au cône: entre la surface et 30 m de profondeur les eaux ont les mêmes teneurs au-dessus de la source que partout ailleurs dans le Grand Lac.

#### 4. CARACTÈRES DES ÉLÉMENTS DISSOUS

Les études antérieures de la chimie des eaux du lac ont été réalisées essentiellement par les biologistes, aussi les données que nous possédons sont-elles limitées aux éléments les plus couramment analysés en biologie; pH, O<sub>2</sub> dissous, éléments nutritifs azotés ou phosphorés. HUBAULT en 1937, remarqua que la qualité du lac est déjà très dégradée et que le lac d'Annecy était « passant eutrophe ». Ce cri d'alarme lancé en 1947 suscite de nombreuses études parmi lesquelles il faut citer celles de SUCHET (1954), JUGET (1958), BALVAY (1967), ROUGIER-MICHAUD (1969). Ces études sont néanmoins restées pour la plupart limitées au Grand Lac et surtout au Boubioz. A la suite de ces travaux les principales connaissances de l'état chimique du lac d'Annecy étaient les suivantes:

— *Chaque année après la stagnation estivale, les eaux profondes du Grand Lac — mis à part le Boubioz — sont très pauvres en oxygène dissous, ce déficit s'est accru d'année en année depuis 1937.* La teneur près du fond étant de plus en plus faible et l'extension de la couche de moins de 1 mg/l d'O<sub>2</sub> passe de 2 m au-dessus du fond en 1937 à 4 m en 1967 (BALVAY, 1967). *Le mélange des eaux en hiver permet heureusement la réoxygénéation des eaux de fond.* Ce phénomène est remarqué par tous les auteurs. Nous avons pour notre part mesuré 9,55 mg/l d'O<sub>2</sub> dissous à 65 m de profondeur dans le Grand Lac en février 1971.

— Le comportement du Petit Lac a été moins étudié. D'après HUBAULT la désoxygénéation en été n'est pas aussi forte: 2,9 mg/l d'O<sub>2</sub> en août 1938. En février

1971 nous avons pourtant noté des teneurs plus faibles que celles du Grand Lac (4,7 mg/l d'O<sub>2</sub> à 55 m).

— Le Boubioz est nettement à part. En août 1955, alors que l'oxygène manque aux couches profondes du Grand Lac, JUGET mesure 9,3 mg/l d'O<sub>2</sub> dissous au fond du Boubioz. L'effet d'oxygénéation de la source est donc nettement sensible.

— Le pH est toujours alcalin. En hiver les eaux étant homogènes le pH est constant autour de 7,7 (BALVAY, 1967), à la fin de l'été il y a une différence nette entre l'épilimnion très alcalin (pH de 8,2) et l'hypolimnion (pH de 7,6). Cette variation du pH est analogue à celle que nous avons notée dans le Léman (MEYBECK, 1970). En septembre le pH atteint 8,2 voire même 8,4 à cause de l'activité chlorophyllienne du phytoplancton qui consomme du CO<sub>2</sub>, le pH augmente et parallèlement il y a précipitation de carbonate de calcium.

Il demeurait donc de nombreuses questions sur le comportement chimique du lac d'Annecy, concernant la composition élémentaire des eaux du lac, son équilibre avec les apports du bassin versant, les variations des éléments notamment la précipitation des carbonates. Les résultats que nous présentons ici se rapportent à deux études statiques: en juin 1966 sur 13 prélèvements de J. DANLOUX, et en février 1971 sur 27 prélèvements pris à chaque fois sur le Petit Lac, le Grand Lac ainsi que le Boubioz. Depuis novembre 1968 des analyses complètes ont été également réalisées sur le Thiou, émissaire du lac, sortant à Annecy, dans le but de réaliser un bilan chimique global.

Nous avons porté sur le tableau 12 les concentrations moyennes relevées lors de ces deux campagnes dans le lac.

En juin 1966 la stratification thermique est déjà importante et les eaux de surface accusent une légère différence par rapport aux eaux profondes notamment pour les bicarbonates et le calcium plus élevés en profondeur. La différence maximale s'observe pour la silice: 0,54 mg/l en surface et 3,6 mg/l au fond, ainsi que pour les nitrates, l'activité biologique forte en juin 1966 (BALVAY, 1967) ayant déjà utilisé une grande partie de ces éléments. Pour les autres éléments aucune différence sensible n'est à relever. Le Boubioz se distingue surtout par une teneur en silice particulière, plus faible que celle qu'on s'attendrait à avoir à une telle profondeur (la teneur en magnésium 4,6 mg/l est sans doute trop forte, rappelons que cet élément était alors dosé par différence).

En février 1971 le caractère dominant de toutes les analyses est leur grande homogénéité à la fois entre les eaux du Petit Lac et du Grand Lac, mais aussi entre les eaux de surface et de fond. En effet, le mélange des eaux est très important en hiver. La faible différence de composition entre les eaux de l'entonnoir du Boubioz et les eaux de fond du lac n'est pas étonnante: le débit de cette source ne doit pas être très important et de toutes façons la composition chimique des eaux est très

TABLEAU 12. — Concentration en éléments dissous en mg/l dans le Lac d'Annecy  
en juin 1966 et en février 1971

	Conduc- tivité à 25° (1)	pH	SiO <sub>2</sub>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> en N	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en N	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup> en P	Sr <sup>++</sup>	TOTAL
JUIN 1966	—	—	0,54	52,0	3,6	1,05	0,83	1,9	7,7	—	166	0,077	—	—	234
Moyenne surface	—	—	3,6	54,0	3,6	1,10	0,85	2,0	8,0	—	171	0,275	—	—	246
Moyenne fond	—	—	2,15	52,0	4,6	1,15	0,85	2,0	8,2	—	171	0,21	—	—	243
BOUBIOZ 80 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FÉVRIER 1971	272	7,8	2,5	49,0	3,8	1,40	0,85	1,35	8,1	0,008	163	0,155	0,004	0,24	230
Moyenne surface	274	7,75	2,7	49,0	3,8	1,40	0,86	1,40	8,3	0,009	166	0,180	0,006	0,24	234
Moyenne fond	280	7,65	2,45	51,0	3,3	1,35	0,69	1,30	8,3	0,019	169	0,170	0,040	0,21	237
BOUBIOZ fond	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tonnage du lac en février 1971 (tonnes)	—	—	2 900	55 000	4 270	1 570	950	1 530	9 100	9,5	185 000	190	5,6	270	260 000

(1) — en  $10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ .

homogène sur tout le bassin versant d'Annecy. Notons la constance de la composition du lac entre 1966 et 1971, la plupart des concentrations sont les mêmes à quelques pour cent près sauf le sodium qui a légèrement augmenté.

Nous avons porté sur le tableau 12 le tonnage global en éléments dissous du lac calculé pour février 1971, période où un tel bilan est facilement réalisable vu l'homogénéité chimique. *Il y a 260 000 tonnes de sels dissous dans le lac d'Annecy.*

Il est difficile de comparer ces tonnages vu l'absence d'analyses antérieures sur la plupart des éléments étudiés. Les premières analyses de l'eau sont fournies par DUPARC qui trouve  $49 \text{ mg/l}$  de  $\text{Ca}^{++}$  en 1890 et  $3,9 \text{ mg/l}$  de  $\text{SiO}_2$ . D'après les mesures de HUBAULT en automne 1937, il y a environ  $2 \mu\text{g/l}$  de Phosphate (P) soluble,  $0,1 \text{ mg/l}$  d'Azote (N) nitrique, environ  $54 \text{ mg/l}$  de  $\text{Ca}^{++}$  et une conductivité de  $238 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  à  $18^\circ\text{C}$ . SUCHET (1954) mesure des alcalinités de  $108 \text{ mg/l}$  de  $\text{CaCO}_3$  et des conductivités à  $18^\circ\text{C}$  entre  $195 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  et  $258 \mu\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ . On voit que *si les éléments majeurs n'ont guère varié en trente ans, il n'en est pas de même des éléments nutritifs : le phosphore soluble a été multiplié par 2,5 et les nitrates par 1,6*. Plus récemment BALVAY mesure une teneur en nitrates de  $0,15 \text{ mgN/l}$  en mars 1967, valeur très semblable à celle de 1971. Il ne semble donc pas possible de voir déjà pour cet élément nutritif important un effet du collecteur circulaire. En effet rappelons que le temps de renouvellement moyen des eaux du lac est de quatre ans et qu'en 1971 le collecteur n'était pas encore terminé. On ne peut raisonnablement s'attendre à une amélioration de la qualité des eaux que plusieurs années après la mise en service totale du collecteur.

Nos analyses du Thiou n'ont pas révélé d'importantes variations de compositions chimiques à part celles de la silice, des éléments azotés et phosphorés dont le rôle biologique est bien connu. Les valeurs moyennes sont portées dans le tableau 8, elles sont évidemment très comparables aux valeurs de la composition moyenne du lac en février 1971 (tab. 12). De légères différences s'observent pour le magnésium mais cet élément a été dosé de façons différentes durant notre étude. On note également des fortes valeurs de sodium et chlorures en mars 1971, il est possible qu'au niveau du prélèvement après le pont de la Halle, les eaux du Thiou soient sensibles au sel déversé sur la chaussée en hiver, nous n'avons pas tenu compte de ce prélèvement dans le calcul de la concentration moyenne.

#### *Bilan chimique du lac d'Annecy.*

*La comparaison des analyses du Thiou et de la moyenne des apports (tab. 8) met en évidence une rétention par la masse lacustre des éléments suivants : silice ( $3,7 \text{ mg/l}$  contre  $2,7 \text{ mg/l}$ ), calcium ( $68 \text{ mg/l}$  contre  $50 \text{ mg/l}$ ), bicarbonates ( $210 \text{ mg/l}$  contre  $160 \text{ mg/l}$ ) et nitrates ( $0,38 \text{ mgN/l}$  contre  $0,16 \text{ mgN/l}$ ).* Malgré les nombreuses erreurs commises dans l'appréciation des valeurs moyennes, ces différences de l'ordre de 40 à 100% sont bien significatives. L'utilisation biologique de la silice et de l'azote des nitrates est bien connue. Pour le calcium et les bicarbonates il s'agit de la précipitation. Nous n'avions pas pu le mettre en évidence dans l'étude chimique du lac :

il aurait fallu effectuer une étude dynamique mois par mois. Ce phénomène est bien connu pour le Léman (MEYBECK, 1970) et le lac de Neuchâtel (PORTNER, 1951). Remarquons qu'une fois encore c'est surtout le carbonate de calcium qui est précipité car le magnésium ne présente que des différences faibles entre les apports et le Thiou (4,0 mg/l et 3,6 mg/l).

Pour effectuer un bilan on se heurte à plusieurs difficultés: tout d'abord le bilan hydrologique ne porte que sur environ 70% des apports, d'autre part nous ne connaissons pas exactement la composition chimique des autres affluents. Nous sommes donc amenés à effectuer deux approximations:

- La composition des apports non analysés est la même que la moyenne des apports étudiés.
- Le débit spécifique des apports par ruisseau manquant est de 25 l/s/km<sup>2</sup>, c'est-à-dire comparable aux affluents voisins jaugés, le Biolon et le Laudon.

Pour l'année hydrologique 1968-1969 on arrive ainsi à un apport de 600 l/s résultant de la différence entre la pluie sur le plan d'eau (1250 mm) et l'évaporation (550 mm) et à un apport de 1800 l/s dû aux affluents non jaugés. Remarquons que cette deuxième approximation est justifiée puisque la somme des apports d'eau ainsi définie (6650 l/s + 600 l/s + 1800 l/s) est égale à la somme des débits du Thiou (8700 l/s) et des prélèvements effectués par pompage au lac (400 l/s) (la différence de niveau du lac d'une année à l'autre est négligeable au regard des erreurs commises sur le bilan).

L'estimation des concentrations moyennes des rivières est également délicate. Pour le Rhône et la Dranse, pour lesquels nous avions mis en évidence d'importantes variations des teneurs avec le débit (MEYBECK, 1970), nous avions effectué des bilans partiels par classe de débit en affectant à chaque classe une concentration moyenne déterminée expérimentalement. Pour les rivières d'Annecy, de telles précautions n'ont pas été nécessaires vu la grande stabilité des concentrations. Aussi nous avons effectué pour les éléments majeurs des moyennes arithmétiques des débits dissous au moment de chaque prélèvement (débit dissous en g/s = concentration en g/m<sup>3</sup> × débit liquide en m<sup>3</sup>/s). Pour les éléments nutritifs dont la variabilité est grande nous ne présentons ici qu'un bilan provisoire, en attendant les résultats plus complets des études de crues. En effet ces éléments doivent être dosés presque crue par crue car les concentrations dépendent beaucoup de l'état de lessivage du bassin (SIWERTZ *et al.* 1971) et quelquefois même augmentent avec le débit: c'est le cas des phosphates pour l'Eau Morte (crue de fonte des neiges d'avril 1969 et crue d'octobre 1970).

Le bilan du tableau 13 présente les apports pour chaque rivière en 1968-1969 avec les érosions spécifiques, les apports totaux des rivières étudiées, les apports extrapolés des rivières non étudiées, les sorties du Thiou et des pompages, ainsi que le solde restant dans le lac.

TABLEAU 13

*Lac d'Annecy. Bilan des apports dissous en tonnes et érosions dissoutes spécifiques en t/km<sup>2</sup>/an*  
 (Octobre 1968-septembre 1969)

	Eau Morte	Laudon	Entrevernes	Ire	Bornette	Nant d'Oy	Biolon	Somme des affluents étudiés	Apports affluents restants	Sorties Thiou et pompages	Solde dans le lac
SiO <sub>2</sub> apports érosion spécifique	410 4,5	150 5,0	13,5 2,0	89 3,2	55,5 4,1	36,5 4,6	19,0 3,3	770 4,2	210	680 2,4	+300
Ca app.++ E.S.	7 300 80	2 100 70	320 48	2 200 80	13,0 100	715 90,5	370 66,0	14 500 79	3 880	14 400 52,0	+3 800
Mg++ app. E.S.	490 5,4	165 5,6	6,2 0,92	105 3,8	32,5 2,4	30,5 3,8	14,5 2,5	840 4,6	230	1 030 3,70	+40
Na+ app. E.S.	130 1,45	53 1,80	6,1 0,91	52 1,9	24,0 1,8	14,5 1,8	17,0 3,0	300 1,65	80	460 1,70	-80
K+ app. E.S.	96,5 1,05	48 1,6	9,6 1,4	23 0,82	14 1,0	7,8 1,0	6,7 1,1	210 1,15	55	275 0,98	-10
Cl- app. E.S.	105 1,15	54 1,8	9,1 1,3	19,0 0,68	17,0 1,2	13,5 1,7	28,5 5,0	250 1,35	65	460 1,65	-145
SO <sub>4</sub> --- app. E.S.	970 10,5	195 6,5	40 5,9	385 14	245 18	92 11,5	65,0 11,5	2 000 10,9	535	2 450 8,8	+70
NO <sub>3</sub> - en N	45,5 0,50	16,1 0,54	4,4 0,65	4,9 0,17	4,9 0,37	2,1 0,26	2,4 0,43	80 0,43	22	46 0,16	+56
HCO <sub>3</sub> - app. E.S.	23 000 250	6 600 225	940 140	6 600 240	3 800 290	2 150 270	1 100 195	44 000 240	12 000	45 700 165	+10 400
Apport global Erosion globale	32 500 355	9 350 315	1 350 200	9 500 345	5 550 420	3 050 390	1 650 290	63 000 345	17 000	65 500 235	+14 300

*Le lac stocke ainsi par an 300 t de silice, 56 t de nitrates et environ 15 000 t de bicarbonates et de calcium.* Si on compare cette dernière valeur aux quantités globales contenues dans le lac on voit que ce phénomène de précipitation des carbonates, dont nous verrons toute l'importance sur la composition des sédiments, affecte finalement moins de 10% des bicarbonates de calcium dissous. Dans le Léman la précipitation des bicarbonates serait d'après des bilans analogues de 300 000 t/an (MEYBECK, 1971) et de 90 000 t/an dans le lac de Neuchâtel, mais ces chiffres nous donnent seulement des ordres de grandeurs, vu les erreurs importantes commises sur ces bilans.

Un bilan des éléments dissous avait été dressé par DUPARC en 1890. Si ses valeurs et les nôtres diffèrent souvent (DUPARC trouve une minéralisation globale de 200 mg/l dans le lac) c'est surtout en raison des méthodes d'analyses. Les résultats qualitatifs sont les mêmes: DUPARC note déjà la minéralisation nettement plus forte des affluents par rapport à la moyenne du lac. Il refuse la précipitation chimique du carbonate de calcium et pense que seule la « vie organique » peut provoquer cette décalcification des eaux qu'il chiffre à 54 000 t/an. Il semble bien en fait que ce phénomène soit dû aux deux causes combinées.

#### *Erosion chimique dans la région d'Annecy.*

*L'érosion chimique sur le bassin d'alimentation du lac d'Annecy est très importante : 345 t/km<sup>2</sup>/an en moyenne*, cette valeur est supérieure au Rhône alpestre (210 t/km<sup>2</sup>/an), au Rhin alpestre (235 t/km<sup>2</sup>/an) mais inférieure à la Dranse (470 t/km<sup>2</sup>/an) (MEYBECK, 1971). L'érosion chimique maximale est due à la Bornette (420 t/km<sup>2</sup>/an), ce petit torrent qui a un débit spécifique élevé (45,3 l/s/km<sup>2</sup> en 1969).

Par rapport aux rivières alpines que nous avons pu étudier, les rivières d'Annecy se rapprochent beaucoup de la Dranse du Chablais. Cela n'est pas surprenant vu la grande similitude hydrologique et lithologique des bassins versants.

Aussi la dissolution des calcaires est très semblable: 270 t/km<sup>2</sup>/an pour la Dranse et 240 t/km<sup>2</sup>/an pour l'ensemble des apports au lac d'Annecy. Il est intéressant de noter que la mise en solution de la silice est également du même ordre (5 t/km<sup>2</sup>/an) pour la Dranse et 4,2 t/km<sup>2</sup>/an pour le bassin d'Annecy.

A la sortie du lac, en raison des phénomènes que nous avons vus, l'érosion globale est très diminuée puisque la minéralisation du Thiou ne correspond plus qu'à une érosion de 237 t/km<sup>2</sup>/an. Cette valeur est alors très comparable aux érosions globales des deux grands lacs subalpins, le Léman (190 t/km<sup>2</sup>/an) et le Bodensee (190 t/km<sup>2</sup>/an). (MEYBECK, 1971).

#### 5. CARACTÈRES BIOLOGIQUES DU LAC D'ANNECY

La plupart des biologistes se sont particulièrement intéressés au Boubioz, rappelons que cet entonnoir est toujours pourvu en oxygène. C'est JUGET (1958) qui

a réalisé l'étude la plus complète sur cette source sous-lacustre, il y trouve notamment l'oligochète *Tubifex barbatus* Grube qui est révélateur des conditions d'oxygénation et de turbulence et de très nombreuses coquilles d'*Ancylus fluviatilis* Müller espèce rhéophyle typique. Comme aucun spécimen vivant n'a été ramené, JUGET pense que ce mollusque ne vit que dans le réseau karstique et non au griffon. Nous avons pu, lors de notre campagne de prélèvements de février 1971, ramener du fond du Boubioz (81 m) plusieurs cailloux et débris supportant des *ancylus* vivants, cette espèce semble donc bien vivre au griffon même de la source.

L'étude biologique proprement dite n'entrant pas dans le cadre de nos recherches nous nous bornerons à citer les principaux résultats auxquels sont arrivés les chercheurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique (BALVAY, 1967 et LAURENT, 1968, 1969 et 1970).

TABLEAU 14. — *Evolution de l'état sanitaire du lac d'après Laurent*

Moyennes annulées	1967	1968	1969	1970
Phosphore soluble µg/1 de P	—	1,1	1,1	0,82
Azote nitrique µg/1 de N	120	120	150	168
Oxygène dissous entre 0 et 10 m en % de saturation	106,1	106,0	102,6	90,9
Transparence en m	5,86	5,79	6,50	6,48
Plancton en ml/m <sup>3</sup>	3,08	1,40	1,52	2,51
% de cyanophycées	79,17	0,08	0,008	0,01
% de diatomées	19,67	98,14	95,20	80,78
% de chrysophycées	0,99	1,33	4,47	18,73

D'après ces auteurs, le lac présente, en 1967, les symptômes d'un « lac malade ». L'année d'après, des « indices de restauration » se manifestent: deux fois moins de plancton et transformation qualitative de la flore. En 1969 la « restauration du lac s'affirme et se poursuit »: régression du plancton mise en évidence par l'augmentation de la transparence et baisse de la saturation moyenne en oxygène des eaux superficielle indice d'une diminution de l'activité du phytoplancton. En 1970, il est constaté que la « restauration des eaux superficielles se poursuit »: phosphore soluble moins abondant et saturation en oxygène plus faible.

L'examen de l'ensemble des résultats reportés sur le tableau précédent nous amène cependant à penser que nous sommes en présence plus d'une stabilisation que d'une amélioration. Ce qui est déjà un résultat appréciable. Si l'on tient compte

que le temps de réponse du lac (eau et sédiments) est de l'ordre de la dizaine d'années, un diagnostic prononcé dès maintenant, nous semble un peu prématuré. N'oublions pas que le collecteur n'est pas achevé et n'a en particulier pas encore atteint la zone sud où l'influence de la population estivale est loin d'être négligeable. D'autre part souvenons-nous que les sédiments du lac (26 km<sup>2</sup>) servent de « piège » aux produits divers résultant du « lessivage » des 251 km<sup>2</sup> de son bassin d'alimentation. Signalons enfin que l'étude des matières organiques et minérales en suspension, de la matière organique dissoute et des échanges entre ces différents éléments nous semble essentielle (MARTIN, 1971) pour la compréhension des phénomènes d'eutrophisation et de pollution.

## 6. LES SÉDIMENTS ACTUELS DU LAC D'ANNECY

La seule étude importante des sédiments du lac est due au genevois DUPARC (1894) qui travailla sur les échantillons des sondages de DELEBECQUE. Elle porte sur les teneurs en SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. On peut déjà dégager de ces analyses que les sédiments d'Annecy sont essentiellement calcaires et que la teneur en CaCO<sub>3</sub> augmente dans les zones peu profondes comme le Crêt de Chatillon, d'Anfon et le Roselet. Il nous a paru nécessaire de compléter cette étude ancienne par des analyses plus complètes des sédiments comprenant les paramètres physiques (densité, granulométrie, etc.) et l'analyse chimique totale des éléments majeurs. La méthode d'analyse est la suivante: après déssication à 100° C, une partie du sédiment est calcinée à 600° C, la différence de poids correspond sensiblement à la perte de matière organique, puis à 1000° C, on obtient ainsi la part du CO<sub>2</sub> des carbonates qui sont dissociés. Une autre partie du sédiment (100 mg) est fondue avec 250 mg de Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et 250 mg d'acide borique, le produit de fusion est repris par 5 ml d'HCl 1/2 et 20 ml d'eau. Après dissolution totale le volume est ajusté à 100 ml. Sur cette solution sont dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O; par colorimétrie TiO<sub>2</sub> (méthode de l'eau oxygénée) et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (méthode au molybdate avec réduction du complexe jaune par l'acide ascorbique).

En février 1971 nous avons réalisé 71 prélèvements superficiels à la benne Eckmann, 5 au carottier Jenkins-Mortimer, et 11 carottes de 2 m au carottier Züllig. Nous ne présentons ici que les résultats principaux de cette campagne dont l'étude complète est encore en cours.

### a. *Paramètres physiques*

#### *Granulométrie.*

La plupart des prélèvements sont des vases fines sans fraction grossière (99% inférieur à 40 microns). Nous n'avons rencontré des sédiments sableux qu'en des endroits bien précis:

— *Sur la beine entre Duingt et Saint-Jorioz*: à des profondeurs de moins de 5 m, l'action des vagues dues au vent du Nord freine la sédimentation des particules fines sur ce delta très étendu du Laudon et du ruisseau d'Entrevernes. La teneur en fraction fine inférieure à 40 microns varie de 2,5% dans la baie de Cessena à 30% à Duingt. La médiane de la fraction grossière correspond à des sables moyens ( $\varnothing$  0,12 à 0,2 mm), le classement est en général très bon.

— *Dans les deltas au débouché des rivières*. En face du Laudon par 17 m il n'y a que 10,7% de fraction fine, cette proportion est de 16% à 24 m, 38% à 39 m et n'atteint 72% qu'à 48,5 m. Les courbes granulométriques de la fraction grossière (fig. 11) présentent la même évolution. Les crues de cette rivière peuvent donc encore apporter des sables jusqu'au milieu du lac entre Menthon et Saint-Jorioz! Pour l'Ire et l'Eau Morte cette influence est beaucoup plus faible. En effet comme nous l'avons dit, le pouvoir transporteur de ces rivières est beaucoup plus faible et par 3,6 m en face de l'Eau Morte on ne trouve que 48% de sables. L'influence de l'Ire est également limitée: à 16 m de fond en face de cet affluent il y a déjà 68% de fraction fine, les apports grossiers — graviers et galets — de cette rivière restant à l'embouchure. Les sables trouvés dans cette partie du Petit Lac sont toujours fins, la médiane de la fraction supérieure à 40 microns est comprise entre 0,07 et 0,12 mm.

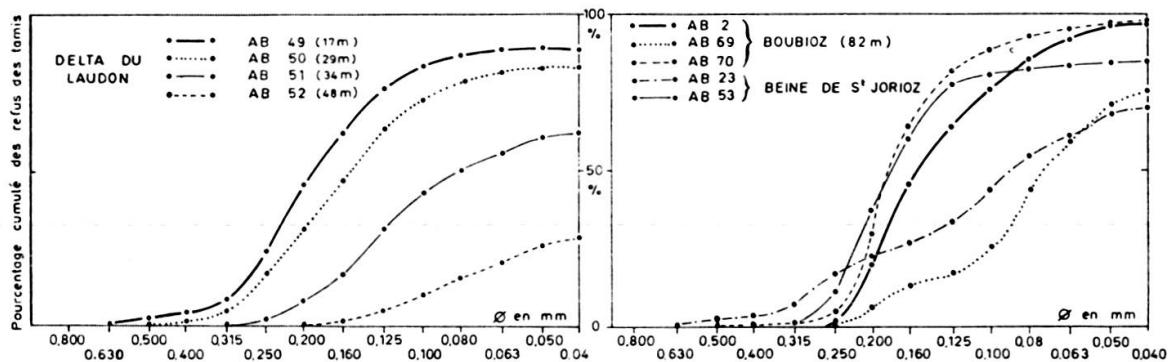


Fig. 11 - GRANULOMETRIE DE LA FRACTION TOTALE DES SEDIMENTS D'ANNECY

— *Au fond du Boubioz*: 6 coups de benne ont été donnés au fond du Boubioz. Ils ont toujours remonté des sables fins ( $\varnothing$  0,07 mm) et des sables moyens ( $\varnothing$  0,15 mm) quelquefois le sédiment est un mélange des deux et on a deux modes sur les courbes granulométriques (fig. 11). La proportion de fraction fine est très faible (de l'ordre de quelques %). En dehors de ce sédiment naturel nous avons remonté également de nombreux débris tombés dans l'entonnoir que la sédimentation fine n'a pu recouvrir: morceau de ciment, de tuile, un fragment de boîte de conserve rouillé, etc.

#### *Densité humide et teneur en eau.*

En général la densité humide des vases à quelques cm en-dessous de la surface est comprise entre 1,3 et 1,4 pour des teneurs en eau comprises entre 120 et 170%.

En surface la densité est bien sûr plus faible (1,16), les teneurs en eau atteignent alors 300% du poid sec. Nous avons quelquefois rencontré des vases plus denses surtout aux faibles profondeurs dans la baie d'Annecy (1,49) à Sévrier (1,49) à Talloires (1,54) et à l'embouchure de l'Ire (1,67).

Il nous faut dès maintenant distinguer *les sédiments très particuliers des Crêts d'Anfon, de Chatillon et du Roselet*: ce sont des vases compactes, claires, avec quelques pour cent de sables en général mal classés. Ces îles sous-lacustres ont un sommet plat actuellement parsemé de galets et de blocs allant jusqu'à 50 cm de diamètre. On y a retrouvé des palafites ou pieux lacustres. L'étude archéologique est entreprise par la société de plongée d'Annecy, l'étude géochimique complète de ces dépôts est en cours actuellement. La densité humide de ces sédiments est particulièrement élevée (2,0), ce qui explique que les blocs ne se soient pas enfouis. L'origine de ceux-ci est problématique. Ils ont très probablement été amenés par main d'homme, pour certains ils sont contemporains des palafites, pour d'autres ils auraient servi d'ancres aux pêcheurs. Actuellement la sédimentation est très faible en ces endroits, en effet l'action des plus fortes houles peut encore se faire sentir à plusieurs mètres de profondeur.

#### Densité sèche.

Elle est généralement de 2,6 pour les vases ce qui est comparable à la densité des sédiments du Léman (2,4 à 2,7).

#### b. Teneur en carbonates (fig. 12)

Nous avons distingué les vases des sables: sur les premières la mesure était réalisée au calcimètre Bernard, pour les seconds nous avons opéré par pesée après attaque à HCl.

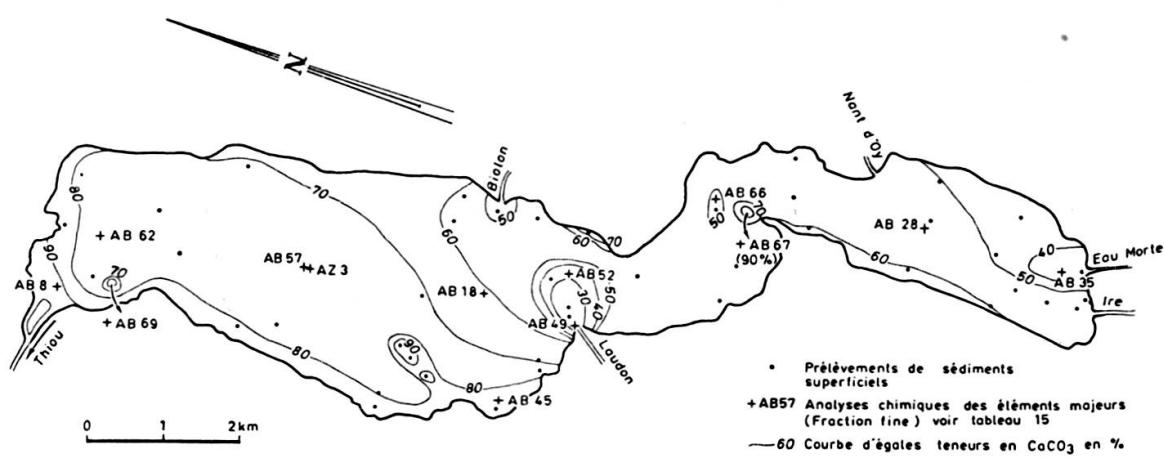


Fig. 12 LAC D'ANNECY - SCHEMA DE LA REPARTITION DES CARBONATES  
(FRACTION  $\leq 40\mu$ )

*Pour les sables* la teneur est assez constante de 19 à 28% de  $\text{CaCO}_3$  pour la beine et le delta du Laudon. Pour le delta commun de l'Eau Morte et de l'Ire les teneurs sont beaucoup plus élevées (de 62 à 72% de  $\text{CaCO}_3$ ). Ces valeurs sont tout à fait semblables à celles mesurées directement sur les rivières. Dans le Boubioz les sables sont surtout siliceux (de 7 à 14% de  $\text{CaCO}_3$ ), il s'agit essentiellement de grains de quartz souvent oxydés par les débris métalliques.

*Pour les vases* et la fraction fine des dépôts grossiers les valeurs sont beaucoup plus variables allant de 24% à l'embouchure du Laudon à plus de 90% sur les crêts d'Anfon et de Chatillon. Nous avons porté sur la figure 12 la carte schématique des carbonates d'après nos analyses. Nous avons également tenu compte des résultats qualitatifs de DUPARC très proches des nôtres malgré des valeurs absolues des carbonates sensiblement différentes.

La teneur moyenne en  $\text{CaCO}_3$  des sédiments du lac est de 60%. Les vases du Petit Lac sont moins carbonatées (50%) en moyenne que dans le Grand Lac (70 à 75%)

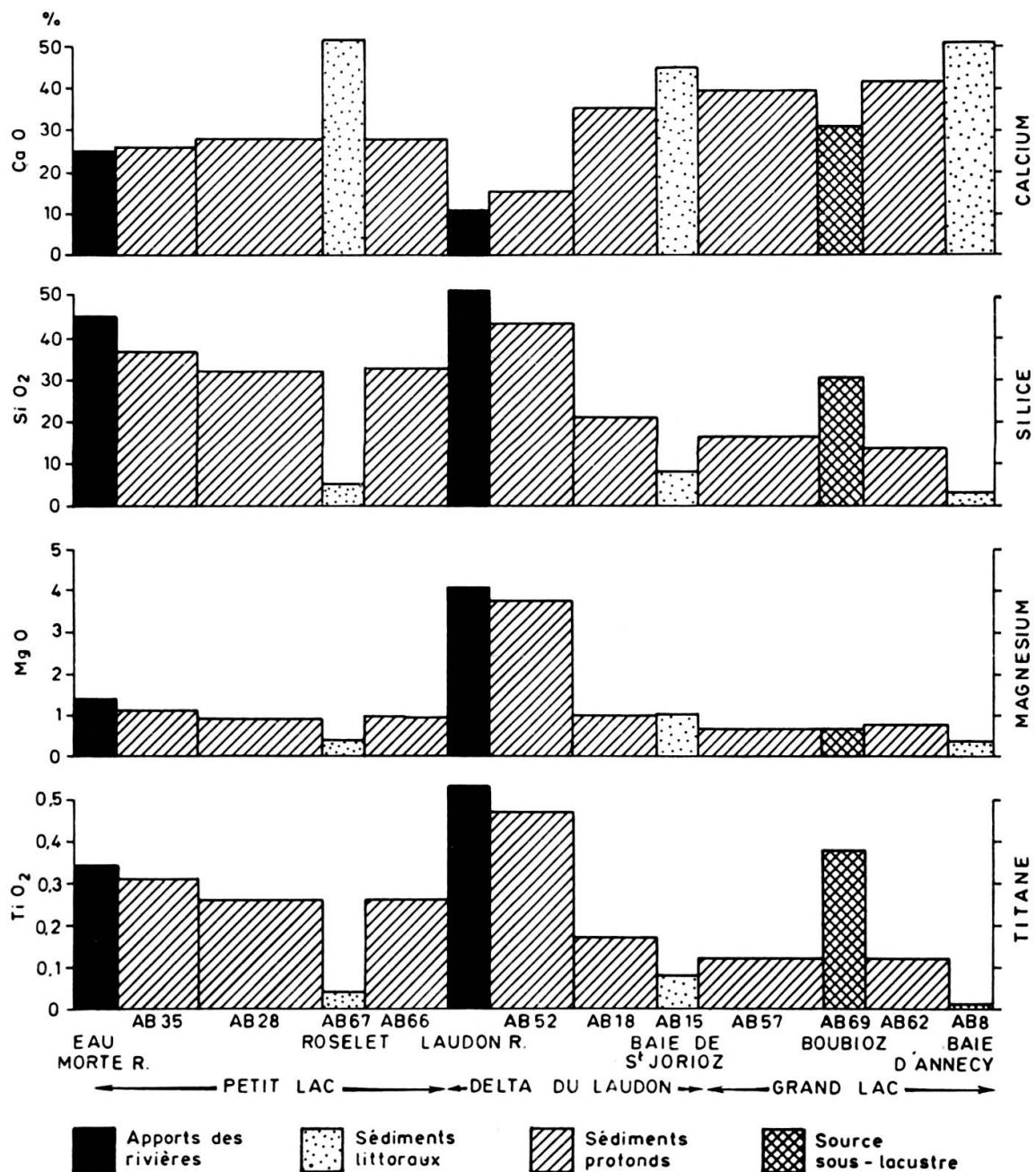
*On remarque pour les crêts de Chatillon, d'Anfon et au Roselet des teneurs dans la couche superficielle actuelle très élevées, supérieures à 90%.*

L'influence du Laudon dont les apports fins sont peu carbonatés (22% de  $\text{CaCO}_3$ ), se fait sentir dans toute la région entre Saint-Jorioz et Menthon. On note aussi que la partie S.-W. du Petit Lac, soumise à l'influence de l'Eau Morte, est moins carbonatée (40%): ces teneurs sont égales aux apports détritiques moyens amenés par cette rivière (43%) (fig. 13).

*La forte teneur générale en carbonates des vases d'Annecy est donc tout d'abord due aux apports détritiques très calcaires de l'ensemble du bassin versant* (la teneur est supérieure à 50% pour l'ensemble des petits affluents). Cette forte influence détritique s'observe aussi dans le Léman où la teneur moyenne en  $\text{CaCO}_3$ , beaucoup plus faible qu'au lac d'Annecy, de 25% environ, est surtout due aux apports détritiques fins du Rhône (15 à 20%) et aux apports plus calcaires de la Dranse (35 à 40%) (ROMIEUX, 1930 et MEYBECK, 1971).

*A cette sédimentation détritique fine se superpose la précipitation des carbonates* dont nous avons déjà parlé. Dans les zones les plus profondes le carbonate précipité se redissout, ceci est bien net dans le cas du Léman. A Annecy les profondeurs étant plus faibles la dissolution n'est que partielle et les teneurs des vases du Grand Lac sont assez élevées malgré les apports du Laudon. Dans la zone très littorale cette dissolution n'a pas lieu et la partie fine du sédiment est presque entièrement calcaire comme dans la baie d'Annecy ou sur la beine de la baie de Cessena. Ce phénomène de précipitation est maximum au crêt de Chatillon ( $\text{CaCO}_3 > 90\%$ ) dans la couche mince des vases actuelles.

Fig. 13 - LAC D'ANNECY - COMPOSITION CHIMIQUE DES SEDIMENTS ( $<40\mu$ )  
TENEURS EN  $\text{CaO}$  -  $\text{MgO}$  -  $\text{SiO}_2$  ET  $\text{TiO}_2$  EN %



### c. COMPOSITION CHIMIQUE DES VASES D'ANNECY

L'analyse totale des éléments majeurs va nous permettre de préciser ces deux types de sédimentation fine. Les résultats complets figurent au tableau 15, l'emplacement des échantillons analysés sur la figure 12. La figure 13 représente schématiquement les teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{TiO}_2$  des apports de l'Eau Morte, du Laudon et des principales zones du lac.

TABLEAU 15. — *Composition chimique des sédiments superficiels du Lac d'Annecy et des sédiments en suspension de l'Eau Morte et du Lardon*

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Perte à 600°C	Perte à 1 000°C	Total
Eau Morte (moyenne 10 analyses)	45,9	6,67	2,49	0,043	24,87	1,42	0,35	1,07	0,34	0,195	—	17,8	101,15
Lardon (moyenne 5 analyses)	52,3	13,10	5,75	0,154	11,36	4,07	0,80	2,14	0,53	0,45	—	9,0	100,45
AB 35 Fd F.F.	36,5	5,86	1,99	0,031	25,76	1,11	0,19	0,92	0,31	0,15	11	27,7	100,52
AB 28 S	32,3	6,33	2,80	0,064	28,00	0,90	0,13	0,98	0,26	0,21	10,6	28,0	99,97
AB 66 S	32,8	5,48	2,52	0,219	28,00	0,96	0,15	0,90	0,26	0,19	8,4	28,6	100,08
AB 67 F.F.	5,0	1,13	0,43	0,013	51,66	0,41	0,09	0,20	0,04	0,04	5,8	42,8	101,80
AB 49 F.F.	43,0	10,68	5,09	0,121	15,12	4,81	0,71	1,69	0,47	0,18	9,7	19,4	101,87
AB 52 Fond	43,8	10,02	4,83	0,094	15,68	3,73	0,65	1,62	0,47	0,16	8,9	19,2	100,25
AB 18 S	21,3	4,16	2,20	0,080	35,84	1,03	0,12	0,62	0,17	0,13	9,3	31,5	100,75
AB 45 F.F.	8,5	1,80	1,32	0,036	45,08	1,08	0,18	0,32	0,08	0,06	9,0	41,2	99,66
AB 57 Sed. tot.	17,0	2,84	2,23	0,193	39,48	0,70	0,09	0,52	0,12	0,26	9,1	37,0	100,43
AB 69 F.F.	30,8	4,35	2,77	0,049	31,36	0,70	0,22	0,60	0,38	0,15	7,4	29,0	100,38
AB 62 S	14,3	2,84	1,63	0,035	41,72	0,75	0,11	0,20	0,12	0,13	8,0	39,0	100,83
AB 8 S F.F.	3,5	0,66	0,60	0,018	51,10	0,38	0,04	0,13	0,01	0,05	4,6	43,7	100,18
AZ 3 53-55 cm	25,5	7,18	3,37	0,178	31,36	1,49	0,18	1,10	0,27	0,10	8,5	29,6	100,33
104-106 cm	25,0	6,80	2,12	0,077	32,76	1,16	0,13	1,00	0,24	0,11	9,8	30,5	99,90
141-143 cm	13,3	3,78	1,14	0,062	42,00	0,80	0,11	0,55	0,14	0,08	8,1	37,1	99,06

Les analyses complètes reflètent tout à fait les conclusions que nous avions faites sur la seule étude des carbonates. En partant du Petit Lac, on voit que les sédiments de l'Eau Morte se retrouvent pour AB 35 (teneurs en  $Fe_2O_3$  et  $Al_2O_3$ ). Les sédiments du Petit Lac sont sensiblement les mêmes jusqu'au Roc de Chère (AB 28 et AB 66). L'influence des apports du Laudon se fait alors nettement sentir et l'échantillon AB 52, par 48 m de fond, présente des teneurs (particulièrement en  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ ...) très analogues à la moyenne des apports du Laudon. Dans le Grand Lac la précipitation des carbonates devient importante et les échantillons AB 18, AB 57 et AB 62 ont des teneurs en  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ , etc., nettement plus faibles que celles du Petit Lac. Dans les craies lacustres tous les éléments diminuent, sauf  $CaO$  et la perte à  $1000^\circ C$  — qui correspond au  $CO_2$ . Ceci est visible pour AB 45 sur la beine de Saint-Jorioz, AB 67 sur le Roselet et surtout dans la baie d'Annecy (AB 8). Pour ce sédiment, où la teneur en  $CaCO_3$  atteint 95%, on ne note plus que 3,5% de  $SiO_2$ , 0,66% d' $Al_2O_3$ , etc.

Les teneurs de la fraction fine du sédiment au fond du Boubioz sont proches des sédiments d'origine mixte — détritique et précipitation — tels qu'on les trouve dans le Petit Lac (AB 66, AB 28).

Il n'est pas dans le propos de cette note d'étudier la stratigraphie des sédiments d'Annecy. Nous avons cependant porté au tableau 15 les analyses de la carotte AZ 3 longue de 187 cm prélevée au milieu du Grand Lac par 64 m de fond et dont le prélèvement de surface correspondant effectué à la benne est AB 57. On remarque trois couches de composition différente:

- couche superficielle à caractère détritique faible (17% de  $SiO_2$ );
- couche intermédiaire (niveaux 53-55 cm et 104-106 cm) nettement plus détritique (25% de  $SiO_2$ , teneurs en  $MgO$  et  $Al_2O_3$  plus fortes...);
- couche inférieure (niveaux 141-143 cm et 173-175 cm) à nouveau plus calcaire (13 à 19% de  $SiO_2$ ).

Ces variations correspondent vraisemblablement à des périodes climatiques différentes: la précipitation est fonction de la température du lac et les apports détritiques varient beaucoup avec la pluviométrie et l'état de la couverture végétale. L'étude détaillée des carottes prises sur le lac d'Annecy est en cours.

Le comportement géochimique de chaque élément ne peut pas être étudié avec si peu d'analyses. Nous pouvons quand même noter les faits suivants:

- *In n'y a pas de précipitation de carbonate de magnésium: comme dans le Léman (MEYBECK, 1970) les rapports  $Ca/Mg$  augmentent considérablement quand la teneur en  $CaCO_3$  croît.* Ce rapport atteint un maximum de 135 pour AB 8 alors qu'il n'est dans les apports détritiques que de 17,5 pour l'Eau Morte et de 2,8 pour le Laudon. C'est le paramètre le plus variable des sédiments du lac d'Annecy. Aucun autre élément analysé n'est d'ailleurs coprécipité avec le  $CaCO_3$ .

— *Le manganèse a un comportement tout à fait à part.* Ce fait est bien connu et de nombreux cas de nodules de manganèse dans les lacs ont déjà été cités. Comme dans le Léman cet élément est très variable de 0,013 à 0,219%. Les valeurs maximales des sédiments du lac sont supérieures à la moyenne des apports (0,154% pour le Laudon, 0,043% pour l'Eau Morte). Il s'agit donc là de précipitation du manganèse, ce phénomène est bien différent de la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  car aucune relation Ca-Mn n'est visible.

— Le phosphore est également variable de 0,04 à 0,26% et ses variations ne suivent pas toujours celles des autres éléments. C'est au centre du Grand Lac (AB 57) que nous avons trouvé la valeur la plus élevée (0,26%) ceci est dû sans doute aux conditions d'oxygénéation particulières en cet endroit.

## CONCLUSIONS

Les résultats présentés sont encore sommaires, certaines études étant encore en cours (apports des affluents, stratigraphie des sédiments). Néanmoins, comme le bassin d'alimentation d'Annecy et le lac lui-même avaient été peu étudiés jusqu'ici, nous avons pu apporter des éléments nouveaux.

### 1. *Le bassin versant.*

En raison de la configuration du relief et du régime des vents l'influence adoucissante du lac sur le climat se fait sentir surtout dans le Petit Lac.

La pluviuosité moyenne sur l'ensemble du bassin est de 1450 mm/an. Le lac lui-même reçoit 1250 mm/an, l'évaporation sur le plan d'eau représente de 30 à 50% des précipitations. Cette forte pluviuosité est à l'origine de débits spécifiques importants allant jusqu'à 55 l/s/km<sup>2</sup> pour le Laudon, lors de l'année 1969-1970, particulièrement humide.

Le bilan hydrologique précis est très difficile en raison de la grande dispersion des affluents difficiles à contrôler et des sources sous-lacustres nombreuses. Il semble cependant que celles-ci ne doivent pas avoir une importance très grande sur le bilan.

L'étude des éléments dissous dans les rivières a révélé une variabilité très faible pour la plupart des éléments majeurs ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  particulièrement). Nous avons ainsi pu déterminer que le lac reçoit annuellement 80 000 t d'éléments dissous, essentiellement en bicarbonates et en calcium (93% des sels dissous). Les éléments nutritifs sont beaucoup plus variables et leur bilan, en cours de réalisation, est donc plus délicat. L'érosion chimique sur le bassin est très élevée 350 t/an/km<sup>2</sup> en moyenne, ce qui est une des valeurs les plus fortes des Alpes occidentales.

Les apports solides, extrêmement variables, n'ont pu être déterminés que sur les deux principaux affluents: l'Eau Morte et le Laudon pour l'année hydrologique

1969-1970 particulièrement pluvieuse. La première rivière, du fait de la composition lithologique de son bassin et de la nature de son cours inférieur, apporte relativement peu d'éléments en suspension (12 000 t). Le Laudon par contre est le principal responsable du comblement du lac d'Annecy avec un apport de l'ordre de 40 000 t correspondant à une forte érosion (1400 t/km<sup>2</sup>/an) des terrains quaternaires et molassiques. En raison de la pluviosité de l'année d'étude, ces valeurs sont supérieures à la moyenne.

## 2. *Le lac.*

Une première campagne hydrochimique et sédimentologique sur le lac révèle les points suivants :

— La source sous-lacustre du Boubioz a une influence hydrologique, hydrochimique et thermique limitée. Elle est très vraisemblablement intermittente mais lors de ses crues son débit suffit à empêcher toute sédimentation fine : on ne trouve que des sables assez bien classés au fond de l'entonnoir.

— Le lac est en équilibre chimique avec ses apports en solution. Néanmoins le bilan des éléments dissous laisse prévoir la précipitation de carbonate de calcium de l'ordre de 15 000 t/an.

— L'effet du collecteur circulaire des eaux usées en cours d'achèvement n'est pas encore très sensible. On note cependant la stabilisation de certains paramètres. L'amélioration attendue sera sans doute très longue en raison du temps de renouvellement des eaux, du stockage des éléments nutritifs par les sédiments et des apports qui continueront à arriver par les rivières. Il en résulte que le collecteur ceinturant le lac doit être considéré comme une étape, importante certes, mais la première d'une série pour la protection de l'ensemble du bassin aboutissant au lac d'Annecy.

— Les premiers résultats de l'étude chimique des vases confirment cette précipitation de CaCO<sub>3</sub> seul à l'exclusion de MgCO<sub>3</sub>. Dans les zones littorales et sur les Crêts de Chatillon, d'Anfon et au Roselet, il se dépose actuellement une craie lacustre (90% de CaCO<sub>3</sub>). Dans l'ensemble les vases du lac sont très carbonatées (de 40 à 60% dans les zones profondes) à la fois à cause des apports détritiques calcaires et de la précipitation de CaCO<sub>3</sub>.

— L'influence du Laudon sur la sédimentologie et la morphologie du lac est remarquable : ses apports nettement moins riches en CaCO<sub>3</sub>, mais riches en SiO<sub>2</sub>, Mg, Ti, etc. se remarquent jusque dans les zones profondes entre Menthon et Saint-Jorioz. Le delta de cette rivière, vu la masse énorme des apports, avance rapidement dans le lac et cela laisse prévoir à long terme une séparation du lac en deux parties comme pour le lac de Brienz et de Thoune.

La dégradation des reliefs est très forte sur le bassin d'Annecy, de l'ordre de 1500 t/km<sup>2</sup>/an en moyenne. Cette érosion se fait de façon différente suivant les élé-

ments: plus de 95% de la silice est apportée au lac sous forme détritique, alors que 80% des carbonates pour l'Eau Morte et 40% pour le Laudon proviennent de la dissolution des calcaires.

*Ainsi le lac, est, tant du point de vue morphologique, chimique et sédimentologique, le reflet de son bassin versant.*

#### *Remerciements*

Cette étude n'aurait pas été possible sans l'aide du personnel du C.R.G. de Thonon, notamment de G. Olivier et F. Chessel pour la partie technique, P. Blanc et A. Noir pour les analyses chimiques. Les auteurs tiennent également à remercier Ph. Olive et P. Hubert pour leurs remarques concernant le manuscrit.

### LISTE DES TABLEAUX

	Pages
1. Caractères morphométriques du bassin versant . . . . .	438
2. Caractères hydrologiques des affluents principaux . . . . .	441
3. Températures moyennes mensuelles de l'air sur le bassin . . . . .	445
4. Pluviométrie mensuelle moyenne en 8 stations du bassin d'Annecy . . . . .	446
5. Humidité moyenne mensuelle à Annecy . . . . .	447
6. Ensoleillement en nombre d'heures à Annecy . . . . .	447
7. Evaporation mesurée et calculée à la station de Glières . . . . .	448
8. Concentrations moyennes des éléments dissous dans les affluents et l'émissaire du lac . . . . .	455
9. Apports en suspension au lac d'Annecy . . . . .	458
10. Bilan hydrologique du lac d'Annecy . . . . .	460
11. Caractères morphométriques du lac d'Annecy . . . . .	465
12. Concentrations en éléments dissous dans le lac d'Annecy en juin 1966 et février 1971 . . . . .	469
13. Bilan des apports dissous pour l'ensemble du bassin versant et érosions spécifiques pour l'année 1968-1969 . . . . .	472
14. Evolution de l'état sanitaire du lac d'Annecy . . . . .	474
15. Analyses totales (éléments majeurs) des vases lacustres, des apports du Laudon et de l'Eau Morte . . . . .	480

### LISTE DES FIGURES

	Pages
1. Bassin versant du lac d'Annecy. Réseau hydrographique et équipement hydrométrique . . . . .	439
2. Equipement météorologique . . . . .	442
3. Rose des vents à Glières et Annecy. Régime des vents principaux . . . . .	443
4. Eau Morte. Variations des concentrations en $Mg^{++}$ , $SiO_2$ et de la concentration globale calculée, en fonction du débit . . . . .	452
5. Eau Morte. Variation de la concentration en phosphates, en fonction du débit . . . . .	453
6. Laudon. Variation du débit solide en fonction du débit liquide . . . . .	457
7. Coupe bathymétrique du Boubioz . . . . .	463
8. Schéma morphologique du lac d'Annecy . . . . .	452
9. Coupe bathymétrique Saint-Jorioz-Roc de Chère . . . . .	452
10. Coupe bathymétrique Menthon-Sévrier . . . . .	454
11. Courbes granulométriques de la fraction totale de quelques sédiments lacustres . . . . .	476
12. Carte schématique de la répartition des carbonates des vases du lac d'Annecy . . . . .	477
13. Teneurs en $SiO_2$ , $CaO$ , $MgO$ et $TiO_2$ de quelques vases lacustres . . . . .	479

## BIBLIOGRAPHIE

- BALVAY, G. (1967). La dynamique de la biocenose planctonique du lac d'Annecy. *Thèse Fac. Sciences, Lyon.*
- BLAVOUX, B., B. DUSSART, H. MANEGLIER et Cl. SALVETTI. (1962). La région du Léman au point de vue hydrométéorologique. *Le Globe*, 102, 49-68, Genève.
- (1969). Les sources minérales d'Evian. *La Houille Blanche*, 1, 21-29.
- BOLTSCHAUSER, J. A. (1860). Le lac d'Annecy. *Revue savoisienne*, 2-4 et 9-11.
- CHEVALIER, M. (1959). Les vents d'Annecy. Etude d'anémométrie locale. *Revue de Savoie*, 2, 129-136.
- CROUZET, E., P. HUBERT, M. MEYBECK et Ph. OLIVE. (1969). Etude de la dynamique des lacs par les méthodes isotopiques. *Ann. Stat. Biol. de Besse en Chandesse*, 4, 367-376.
- P. HUBERT, Ph. OLIVE, E. SIWERTZ et A. MARCE. (1970). Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. *Journal of Hydrology*, 11, 217-229.
- DANLOUX, J. (1968). Le lac d'Annecy. Bilan hydrologique (octobre 1966-septembre 1967). Rapport de stage ORSTOM.
- DELEAU, P. C. (1969). Etude morphologique de la dépression molassique au nord d'Annecy. *Ann. C.S.U.*, Chambéry, 7, 31-51.
- DELEBECQUE, A. (1898). Les lacs français. Béranger Paris, 435 p.
- et L. LEGAY. (1891). Note sur les sondages du lac d'Annecy. *Revue savoisienne*, 290-294.
- DE SAUSSURE, H. B. (1780). Voyage dans les Alpes. Louis Fauche-Borel, Edit. Neuchâtel.
- DUPARC, L. (1894). Le lac d'Annecy. *Arch. Sci. Genève*, 31, 1-33.
- DUSSART, B. (1954). Température et mouvement des eaux dans les lacs. Introduction à l'étude d'un milieu. *Ann. Stat. Centr. Hydrobiol. appl.*, 5, 1-128.
- (1966). Limnologie. L'étude des eaux continentales. Gauthier-Villars, Edit. Paris.
- FOREL, F. A. (1883). Dragages zoologiques et sondages thermométriques dans les lacs de Savoie. *Revue savoisienne*, 87-88.
- GERMAIN, J. M. (1894). Note sur l'origine et la formation du lac d'Annecy. *Revue savoisienne*, 326-337.
- HUBAULT, E. (1947). Etudes thermiques, chimiques et biologiques des lacs de l'est de la France (Vosges, Jura, Alpes de Savoie). *Ann. écol. nat. eaux et forêts.*, 10, 2, 116-260.
- HUBERT, P., E. MARIN, M. MEYBECK, Ph. OLIVE et E. SIWERTZ. (1969). Aspects hydrologiques, géochimiques et sédimentologiques de la crue exceptionnelle du 22 septembre 1969 de la Dranse du Chablais. *Arch. Sci. Genève*, 22, 3, 581-604.
- M. MEYBECK et Ph. OLIVE. (1970). Etude par le tritium de la dynamique des eaux du Léman. *C. R. Ac. Sc. Paris. Série D*, 270, 1298-1301.
- (1971). Etude par le tritium de la dynamique des eaux du lac Léman. Apports du tritium à la limnologie physique. *Thèse Fac. Sc. Paris.*
- (1971). Apport du tritium à la limnologie physique. Application au Léman (lac de Genève). *Ass. int. limnol. theor. appl. XVIII<sup>e</sup> congrès, Leningrad. A paraître dans Verh. Int. Verein. Limnol.*
- JUGET, J. (1958). Recherches sur la faune du fond du Léman et du lac d'Annecy. *Ann. Stat. Centr. Hydrobiol. appl.*, 7, 9-95.
- LAURENT, P. J. (1968, 1969, 1970). Etude du lac d'Annecy. Rapports au Syndicat intercommunal des communes riveraines du lac d'Annecy.
- LE ROUX, M. (1907). Recherches biologiques sur le lac d'Annecy. *Ann. Biol. lacustre*, 2, 220-387.
- et L. MORET. (1920). La structure de la montagne de Veyrier et l'origine du lac d'Annecy. *Revue savoisienne*, 59-65.
- LUGEON, M. (1900). Les dislocations des Bauges. *Bull. serv. carte géol. France*, 77, XI, 359-470.
- MARTIN, J. M. (1971). Contribution à l'étude des apports terrigènes d'oligoéléments stables et radioactifs à l'Océan. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris.
- MEYBECK, M., P. HUBERT, J. M. MARTIN et Ph. OLIVE. (1970). Etude par le tritium du mélange des eaux en milieu lacustre et estuarien. Application au lac de Genève et à la Gironde. *Isotope. Hydrology*, 523-541, Ag. Int. En. Atom. Vienne.
- (1971). Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. Thèse Fac. Sciences, Paris.

- (1971). Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. *Ass. Int. limnol. teor. appl.* XVIII<sup>e</sup> Congrès, Leningrad. A paraître dans *Verh. Int. Verein. Limnol.*
- MULLER, G. et U. FORSTNER. (1968). General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the alpenrhein and some others rivers. *Nature*, 217, 5125, 244-245.
- OLIVE, Ph. (1970). Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris.
- ONDE, H. (1944). Le lac d'Annecy et le Thiou. Etude hydrologique. *Rev. Géog. Alp.*, 32, 1-58 et 389-446.
- PORTNER, C. (1951). La formation du sédiment calcaire du lac de Neuchâtel. *Rev. suisse hydroiol.*, XIII, 2, 199-290.
- ROUGIER-MICHAUD, Cl. (1969). Données sur la biocenose planctonique du lac d'Annecy. *Rech. en hydrobiol. Cont.*, 1, 97-119.
- SAYAR, M. (1966). Etude géologique, hydrologique, hydrogéologique, climatologique, limnologique, hydrochimique du bassin de la Dranse de Morzine. Thèse Fac. Sciences, Paris.
- SUCHET, M. (1954). Etude physico-chimique des eaux du lac d'Annecy. *Ann. Stat. Centr. hydrobiol. appli.*, 5, 159-184.
- SIWERTZ, E., P. BLANC, M. MEYBECK et Ph. OLIVE. (1971). Etude de la variabilité des éléments nutritifs dans les rivières. Exemple de la Dranse du Chablais (Haute-Savoie). *Arch. Sci. Genève*, 2.