



Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman

Michel Meybeck

► To cite this version:

Michel Meybeck. Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman. Hydrologie. Université de Paris, 1971. Français. NNT : . tel-00822170

HAL Id: tel-00822170

<https://theses.hal.science/tel-00822170>

Submitted on 14 May 2013

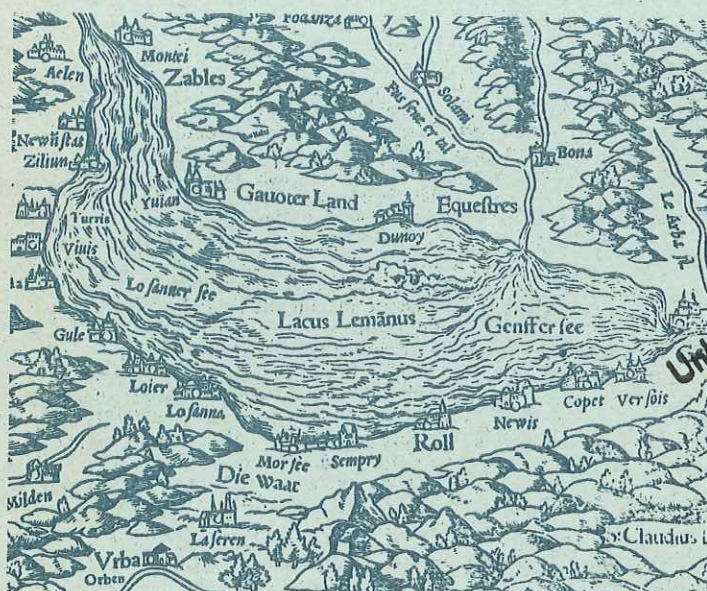
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE PARIS

BILAN HYDROCHIMIQUE ET GEOCHIMIQUE DU LAC LEMAN

par Michel Meybeck



Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 78 63 54 27 - Fax 04 78 51 40 58
Mail: phalour@ujf-grenoble.fr

CENTRE DE RECHERCHES GEODYNAMIQUES

THONON - LES - BAINS 74 FRANCE

1970

THESE

Présentée à

LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

pour l'obtention du

DOCTORAT DE 3ème CYCLE

SPECIALITE GEODYNAMIQUE EXTERNE

par Michel MEYBECK

*BILAN HYDROCHIMIQUE et
GEOCHIMIQUE DU LAC LEMAN*

Soutenue le : 9. 01. 1971

devant la Commission composée de

Président L. Glangeaud

Examineurs : P. Bellair

Ph. Olive

Invité : A. Burger

CENTRE DE RECHERCHES GEODYNAMIQUES

74 - THONON (FRANCE)

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tel. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail: ptalour@ujf-grenoble.fr

AVANT PROPOS

Au moment de soumettre mon travail à l'appréciation du jury, c'est un agréable devoir d'adresser ici mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé.

- A Monsieur le Professeur Louis Glangeaud, Membre de l'Institut, pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'acceptant comme Assistant dans son Laboratoire et pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury.

- A Monsieur le Professeur Pierre Bellair qui a bien voulu examiner et critiquer ce travail.

- A Monsieur le Professeur André Burger, spécialement venu de Neuchâtel, qui représente à ce jury le pays qui est le berceau de la limnologie.

- A Monsieur Philippe Olive, Sous-Directeur du Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon, qui m'a accueilli, il y a trois ans, dans l'équipe du C.R.G. Là j'ai pu bénéficier des meilleures conditions de travail, et les nombreuses études que nous avons effectuées en équipe m'ont beaucoup enrichi.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le concours de nombreuses personnes. L'ensemble des prélèvements sur le lac a été réalisé avec Monsieur G. Olivier, toujours avec compétence et gentillesse, je n'oublierai pas toutes ces sorties sur le Léman et ce travail lui doit beaucoup. J'ai également une grande dette envers Monsieur P. Blanc et Madame A. Noir qui ont effectué avec beaucoup de rigueur l'ensemble des analyses chimiques qui sont à la base d'une grande partie de cette étude.

J'ai aussi bénéficié du concours de Madame S. Chessel pour les analyses de tritium et de Mesdames O. Contamine et L. Ferrari pour les nombreuses filtrations et analyses physiques des sédiments, à toutes trois j'adresse mes vifs remerciements.

La réalisation technique de ce travail a été assurée avec beaucoup de soin par Mademoiselle M. Lecraz et Madame Duchamp pour la frappe, Mademoiselle A.M. Chiara pour la mise en page et le tirage et Monsieur R. Carrier pour les dessins, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Mes remerciements vont également à :

- Messieurs C. Bobier et J. Petit de la Station de Géodynamique sous-marine de Villefranche-sur-Mer qui ont rendu possible la campagne de sismique continue.

- Messieurs Guenin, Kolher et Fischer de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique de Berne pour les documents très utiles qu'ils ont mis à ma disposition.

- Messieurs Burkard et Monod de la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman et du Rhône contre la Pollution pour les renseignements précieux que j'ai trouvé dans leurs rapports.

Tout au long de ce travail, j'ai pu bénéficier des conseils de mes camarades du Centre Géodynamique, Mademoiselle E. Crouzet, Messieurs M. Bakalowicz, J.M. Martin, E. Siwertz et en particulier P. Hubert avec lequel j'ai eu le plaisir de partager ce magnifique terrain de thèse qu'est le Léman. Je n'oublierai pas cette amicale collaboration.

Enfin que ceux qui, par leur amitié et leur affection, m'ont soutenu tout au long de ce travail, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

I N T R O D U C T I O N

=====

Dès le début du 19ème siècle de nombreux chercheurs, comme De Saussure, se sont intéressés au Léman, mais ce fut Forel qui, à partir de 1880, mena à bien la première étude complète du Léman. On peut même dire que son travail fut à la base de la science des lacs : la limnologie. Ce savant encyclopédiste entreprit de vastes recherches allant de la physico-chimie des eaux à l'histoire des populations riveraines en passant par la sédimentologie, la biologie, etc... Ces travaux sont essentiels pour deux raisons : tout d'abord c'est la première étude moderne d'un lac, ensuite Forel nous donne l'état du Léman vers 1880, tout particulièrement en ce qui concerne la qualité des eaux, le cycle du plancton, la faune et la flore. Il manquait cependant une carte bathymétrique précise des fonds du Léman. Elle fut réalisée de 1886 à 1889 par Hörnlimann pour la partie suisse et Delebecque pour la partie française. Les éléments de base étant réunis, de nombreux chercheurs ont poursuivi les recherches de Forel. Citons notamment, avant 1945, Gagnebin, Parejas, Romieux, pour la géologie et la sédimentologie, Kreitmann et Mercanton pour l'étude des courants. Après 1945 les études se sont très diversifiées, citons Dussart pour l'hydrologie, Juget pour la biologie, Monod pour la chimie, Novel pour la bactériologie. Ces dernières années le Léman a été étudié au *Centre de Recherches Géodynamiques* (Glangeaud, Serruya, Olive, Sauvage, Vergnaud-Grazzini, Hubert, Meybeck, Fontes,...) par des méthodes nouvelles, comme la stratigraphie des sédiments superficiels, la sismique continue, les isotopes, la palynologie.

L'accès aisé du Léman, la proximité de nombreux Centres de Recherches ou Universités ont beaucoup favorisé ces recherches. Il se dessine actuellement des regroupements des chercheurs des différentes

disciplines. D'une part la "Commission Franco-Suisse de Protection du Léman et du Rhône contre la Pollution" groupe tous les laboratoires travaillant en hydrochimie et biologie. (Laboratoires cantonaux des cantons de Genève, de Vaud et du Valais, Station d'Hydrobiologie Lacustre de l'I.N.R.A. à Thonon, et Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon). Ses travaux de contrôle de la qualité des eaux du lac sont très complets et nous ont servi plusieurs fois. D'autre part il s'est constitué, il y a deux ans, un groupe d'étude géologique du Léman, *Geolem*, constitué par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, l'Université de Genève et le Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon. Ce groupe travaille essentiellement sur la structure du Léman et la géochimie des sédiments avec application à l'étude de la pollution des sédiments, phénomène non considéré jusqu'à présent.

On pouvait donc considérer que le Léman était un lac parfaitement connu. Mais en fait de nombreux points restaient encore imparfaitement étudiés, notamment en ce qui concerne la chimie des eaux et des sédiments du Léman, ainsi que la structure de la cuvette lémanique. De plus, jusqu'ici aucun bilan global du bassin versant du Léman n'avait été entrepris. Un tel bilan hydrochimique, sédimentaire et géochimique est important pour trois raisons :

- le Léman est situé dans un environnement climatique, géologique et géographique qui détermine ses caractères généraux. L'étude des apports permettra donc de connaître la *nature des bassins versants* et de leur relation avec le lac.

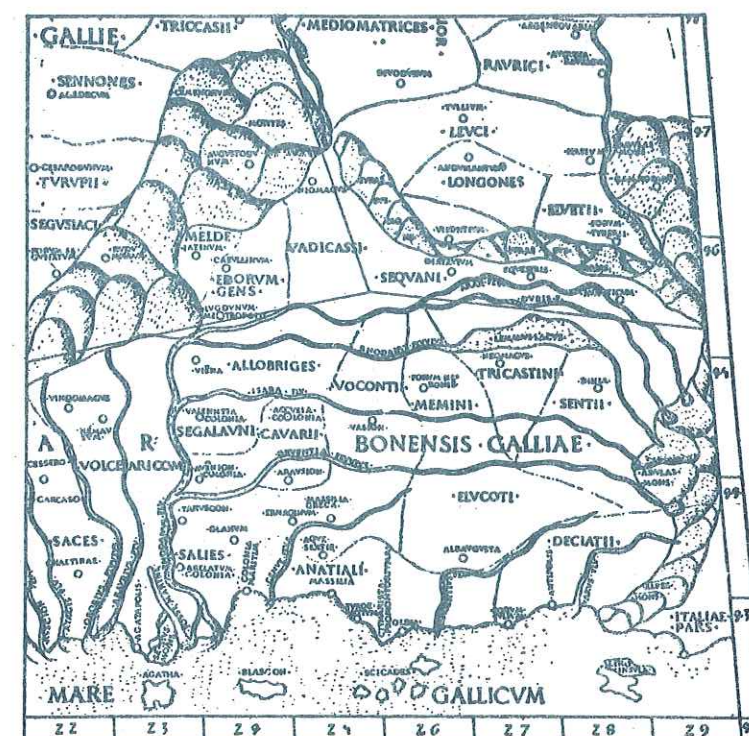
- à l'heure où les *problèmes d'eutrophisations et de pollutions* se posent avec acuité, l'établissement des bilans des lacs est un problème essentiel mais très délicat à mettre en oeuvre.

- enfin du point de vue de la géodynamique externe le bilan d'un bassin versant de 8 000 km² donne des indications précieuses sur

les *phénomènes actuels d'érosion et de transport*. En ajoutant à ces données celles obtenues pour le Bodensee, nous obtiendrons des résultats concernant toute cette partie des Alpes centrales.

Notre étude a duré seulement trois ans. Pour un lac comme le Léman, dont le temps de renouvellement des eaux est de l'ordre de 10 ans, cette période est encore insuffisante. Aussi, nous avons été amené à tenir le plus grand compte des *échelles de temps et d'espace* des phénomènes principaux, afin de présenter un bilan aussi représentatif que possible.

CHAPITRE I



CARACTERES GENERAUX DU LEMAN

P R E M I E R C H A P I T R E
=====

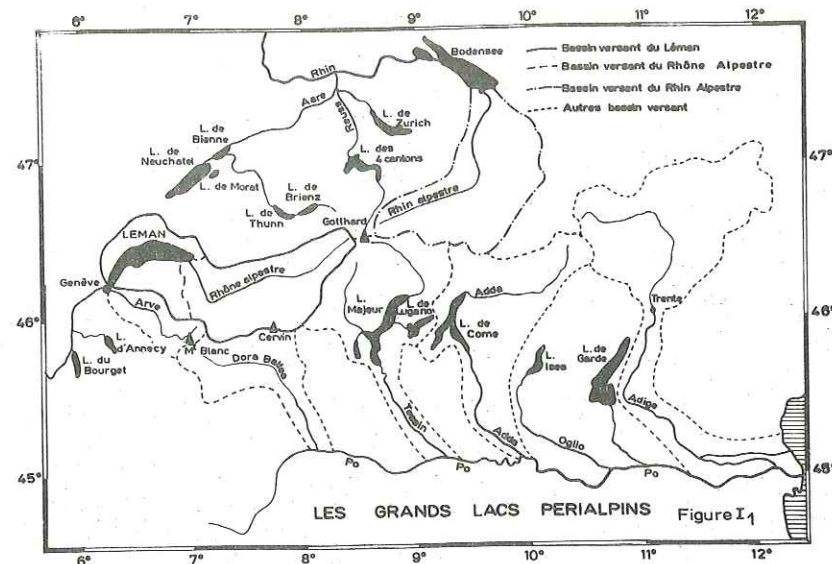
CARACTERES GENERAUX DU LEMAN

1.1. - Données morphométriques.

L'arc Alpin est jalonné de nombreux lacs qui ont en commun leur grande dimension et une origine entièrement ou en partie glaciaire (figure I₁), parmi eux se trouve le Léman. C'est un des plus grands lacs d'Europe occidentale : il est le premier pour le volume des eaux, le quatrième pour la profondeur maximale (après le lac de Come - 410 m -, le lac Majeur - 372 m - et le lac de Garde - 346 m). Il est souvent divisé en deux parties : le *Grand Lac* qui occupe la cuvette centrale et le *Petit Lac* ou Lac de Genève qui est la partie occidentale étroite et peu profonde. Les caractéristiques du Léman sont résumées dans le tableau suivant (d'après Forel, 1895 et Delebecque, 1898).

TABEAU I₁ : Caractéristiques morphométriques du Léman

	Léman	Grand Lac	Petit Lac
Altitude du plan d'eau	372 m		
Volume (V)	89 km ³	85,8 km ³	3,2 km ³
Surface (S)	582 km ²	503 km ²	79 km ²
Profondeur maximale	309 m	309 m	76 m
Profondeur moyenne (V/S)	152 m	172 m	41 m
Longueur	72 km	49 km	23 km



BASSIN VERSANT DU LEMAN

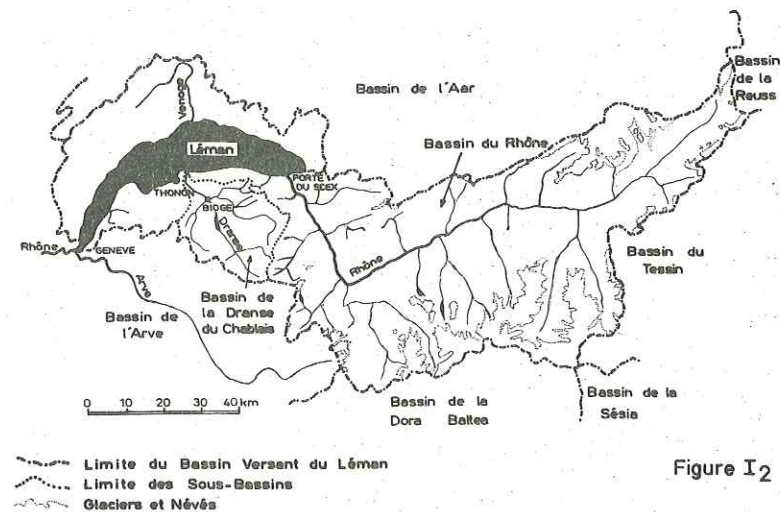


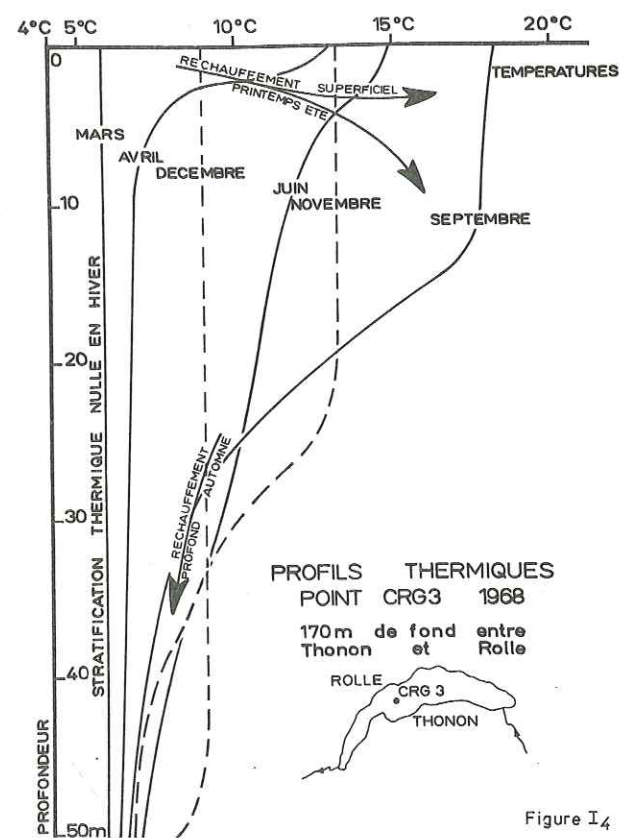
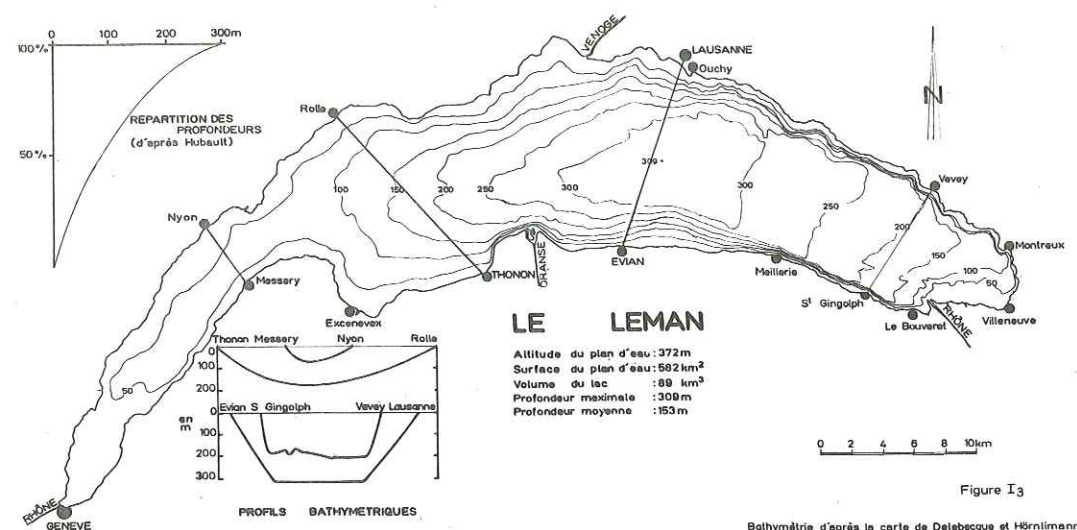
Figure I2

1.2. - Hydrologie.

L'ensemble du bassin versant du Léman couvre une surface de 7 975 km², son altitude moyenne est de 1 670 m (figure I₂). Le principal affluent est le Rhône Alpestre qui provient du Valais, à lui seul il représente 70 % des apports d'eau au lac. La Dranse du Chablais est le deuxième affluent avec 10 % des apports, le reste des apports est constitué par une vingtaine de petits affluents parmi lesquels il convient de citer la Venoge. L'exutoire du Léman, régularisé par des vannes, est à Genève.

1.3. - Bathymétrie.

Le centre du Grand Lac est caractérisé par une vaste étendue plane de 12 km sur 6 km, d'une profondeur de 307 à 309 m, elle est généralement appelée *plaine centrale*. Les fonds entre la plaine centrale et l'embouchure du Rhône correspondent au delta sous-lacustre de cette rivière. Vers l'ouest les fonds remontent régulièrement jusqu'à la barre de Promenthoux (61 m de profondeur) qui sépare le Grand Lac du Petit Lac (figure I₃). Des coupes transversales montrent bien trois types de profils : le Petit Lac présente des profils semi-ovales, les pentes sont régulières jusqu'au milieu du profil, dans la partie occidentale du Grand Lac le profil devient triangulaire, par contre dans la partie orientale il est nettement trapézoïdal : les pentes sont abruptes et les fonds presque horizontaux. Une caractéristique importante des fonds du Léman est la présence d'une échancrure dans le delta sous-lacustre du Rhône, la carte de Delebecque-Hörnlimann (Delebecque 1898) montre très bien cette particularité sur laquelle nous reviendrons. Nous avons déjà signalé le delta du Rhône, d'autres deltas sous-lacustres sont visibles : le principal est celui de la Dranse du Chablais, citons aussi celui de la Venoge. Enfin signalons quelques parties peu profondes du lac comme les baies d'Excenevex et de Ville-neuve.



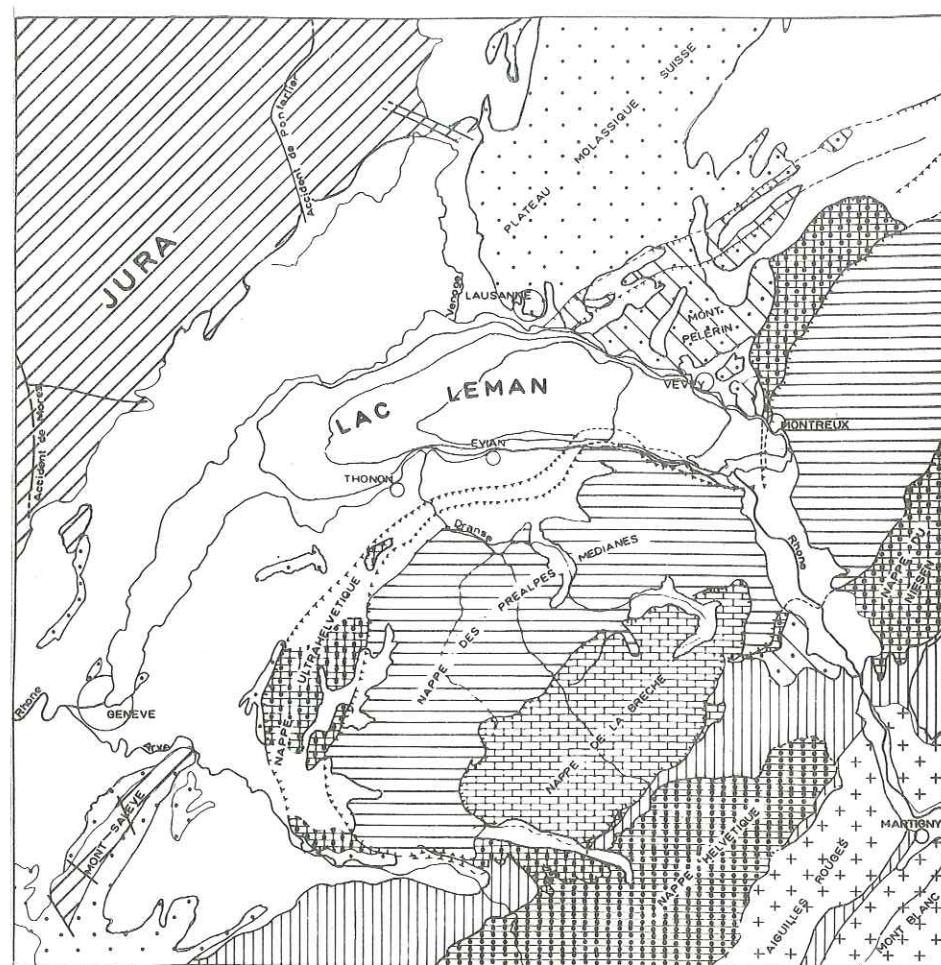
1.4. - Thermique et chimie des eaux.

La thermique du Léman est bien connue depuis Forel, ce dernier l'avait classé dans les lacs "tropicaux", Dussart en fait un lac "monomictique chaud de premier ordre". Le Léman a toujours en effet une température supérieure à 4°C, et les eaux profondes ont une température voisine de 4°C pendant toute l'année. Il comprend une période de circulation en hiver et une période de stratification en été. En effet l'énorme volume du Léman et sa grande profondeur font que le refroidissement hivernal n'est jamais assez intense pour refroidir toute la masse en dessous de 4°C (maximum de densité de l'eau pure). Les rares congélations du Léman sont reportées pour la rade de Genève peu profonde. La figure I₄ montre bien les variations de température du Lac et le processus de réchauffement. La thermocline qui représente la profondeur du lac où le gradient de température est le plus élevé (point d'inflexion des courbes températures-profondeur) commence à apparaître en mars-avril en surface, s'abaisse progressivement jusqu'à 50 m en novembre-décembre, puis s'atténue complètement de décembre en mars. La thermocline est très accusée en période de stratification thermique de juillet en septembre, elle se situe alors entre 15 et 20 m, le lac est ainsi nettement séparé en deux parties entre lesquelles les échanges sont très difficiles : l'épilimnion entre la surface et la thermocline et l'hypolimnion entre la thermocline et le fond.

Le Léman est peu minéralisé : environ 200 mg/l d'éléments dissous, les éléments principaux sont les bicarbonates, les sulfates, le calcium et le magnésium. Nous reviendrons plus en détail sur la chimie des eaux dans le chapitre correspondant.

1.5. - Géologie.

Le Léman est situé dans la dépression molassique entre les ensembles alpins et jurassiens : au Sud les nappes des préalpes du Chablais et du Valais, et au Nord la Haute Chaîne du Jura dont les



CARTE STRUCTURALE DE LA REGION DU LEMAN

D'après la carte géologique suisse au 1/200 000

0 2 4 6 8 10 km



Figure I₅

plis sont soumis à de nombreux décrochements (Pontarlier, Morez). Le Lac occupe donc une position particulièrement importante entre ces deux domaines. La figure I₅ représente la structure du Bassin Lémanique d'après la carte géologique Suisse au 1/200 000. Depuis, un grand nombre de données nouvelles ont été apportées, en particulier par les études de sismique continue sur le lac. Ces problèmes seront discutés dans le cinquième chapitre.

1.6. - Climat de la région du Léman.

B. Blavoux et al (1962) ont défini les caractères climatiques principaux de la région du Léman ainsi : la température moyenne annuelle de l'air est de 9°38 à Genève. La température moyenne des eaux de surface est de 1°85 supérieure à celle de l'air à Thonon, le lac est ainsi responsable d'un microclimat; par exemple l'amplitude annuelle de la température de l'air à Thonon est de 18°C, soit 2°C inférieure à celle qu'on pourrait atteindre si le Léman n'existait pas. L'humidité relative de l'air est en moyenne de 75 %. La pluviosité sur le plan d'eau est environ de 1 000 mm/an, et l'évaporation est estimée entre 650 mm/an et 850 mm/an.

1.7. - Comparaison du Léman avec le Bodensee.

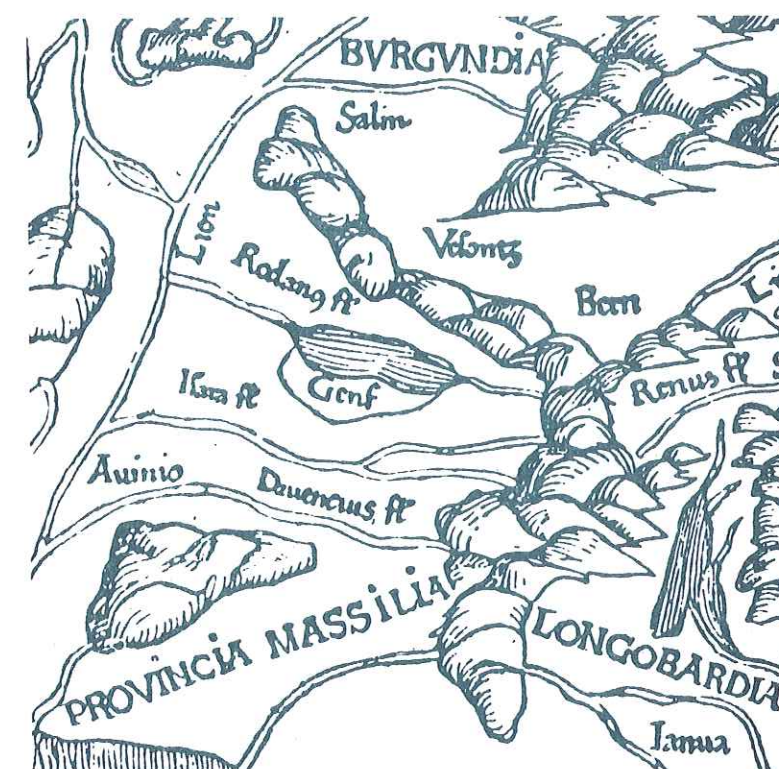
Il nous a semblé intéressant de comparer le Léman au Bodensee dont les caractéristiques sont analogues (Dussart 1963) :

	Bodensee	Obersee	Untersee
Surface	539 km ²	476 km ²	63 km ²
Volume	48 km ³	47,6	0,84
Altitude du plan d'eau	395 m		
Profondeur maximale	252 m	252	46
Profondeur moyenne	92 m		

Le Bodensee peut être divisé en deux bassins distincts : l'Obersee et l'Untersee. L'Obersee se déverse dans l'Untersee par le Rhin lacustre (Seerhein) au niveau de la ville de Constance qui sépare les deux lacs.

Les analogies entre le Bodensee et le Léman ne s'arrêtent pas aux données morphométriques, nous verrons que ces deux lacs ont des situations géographiques, hydrologiques et géologiques comparables. Le Bodensee et son bassin versant étant très bien connus notamment après les travaux de Müller (1964, 1967, 1968...), Waibel (1962) et de la Commission Internationale d'Etude du Bodensee. Nous pourrions donc les étudier parallèlement (chimie, sédimentologie, structure, etc...). Comme ces deux lacs jouent le rôle d'intégrateur de leurs bassins versants, il sera possible d'obtenir des données concernant les taux d'érosions sur l'ensemble des Alpes Suisses.

CHAPITRE II



APPORTS DES RIVIERES EN ELEMENTS DISSOUS

DEUXIEME CHAPITRE

APPORTS DES RIVIERES EN ELEMENTS DISSOUS

2.1. - Caractères de l'étude chimique des affluents du Léman.

Nous avons étudié les deux affluents principaux du Léman (figure I₂) : le Rhône et la Dranse du Chablais qui représentent à eux deux 85 % des apports d'eau au Léman. Le tableau suivant donne leurs caractéristiques ainsi que celles du Rhin à l'entrée du Bodensee auquel nous les comparons.

	Rhône (Porte de Scex)	Dranse	Rhin alpestre
Surface du bassin versant	5 220 km ²	535 km ² (Ardestani)	6 100 km ²
Module interannuel	180 m ³ /s (1935-1968)	21,5 m ³ /s (1958-1968)	224 m ³ /s
Débit spécifique	34,6 l/s/km ²	43,4 l/s/km ²	36,7 l/s/km ²
Altitude moyenne du bassin versant	2 030 m	1 450 m	1 700 m
Régime	nivo-glaciaire (crue de juin à août)	pluvio nival (crue en avril)	nivo- glaciaire

Le comportement de ces deux rivières n'est plus entièrement naturel : la Dranse comporte de petits aménagements hydrauliques, le Rhône lui-même n'est pas barré mais de nombreux affluents le sont (barrage de la Grande Dixence, de Moiry, etc...), aussi les débits

peuvent-ils être influencés surtout en période de basses eaux. De plus, les points de prélèvements sur la Dranse (pont de Vongy) et sur le Rhône (porte du Scex) sont situés à la fin du parcours de la rivière et donc en aval de différentes sources de pollutions. Néanmoins ainsi que nous le verrons, les effets de la pollution ne sont sensibles que pour un petit nombre des éléments étudiés. Enfin les bassins versants de la Dranse et du Rhône sont relativement homogènes au point de vue géographique et géologique, il ne se produira donc pas de phénomènes trop différents au niveau des sous-bassins. Nous pourrons donc quand même étudier le chimisme naturel de ces deux rivières.

Pour l'établissement du bilan des apports au Léman il nous fallait des données sur les affluents restants. Nous les avons trouvées dans les rapports internes de la Commission Internationale de Protection des Eaux du Léman et du Rhône, effectués par P. Burkard et qui portent sur les éléments suivants : K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , NO_3^- . Les concentrations des éléments manquants (SiO_2 , Na^+ , SO_4^{--} , HCO_3^-) ont été extrapolées à partir de la Dranse en raison de la nature identique des bassins versants.

2.2. - Méthodes d'analyses employées.

Les analyses furent toutes effectuées au Laboratoire de chimie du Centre de Recherches Géodynamiques, sous la direction de P. BLANC assisté de Mme A. NOIR. Les éléments suivants furent systématiquement dosés : SiO_2 dissoute, calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates, bicarbonates, carbonates, nitrates par les méthodes suivantes :

- *silice* : spectrophotométrie du silico-molybdate réduit par l'acide aminonaphtol sulfonique. Précision 5 %, limite de dosage 0,01 mg/l.

- *calcium* : complexométrie à l'EDTA. Précision 1 %, limite de dosage 0,01 mg/l.

- *magnésium* : complexométrie à l'EDTA (différence entre dureté totale et calcium) ; depuis 1969 par Absorption Atomique. Précision 5 % par complexométrie et 1 % par Absorption Atomique, limite de dosage 0,005 mg/l.

- *sodium et potassium* : photométrie de flamme en émission, depuis 1969 par Absorption Atomique. Précision 5 % par photométrie et 2 % par Absorption Atomique, limite de dosage 0,01 mg/l.

- *chlorures* : spectrophotométrie au thiocyanate mercurique en présence de fer ferrique, en milieu perchlorique. Précision 2 %, limite de dosage 0,05 mg/l.

- *sulfates* : turbidimétrie. Précision 5 %, limite de dosage 2 mg/l.

- *bicarbonates* : titrimétrie à l'acide sulfurique N/50 en présence d'indicateur mixte. Précision 2 %, limite de dosage 0,1 meq/l.

- *carbonates* : titrimétrie à l'acide sulfurique N/50 en présence de phénolphtaléine. Précision 10 %, limite de dosage 0,15 meq/l.

- *nitrates* : spectrophotométrie à l'acide phénol disulfonique. Précision 5 %, limite de dosage 0,05 mg/l.

2.3. - Variation des éléments dissous dans le Rhône.

2.3.1. - Caractères du bassin.

Le bassin du Rhône est presque entièrement situé dans le Valais, les terrains traversés sont à la fois cristallins (Gotthard, Aar, Mt Blanc) et calcaires (Préalpes du Chablais et du Valais). Les eaux sont bicarbonatées calciques riches en sulfates et magnésium. Depuis Forel (1895) et Delebecque (1898), les travaux sont peu nombreux. La présente étude porte sur 25 analyses réparties de Novembre 1967 à Mars 1970, les résultats complets sont reportés sur le tableau II₂ en annexe de ce chapitre.

2.3.2. - Corrélation entre la concentration et le débit.

La grande variabilité de la concentration avait déjà été remarquée par Delebecque (1898) et Forel (1895), ce dernier avait déjà écrit : "pour le Rhône comme pour la Dranse la teneur en matières dissoutes est fonction inverse du débit" (Le Léman tome II, page 597). Examinons les relations entre la concentration C_d et le débit instantané Q_1 . Elles sont du type

$$C_d = A Q_1^B$$

A et B sont des coefficients dépendant des unités choisies.

Le graphe de cette fonction est une droite en coordonnées bi logarithmique. Pour chaque élément nous allons voir la qualité de la corrélation et la dispersion des mesures autour de cette droite expérimentale. Nous avons pris le débit instantané et non pas journalier : en effet de grosses variations de débit peuvent être quelquefois enregistrées sur le Rhône Alpestre et encore plus souvent sur la Dranse du Chablais en l'espace de quelques heures comme le montre la figure II₆.

- *bicarbonates* : (figure II_{1a}). Corrélation moyenne, faible variation, dispersion de 70 mg/l à 120 mg/l.

- *calcium* : (figure II_{1b}). Corrélation nette, dispersion de 32 mg/l à 65 mg/l.

- *sulfates* : (figure II_{1c}). Corrélation nette avec une variation du simple au triple, de 27 mg/l à 91 mg/l.

- *magnésium* : (figure II_{1d}). Bonne corrélation, variation du simple au triple, de 2,6 mg/l à 8,8 mg/l.

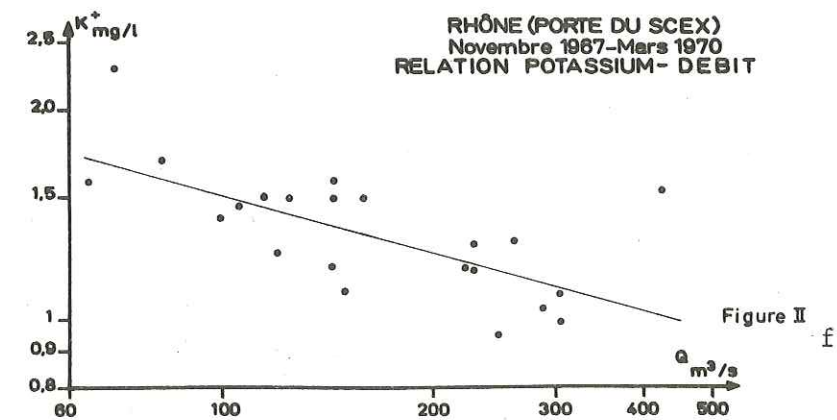
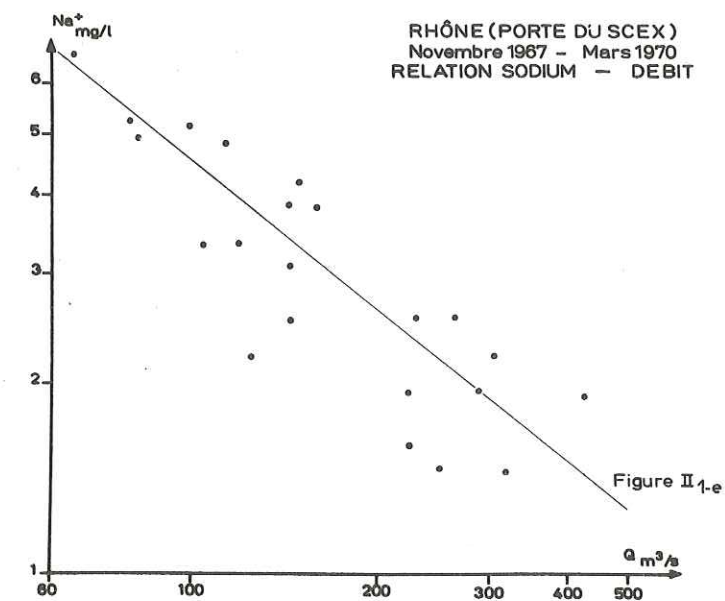
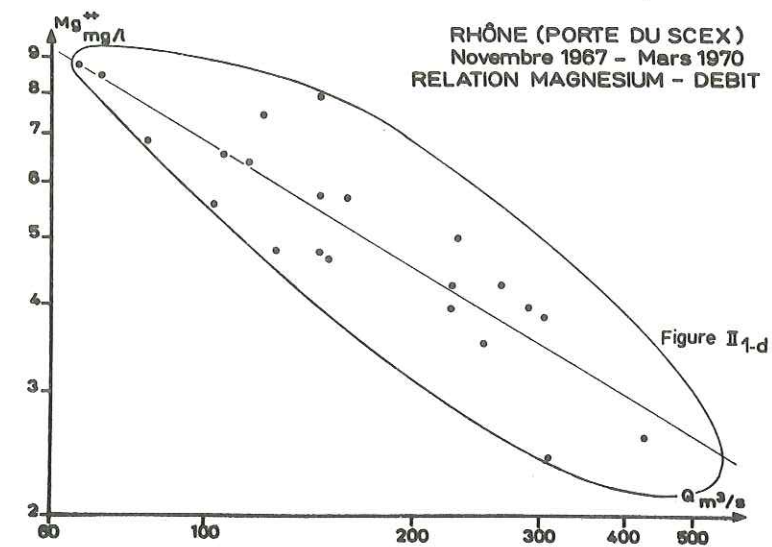
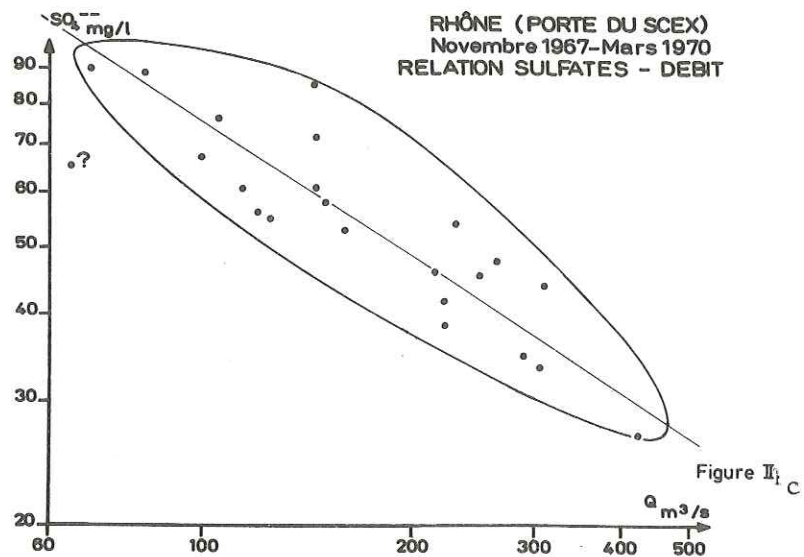
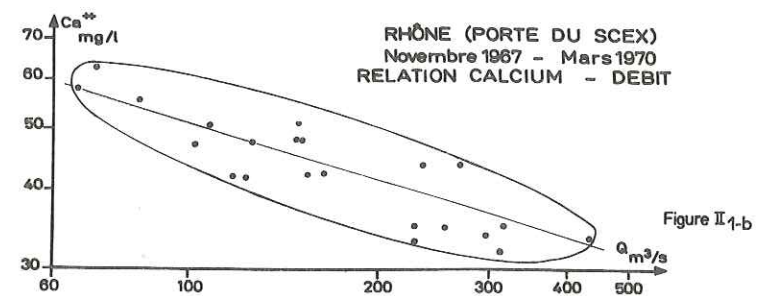
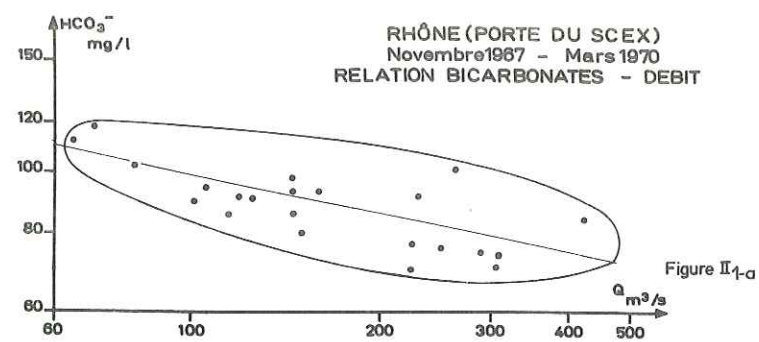
- *sodium* : (figure II_{1e}). Corrélation moyenne, variations très fortes, de 1,6 mg/l à 6,6 mg/l.

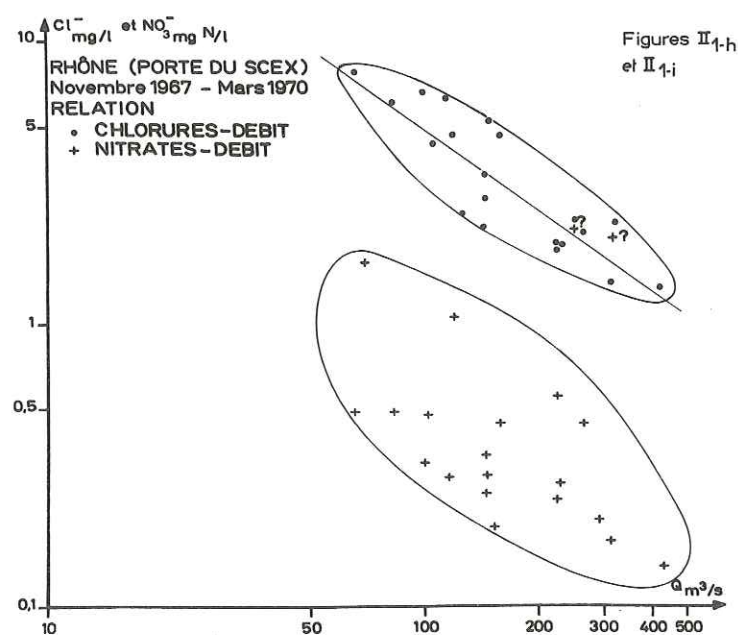
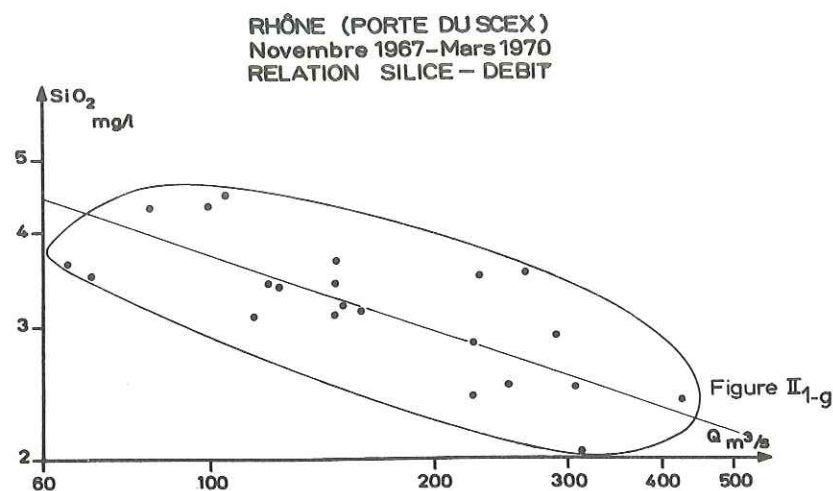
- *potassium* : (figure II_{1f}). Corrélation médiocre, variations de 1 mg/l à 2,3 mg/l.

- *silice* : (figure II_{1g}). Corrélation médiocre, variations de 2 mg/l à 4,5 mg/l. Cette variation de la silice est intéressante, en effet, certains auteurs comme Davis (1964) ont signalé la constance de la silice vis-à-vis des débits. Nous discuterons du comportement plus loin (2.6.2.).

- *chlorures* : (figure II_{1h}). La corrélation est assez bonne. Davis l'avait déjà remarqué en particulier pour les rivières Matanuska et Connecticut. Ceci est remarquable car les chlorures sont souvent rejetés par les usines, les concentrations sont alors beaucoup plus indépendantes du débit. Par exemple le 8 janvier 1968 nous avons dosé 16,6 mg/l de Cl^- pour un débit de 70 m³/s, le point représentatif de ce prélèvement n'a pas été porté sur la figure. Cette corrélation chlorures-débits pourrait signifier que le Rhône n'est pas encore très atteint par la pollution industrielle.

- *nitrates* : (figure II_{1i}). La corrélation avec les débits est faible et deux points (6 et 7 Août 1968) sortent du nuage "normal". Les teneurs en nitrates sont donc très variables ce qui est





sans doute dû aux pollutions.

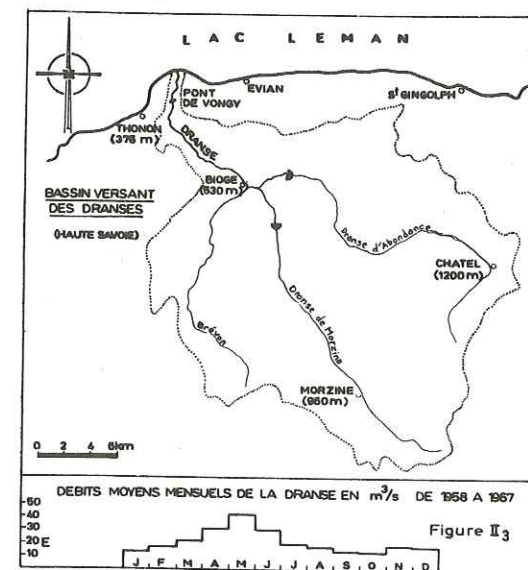
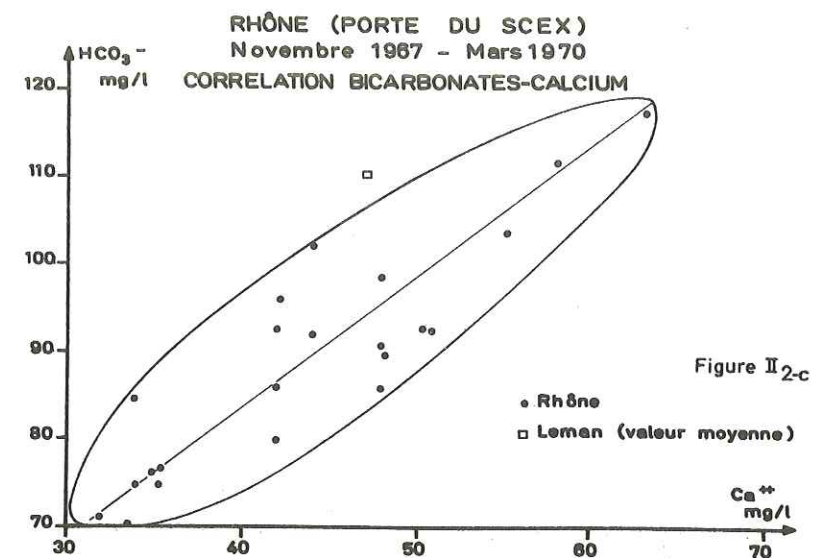
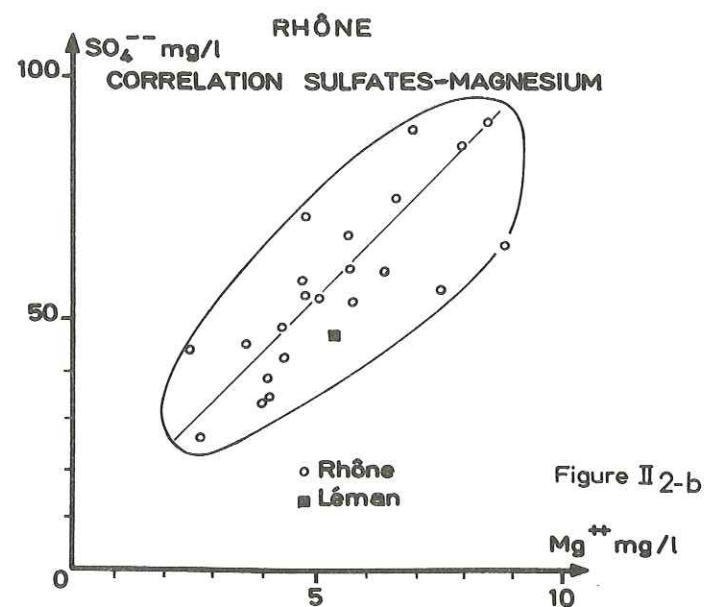
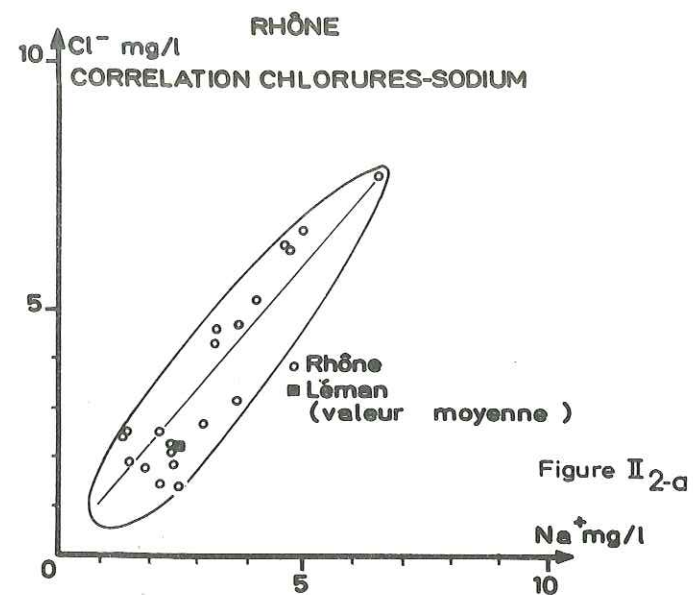
Il ne faut pas s'étonner de la grande dispersion des concentrations en nitrates. Des études poussées ont été réalisées par l'"Internationale Gewässerschutz Kommission für den Bodensee" qui remarque, dans son rapport n° 6 sur les apports au Bodensee en éléments polluants, des variations très fortes en quelques heures sans que le débit du Rhin ait sensiblement varié :

Mois	Eléments	Variation sur 7 jours (mg/l)	Variation sur 1 jour (mg/l)
Février 1961	Chlorures	1,05 - 1,55	1,05 - 1,55
Débit de 101 m ³ /s à 133 m ³ /s	Phosphore total	0,06 - 0,17	0,06 - 0,17
	Azote total	0,95 - 2,56	1,07 - 2,56
Juillet 1961	Chlorures	0,3 - 2,4	0,3 - 2,0
Débit variable de 300 m ³ /s à 545 m ³ /s	Phosphore total	0,05 - 0,45	0,05 - 0,30
	Azote total	1,06 - 2,44	1,06 - 2,32
Octobre 1961	Chlorures	0,7 - 5,4	0,7 - 4,2
Débit de 84 m ³ /s à 126 m ³ /s	Phosphore total	0,01 - 0,28	0,01 - 0,28
	Azote total	0,8 - 1,96	0,8 - 1,96

Aucune variation caractéristique des saisons n'a pu être mise en évidence dans aucun des éléments étudiés : à débit égal les concentrations d'hiver et d'été ne montrent pas de différences significatives. Il est possible que ces liaisons existent pour les bicarbonates ou la silice mais nous ne disposions pas d'assez d'analyses.

2.3.3. - Corrélation entre les éléments.

Nous avons effectué plusieurs diagrammes de dispersion ("scatter diagram") pour déterminer les relations entre les éléments.



La corrélation la plus forte s'observe entre les chlorures et le sodium (figure II_{2a}) on note également une corrélation nette entre les sulfates et le magnésium (figure II_{2b}), et les bicarbonates et le calcium (figure II_{2c}). Ces corrélations ne sont pas étonnantes, elles correspondent à des origines géochimiques communes et aux liaisons chimiques entre les éléments.

2.4. - Variations des éléments dissous dans la Dranse.

2.4.1. - La Dranse du Chablais est formée par la réunion de trois rivières : la Dranse d'Abondance, la Dranse de Morzine et la Dranse de Bellevaux ou Brevon (figure II₃). L'ensemble du bassin est situé dans les Préalpes du Chablais, nappes calcaires et gréseuses recouvertes quelquefois par des dépôts quaternaires fluvio-glaciaires. Les principales études du chimisme de la Dranse ont été réalisées par Ardestani (1965), Sayar (1966) et Blanc (1968). Comme le Rhône, la Dranse est bicarbonatée calcique, sa teneur en sulfate est légèrement plus forte. De Novembre 1967 à Décembre 1969 une cinquantaine d'analyses totales ont été réalisées. Les prélèvements ont été répartis également sur toute l'année et des études particulières ont été réalisées sur certains épisodes hydrologiques (crue d'orage, crue de fonte de neige, crue et étiage exceptionnels). Enfin nous avons tenté de différencier les eaux des trois affluents composant la Dranse du Chablais.

2.4.2. - Corrélation entre la concentration et le débit.

Comme pour le Rhône la variation principale des éléments dissous est due au débit.

- *bicarbonates* : (figure II_{4a}). La corrélation est assez bonne, une certaine dispersion peut s'observer. En effet les valeurs sont légèrement plus fortes en hiver qu'en été, cette distinction saisonnière est sans doute reliée ici à la température. La variation observée est du simple au double (120 mg/l à 250 mg/l).

- *sulfates* : (figure II_{4b}). La corrélation est assez bonne : on observe une dispersion dans les valeurs, surtout pour les débits extrêmes. Nous l'expliquerons par la suite comme pour le Rhône. Le domaine de variation est très large (12 mg/l à 160 mg/l).

- *calcium* : (figure II_{4c}). La corrélation est bonne, la variation est du simple au double (52 mg/l à 110 mg/l).

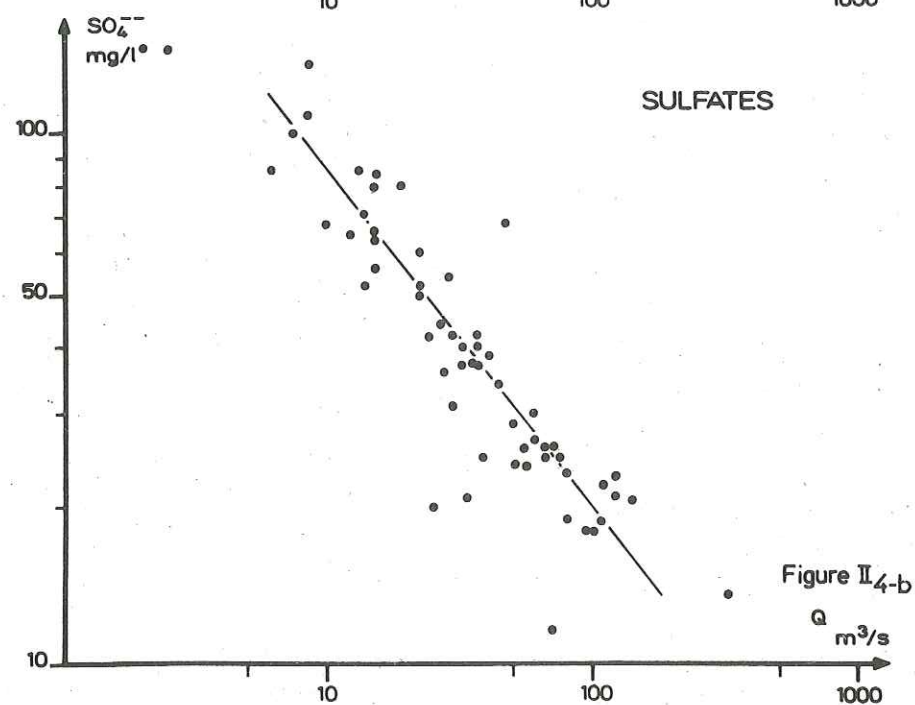
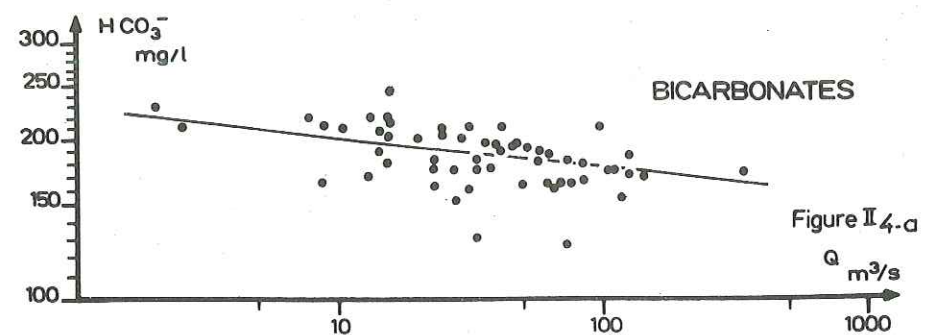
- *magnésium* : (figure II_{4d}). La corrélation est bonne, les teneurs varient du simple au quadruple (4,3 mg/l à 16 mg/l).

- *sodium* : (figure II_{4e}). Le sodium marque une très grande dispersion, la corrélation avec le débit est très faible, le même phénomène s'observe pour le potassium. Il faut sans doute voir là un indice de pollution : en effet, si l'ensemble des valeurs est groupé entre 0,7 et 3,5 mg/l pour le sodium, on note une valeur de 9,3 mg/l à l'étiage très prononcé de Novembre 1969. De même pour le potassium les valeurs sont toutes comprises entre 0,5 mg/l et 2 mg/l sauf une à 3,3 mg/l.

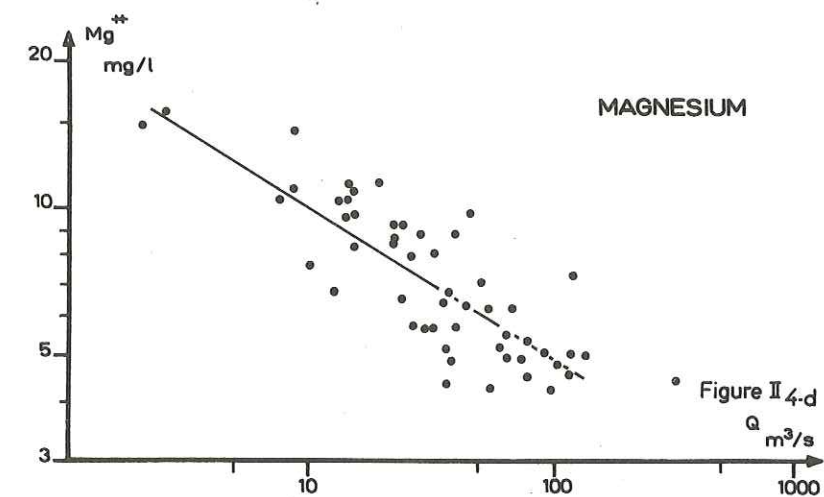
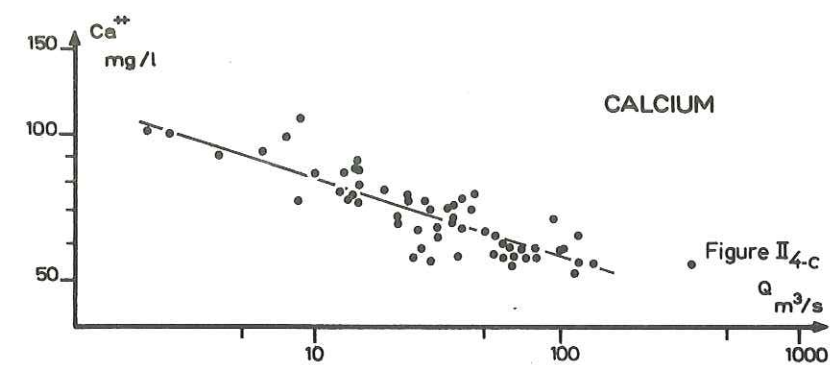
- *silice* : (figure II_{4f}). La dispersion des teneurs est très forte, et aucune corrélation avec le débit ne peut être mise en évidence. Nous avons là un exemple typique de la non-variation de la silice avec le débit. Ce phénomène a déjà été remarqué pour certaines rivières (Davis, 1964), mais pour d'autres (Carbonnel, 1965), la silice varie énormément avec le débit.

Par contre nous avons observé un groupement net pour chaque crue : la teneur est relativement constante quelque soit le débit. Il semblerait donc que la silice provienne beaucoup plus des eaux superficielles (ruissellement et imprégnation des sols) que des eaux souterraines.

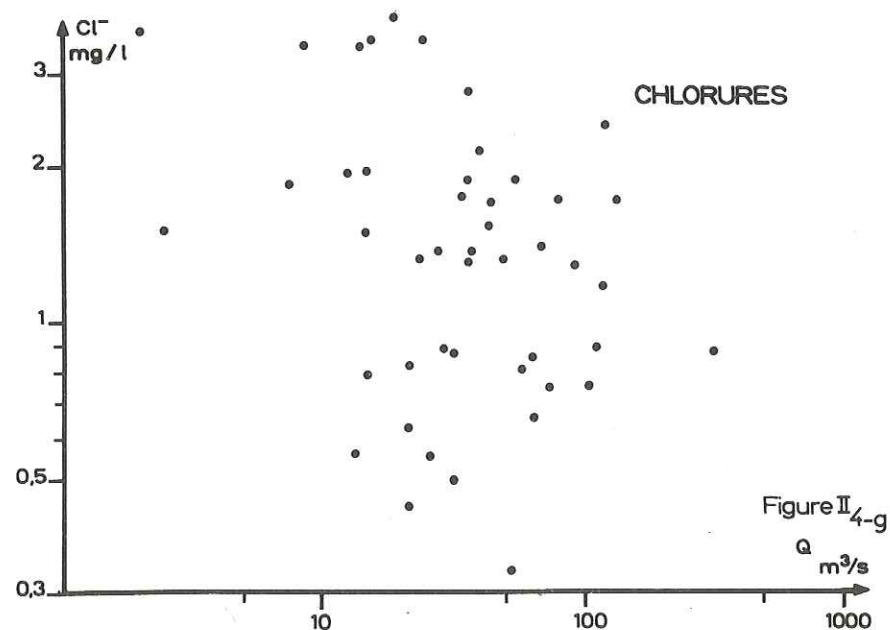
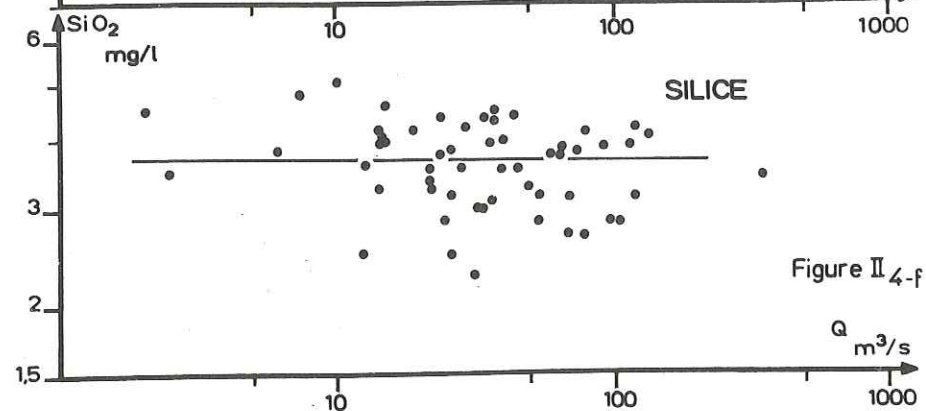
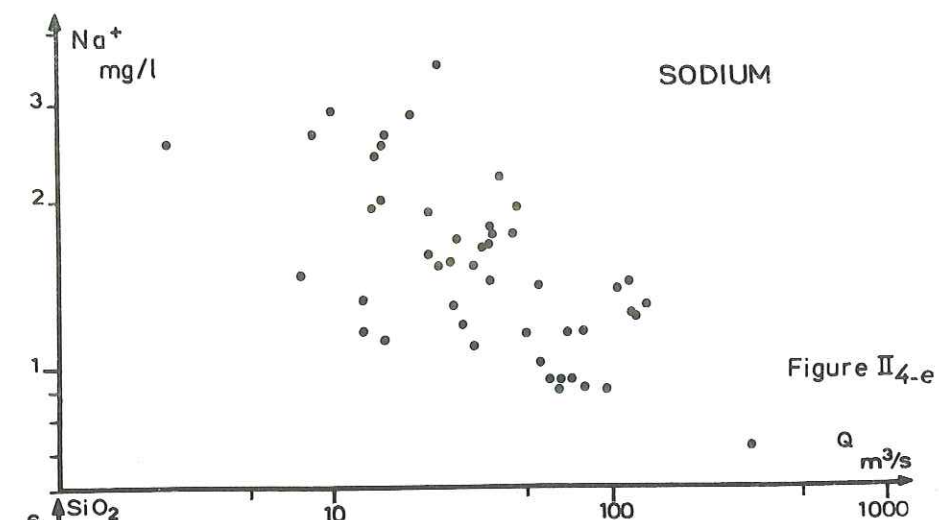
- *chlorures* : (figure II_{4g}). Cet élément est très dispersé, les valeurs observées vont de 0,2 à 4 mg/l. Contrairement au Rhône, nous avons donc là un indice net de pollution.



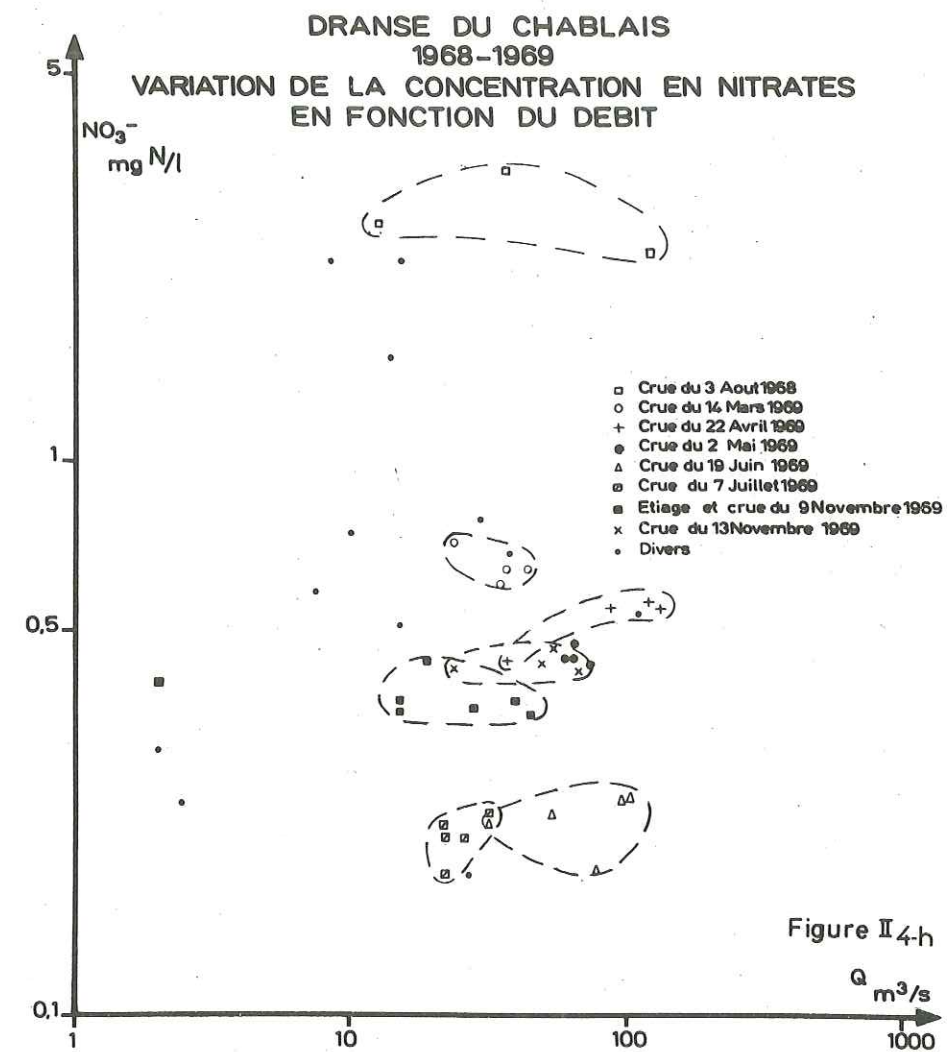
DRANSE DU CHABLAIS
VARIATION DES ELEMENTS DISSOUS
EN FONCTION DU DEBIT 1968-1969



DRANSE DU CHABLAIS
VARIATION DES ELEMENTS DISSOUS
EN FONCTION DU DEBIT 1968-1969



DRANSE DU CHABLAIS
VARIATION DES ELEMENTS DISSOUS
EN FONCTION DU DEBIT 1968-1969



- *nitrate* : (figure II_{4h}). Ils sont très dispersés entre 0,18 mg/l et 3,5 mg/l d'azote équivalent. Une étude plus précise montre un groupement très net des valeurs par crue élémentaire. Ceci peut s'expliquer si on considère que la source principale des nitrates est constituée par des engrais agricoles, la teneur observée sera donc fonction de la période d'épandage et du ruissellement.

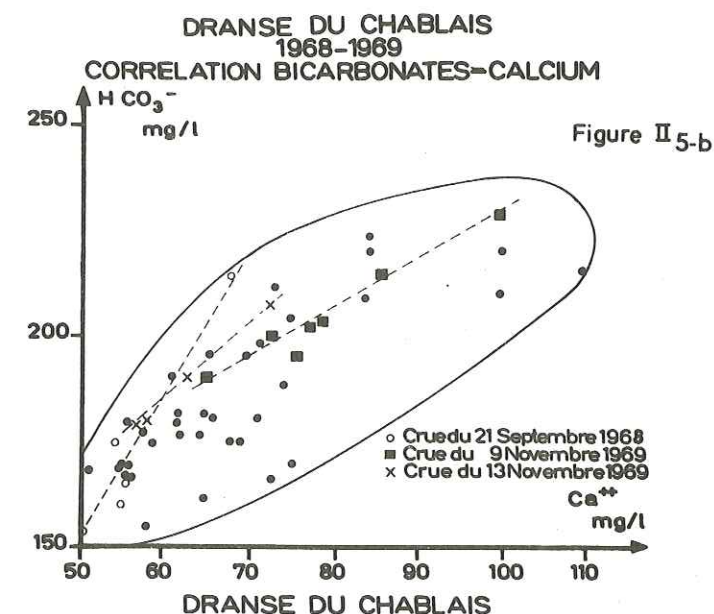
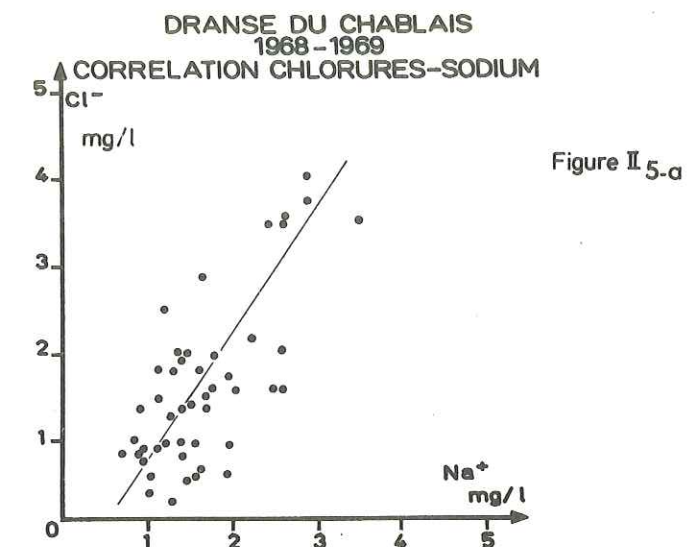
2.4.3. - Corrélation entre les éléments.

Les diagrammes de dispersion réalisés ont montré les mêmes corrélations que pour le Rhône. La corrélation entre le sodium et les chlorures (figure II_{5a}) est satisfaisante si on élimine le prélèvement du 7 Novembre 1969 très pollué. La corrélation entre le Ca et les bicarbonates (figure II_{5b}) est plus complexe : en effet, l'ensemble des valeurs est assez dispersé mais on peut observer une très bonne corrélation à l'échelle de la crue. Ce phénomène est encore plus visible pour la corrélation magnésium-sulfates (figure II_{5c}). Nous avons reporté sur ces deux dernières figures les valeurs des crues du 21 Septembre 1968, du 9 Novembre 1969 et du 13 Novembre 1969. On peut expliquer cette particularité de deux façons :

- chaque crue élémentaire correspond à une certaine proportion d'eau des trois Dranses dont le comportement chimique n'est pas rigoureusement identique. Cette explication serait surtout valable pour la corrélation Mg-SO₄.

- chaque crue intervient dans un contexte climatique et hydrologique déterminé (température, degré de lessivage des sols, etc...), cette explication s'appliquerait surtout à la corrélation Ca-HCO₃.

Nous avons également représenté le diagramme de dispersion entre la silice et les nitrates. Les valeurs de nitrates supérieures à 1 mg/l n'ont pas été prises en considération (figure II_{5d}) : une corrélation positive est nette et on peut remarquer que -mise à part la crue du 21 Septembre 1968- les valeurs se groupent bien suivant la saison. Les valeurs les plus élevées du couple Silice-NO₃⁻ se rapportent



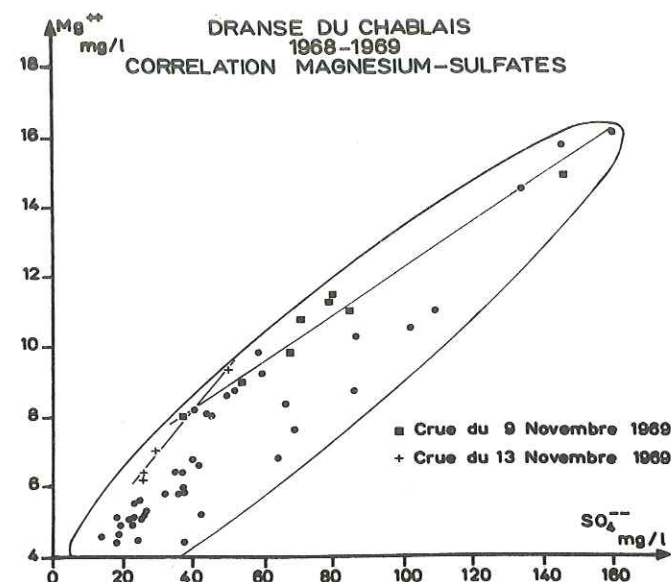


Figure II.5-c

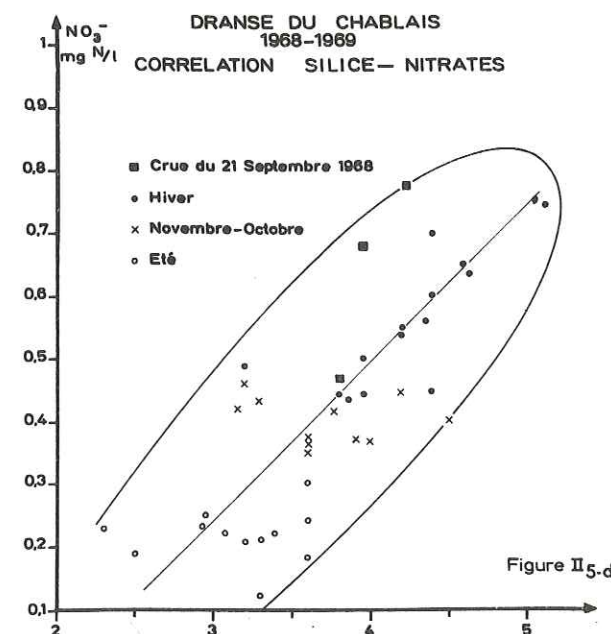


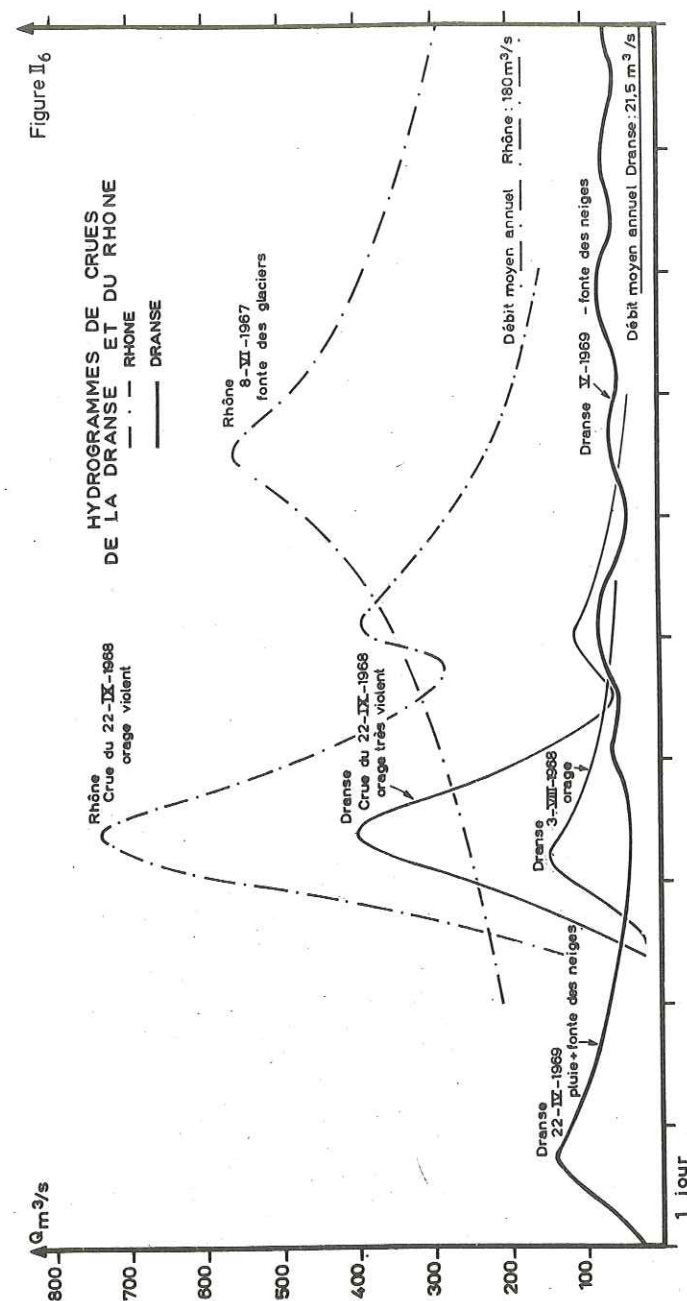
Figure II.5-d

à l'hiver, les plus faibles à l'été. Cette relation n'est pas tellement surprenante si on considère que l'origine principale des deux éléments est sans doute la même : eaux de ruissellement et eaux d'imprégnation.

2.4.4. - *Etude du chimisme de certains épisodes hydrologiques.*

Nous avons pu étudier un certain nombre de crues, ce terme étant ici compris comme une augmentation brusque de débit sans tenir compte de la valeur atteinte par le maximum. Les corrélations entre la concentration des éléments et le débit ne sont pas la plupart du temps meilleures que les corrélations générales. Nous avons déjà vu que certaines données sont caractéristiques de chaque crue : les nitrates et la silice qui varient peu et les proportions Ca-HCO_3 et Mg-SO_4 . Deux épisodes extrêmes ont pu être étudiés.

La crue du 21 Septembre 1968 : le débit a atteint au moins $400 \text{ m}^3/\text{s}$ soit trois fois plus que les crues annuelles, la durée de retour d'une telle crue a été estimée à 10 ans (Hubert et al, 1969). Un prélèvement proche du maximum de crue ($310 \text{ m}^3/\text{s}$) a pu être analysé, les valeurs de sulfates descendent jusqu'à $14,2 \text{ mg/l}$, ce qui est le minimum observé sur plus de deux ans. Notons que le point représentatif de cette crue est systématiquement à l'écart de la variation générale : nous avons là un changement d'échelle physique, les mêmes corrélations concentrations-débits qui sont valables pour des variations de débits normaux ($5 \text{ m}^3/\text{s} - 150 \text{ m}^3/\text{s}$) ne s'appliquent plus aux crues exceptionnelles : le comportement chimique habituel de la rivière a changé. En effet, le coefficient de ruissellement calculé par les méthodes classiques atteint 90 % au maximum de crue, on pourrait s'attendre à des compositions chimiques proportionnelles à 10 % d'eau d'avant la crue et 90 % d'eau de pluie, il n'en est rien et les teneurs observées sont nettement plus fortes. Plusieurs explications sont possibles : une partie des eaux de ruissellement met en charge les eaux d'imprégnation des sols plus chargées en ions dissous,



ou bien il y a mise en solution partielle des matières en suspensions dans les eaux. Il est également possible que les coefficients de ruissellement soient surestimés par les méthodes classiques et que la part des eaux souterraines -plus chargées- dans les crues soit supérieure (Crouzet et al, 1970).

L'étiage exceptionnel d'Octobre 1969 : à la suite d'une sécheresse très prolongée dont le temps de retour sur l'ensemble des Alpes a été estimé à 100 ans (Saintignon, 1969), le débit de la Dranse est descendu à 2 m³/s. Les analyses effectuées se situent toutes en dehors de la variation générale et sont inférieures à celles qu'on attendrait. L'enrichissement chimique des eaux est donc limité, les teneurs suivantes correspondent donc aux teneurs des eaux souterraines -en mg/l- qui constituent alors la totalité des eaux de la Dranse.

SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ^{- -}	NO ₃ ⁻
								(en N)
4	110	16	2,6	1,2	1,6	230	160	3

Notons que les éléments K⁺, Na⁺, NO₃⁻, Cl⁻ et SiO₂ n'ont pas un enrichissement très élevé, comme nous l'avons déjà dit leur origine est plus dans les eaux de lessivages des sols que dans les eaux souterraines.

Enfin une étude particulière de la crue annuelle de fonte des neiges a été réalisée en 1969 (figure II₆). L'hydrogramme est typique et des prélèvements ont été faits lors de la montée des eaux le 25 Avril et pendant les oscillations journalières de fontes des neiges (2 Mai) de 60 m³/s à 75 m³/s. Pendant ces oscillations, les teneurs des éléments principaux (ions Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, HCO₃⁻ et SO₄^{- -})

sont tout à fait "normales" compte tenu des débits. Par contre pour les autres éléments, les valeurs sont très particulières : silice très forte (3,9 mg/l), mais chlorures (0,65 à 0,85 mg/l), nitrates (0,45 mgN/l), sodium (0,95 mg/l) et potassium (0,6 - 0,85 mg/l) atteignent là leurs valeurs les plus basses de toute l'année.

2.4.5. - Origine géographique des éléments de la Dranse du Chablais.

La Dranse du Chablais est formée de la réunion à Bioge de trois rivières assez comparables tant par leur débit spécifique, leur régime que par la nature de leur bassin versant (figure II₃). Nous avons trouvé dans les deux travaux sur la Dranse de Morzine (Sayar, 1966) et d'Abondance (Ardestani, 1965), des résultats d'analyses chimiques que nous avons comparés aux nôtres (tableau II₁ en annexe). Il en ressort que :

- les trois rivières ont une composition générale analogue : eaux bicarbonatées, sulfatées calciques.
- les Dranses d'Abondance et de Morzine sont très semblables, les différences entre les concentrations n'excédant pas 20 % pour des épisodes hydrologiques semblables. La Dranse de Morzine semble néanmoins toujours légèrement moins minéralisée que celle d'Abondance.

- la Dranse de Bellevaux ou Brevon se distingue nettement par sa plus forte minéralisation en calcium et surtout en magnésium et sulfates. Il faut trouver l'origine de ces éléments dans les sources du cours inférieur du Brevon qui traversent les dolomies et gypses triasiques et dont les teneurs peuvent atteindre 1 000 mg/l en SO_4^{--} , 450 mg/l en Ca^{++} et 22 mg/l en Mg^{++} .

2.4.6. - Origine géochimique des éléments dissous de la Dranse.

Nous avons vu que les éléments se groupaient nettement en trois, suivant leur variation, en fonction des débits, des crues, de

la fonte des neiges, etc...

Les ions calcium, magnésium, bicarbonates et sulfates sont amenés principalement par les eaux souterraines chargées ; lors des crues, il y a dilution de celles-ci dans des eaux de ruissellement beaucoup moins minéralisées. Ce phénomène s'observe le mieux pour les sulfates dont la variation en fonction du débit est de 1 à 10.

La silice provient sans doute des eaux superficielles, principalement des eaux d'imprégnation des sols. Sa teneur ne dépend pas du tout du débit mais plutôt de l'époque de l'année et de la crue.

Les nitrates et aussi les chlorures, sodium et potassium, proviennent essentiellement du ruissellement des eaux sur les terrains cultivés. Chaque crue a des teneurs bien particulières dépendant des crues antérieures, des engrais répandus etc... Ainsi pour la crue de fonte des neiges, ces quatre éléments sont en très faibles quantités dans la Dranse. La part des apports artificiels est presque nulle et les teneurs sont alors très proches de celles des pluies, notamment pour les chlorures, ce qui signifie que ces éléments ne proviennent qu'en faibles proportions de la dissolution des roches.

2.5. - Bilan des apports au Léman.

2.5.1. - Mode de calcul des bilans.

Nous avons vu la grande variabilité des compositions chimiques du Rhône et de la Dranse suivant le débit, parfois la saison, le taux de pollution, la nature de l'épisode hydrologique, etc... Les éléments majeurs sont essentiellement liés au débit, il en résulte que la somme des éléments dissous le sera également. Nous avons porté sur les figures II₇ et II₈ la variation en fonction du débit instantané de la somme des éléments dissous : SiO_2 , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--} , NO_3^- . (Tous les éléments dissous ne sont évidemment pas dosés,

il manque notamment les formes du Fer, le Sr (1 mg/l), les nitrites, mais ils n'interviennent que pour quelques mg/l au total). La corrélation est bonne, compte tenu pour la Dranse des inflexions déjà citées pour les débits extrêmes. Ces relations du type $C_d = A Q_1^B$ existent en fait pour toutes les rivières mais peu de données sont encore publiées. Nous donnons sur la figure II₁₀ une comparaison de six rivières de régimes hydrologiques différents, pour les débits allant de 50 l/s à 10 000 m³/s. L'établissement des bilans est donc très délicat. Il est évident que pour y parvenir le plus grand nombre d'analyses doit être réalisé. Les méthodes classiques de calcul sont les suivantes :

$$1) M = Q.T. \sum_{i=1}^{i=n} \frac{C_i}{n}$$

avec : M : masse de l'élément apportée pendant le temps T

Q : débit moyen pendant T

C_i : concentration du prélèvement i

n : nombre de prélèvements pendant T

Cette façon de procéder est déjà fausse car elle ne pondère même pas les concentrations par les débits.

$$2) M = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{C_i V_i}{n}$$

avec : V_i : volume moyen journalier du ième prélèvement

Cette méthode marque un progrès puisque les concentrations sont pondérées par les débits, néanmoins :

- la concentration peut varier pendant la journée.

- la méthode ne fait intervenir que le débit du jour du prélèvement, des épisodes hydrologiques (crues ou étiages) peuvent être laissés pour compte si le nombre des prélèvements n'est pas assez élevé compte tenu du régime de la rivière.

Il faut donc : - faire intervenir la variation des concentrations en fonction du débit.

- tenir compte des courbes de débits moyens classés suivant un intervalle de temps déterminé pour chaque rivière pendant lequel on peut considérer que le débit ne varie pas trop fortement. Cet intervalle sera donc fonction du régime hydrologique.

Nous avons donc cherché à satisfaire ces deux conditions :

- les variations des concentrations en fonction du débit ont été déterminées. Pour la plupart des éléments nous pourrions donc attribuer une concentration donnée à un débit quelconque. Pour les éléments comme les chlorures et les nitrates seul un très grand nombre de prélèvements pourra donner des valeurs moyennes significatives, on calculera alors le bilan par la deuxième méthode.
- nous avons pris les débits moyens journaliers pour le Rhône et la Dranse. Cet intervalle de temps s'est avéré être tout juste suffisant pour la Dranse : il aurait sans doute fallu prendre les débits moyens sur 12 h. Nous avons déterminé pour chaque rivière des classes de débits en progression logarithmique, découpant ainsi sur l'axe des abscisses des courbes concentration - débit des intervalles égaux :

Dranse : $Q < 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$; $2,5 \text{ à } 7 \text{ m}^3/\text{s}$; $7 \text{ à } 15 \text{ m}^3/\text{s}$; $15 \text{ à } 35 \text{ m}^3/\text{s}$;
 $35 \text{ à } 70 \text{ m}^3/\text{s}$; $70 \text{ à } 120 \text{ m}^3/\text{s}$; $> 120 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rhône : $Q < 60 \text{ m}^3/\text{s}$; $60 - 100 \text{ m}^3/\text{s}$; $100 - 160 \text{ m}^3/\text{s}$; $160 - 270 \text{ m}^3/\text{s}$;
 $270 \text{ à } 450 \text{ m}^3/\text{s}$;
 $Q > 450 \text{ m}^3/\text{s}$

Pour chaque année nous avons déterminé la répartition des débits dans ces classes.

Deux méthodes de calcul sont alors possible.

3) Méthode des concentrations moyennes pondérées.

On détermine une concentration moyenne C_m pondérée par les débits.

$$C_m = \sum_i \alpha_j C_j$$

avec : C_j concentration moyenne correspondant à l'intervalle de débit j

α_j proportion de l'intervalle de débit j

$$\text{puis } M = C_m \cdot Q \cdot T$$

Bien que faisant intervenir la variation des teneurs en fonction du débit, cette méthode est du même type que la première méthode. En effet, le débit le plus fréquent n'est pas nécessairement le débit moyen annuel.

4) Méthode des bilans partiels.

On effectue un bilan partiel pour chaque tranche de débits.

$$M_j = Q_j \cdot T_j \cdot C_j$$

avec : C_j concentration moyenne de l'intervalle de débit j

Q_j débit moyen de l'intervalle j

T_j durée totale des périodes de débits comprises dans l'intervalle j

$$\text{puis } M = \sum_j M_j$$

Cette méthode nous semble la plus appropriée car elle tient compte à la fois de la répartition des débits et de la répartition des concentrations. La précision du bilan ainsi effectué dépend de l'intensité de la corrélation entre les concentrations et les débits, et du nombre d'intervalles de débits choisis. Cette méthode permet en outre de bonnes estimations des apports en se basant uniquement sur les débits pour autant que les corrélations n'évoluent pas d'année en année.

2.5.2. - Bilan des apports du Rhône.

Nous avons effectué les bilans pour 1968 et 1969. Ces deux années ont été des années sèches : $166 \text{ m}^3/\text{s}$ et $157 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que le module interannuel est de $180 \text{ m}^3/\text{s}$ (1935-1968). La répartition des débits est la suivante :

Débits m^3/s	<60	60-100	100-160	160-270	270-450	>450
1968						
nombre de jours	0	44	162	122	35	1
%	0	12	44	34	10	0
1969						
nombre de jours	7	82	146	86	43	1
%	2	23	40	23	12	0

TABLEAU II₃ : Bilan des apports en solution du Rhône

a) Méthode des concentrations moyennes pondérées.

- concentrations moyennes annuelles $C_m = \sum_j \alpha_j C_j$, en mg/l.

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Total
1968	3,19	44,3	5,37	3,26	1,33	3,33	56,6	90,6	12,2	210
1969	3,35	46,2	5,83	3,65	1,39	3,81	62,0	93,2	12,2	222

- apport annuel par élément M = C_m.Q.T, en milliers de tonnes.

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Total
1968	16,7	232	28,1	17	17,0	17,5	296	475	11,3	100
1969	16,5	228	28,8	18	16,9	18,8	307	462	11,3	100

b) Méthode des bilans partiels.

- bilan de l'année 1968 en milliers de tonnes.

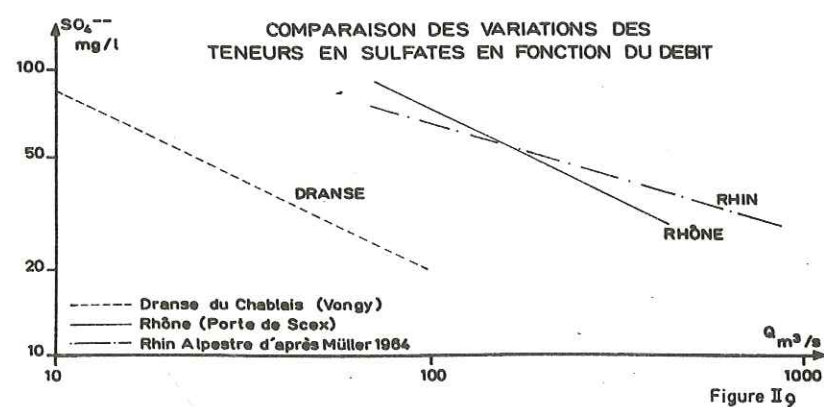
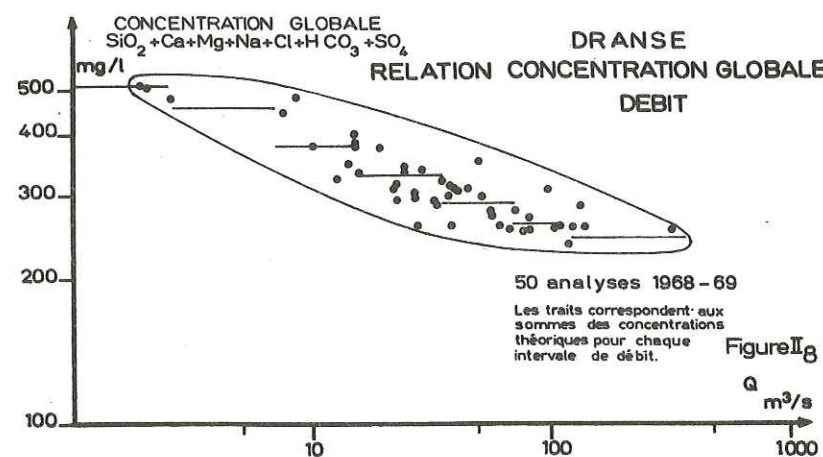
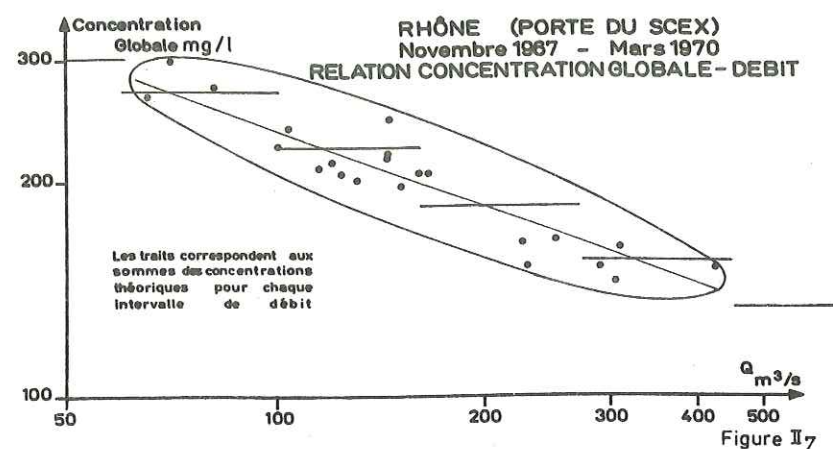
Classe de débit	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Total
< 60 m ³ /s										
60 - 100	1,22	16,70	2,40	1,67	0,48	1,83	25,9	31,6	1,3	83
100 - 160	6,15	84,0	8,05	6,60	2,50	6,80	116,0	170,0	5,0	405
160 - 270	6,77	92,5	10,2	5,65	2,83	5,85	102,0	194,0	3,8	424
270 - 450	2,61	38,1	3,6	1,85	1,20	1,63	38,1	84,0	1,1	172
> 450	0,09	1,3	0,1	0,06	0,04	0,04	1,1	3,1	0,1	6
Total	16,8	232	24,4	15,8	17,0	16,1	283	483	11,3	1090

Ces résultats appellent plusieurs remarques :

- pour une même année, les deux méthodes donnent des résultats tout à fait comparables compte tenu des nombreuses incertitudes commises.

- les bilans de 1968 et 1969 sont très proches, ce qui est normal compte tenu des débits presque identiques et du mode de calcul.

- tous les éléments ont été déterminés d'après leur variation en fonction du débit sauf les nitrates pour lesquels nous avons pris une moyenne arithmétique annuelle. Les valeurs pour cet élément, mineur par rapport à la concentration globale mais important pour la pollution du lac, nous donnent juste un ordre de grandeur. Nous pensons qu'un bilan significatif devrait être basé sur des analyses journalières.



- la charge totale en éléments dissous est très légèrement inférieure à la réalité, en effet un certain nombre d'éléments mineurs et d'oligoéléments n'ont pas été dosés.

- nous avons porté sur la figure II₇ les concentrations globales théoriques calculées en additionnant pour chaque intervalle de débit les teneurs choisies pour chaque élément, on voit que la correspondance est très satisfaisante.

Dussart (1961) donne par une méthode critiquable un apport moyen annuel du même ordre : $1,235 \cdot 10^6$ tonnes en éléments dissous. Forel (Le Léman, tome I, p. 376) donnait une valeur approximative de $0,95 \cdot 10^6$ tonnes, mais il semble que les débits choisis étaient légèrement faibles.

2.5.3. - Bilan des apports de la Dranse.

Nous ne disposons sur cette rivière que des débits classés pour 1968 (année moyenne de débit 23,7 m³/s).

!Nombre de jours!	0	21	100	179	49	15	1
!	!	!	!	!	!	!	!
!%	0	6	27	49	13	4	1
!	!	!	!	!	!	!	!
!Débit m ³ /s	< 2,5	2,5 - 7	7 - 15	15 - 35	35 - 70	70 - 120	> 120
!	!	!	!	!	!	!	!

TABLEAU II₄ : Bilan des apports en solution de la Dranse pour 1968a) Méthode des concentrations moyennes pondérées.Concentrations moyennes annuelles $C_m = \sum_j \alpha_j C_j$, en mg/l.Apport annuel par élément $M = C_m Q \cdot T$, en milliers de tonnes.

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Total
C _m	3,5	171	8,4	1,6	1,2	1	58,0	192	12,0	339
M	2,62	53,3	6,3	1,2	0,9	0,75	43,5	144	11,65	254

b) Méthode des bilans partiels en milliers de tonnes.

Classe de débit	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Total
< 2,5 m ³ /s										
2,5 - 7	0,031	0,855	0,117	0,022	0,011	0,009	1,17	1,89	0,018	4,13
7 - 15	0,332	7,60	0,950	0,190	0,114	0,095	7,60	19,0	0,190	36,1
15 - 35	1,35	27,0	3,09	0,617	0,462	0,386	19,3	73,3	0,772	128,1
35 - 70	0,738	13,7	1,265	0,253	0,253	0,211	6,33	37,9	0,422	61,2
70 - 120	0,427	6,71	0,610	0,122	0,146	0,122	2,44	21,35	0,242	32,2
> 120	0,042	0,60	0,054	0,010	0,014	0,012	0,180	2,04	0,02	2,97
Total	2,9	56,5	6,08	1,21	1,0	0,83	37,0	155,6	1,67	265

Comme pour le Rhône les chlorures et les nitrates sont donnés à titre indicatif, la précision étant faible. Nous avons porté sur la figure II₈ les concentrations globales théoriques comparées à l'enveloppe des concentrations mesurées. Comme pour le Rhône la correspondance est très satisfaisante.

2.6. - Erosion des bassins versants par dissolution.2.6.1. - Erosions spécifiques pour chaque élément.

Nous donnons dans le tableau suivant les analyses types du Rhône et de la Dranse, obtenues en divisant les apports annuels calculés précédemment par le débit moyen annuel ; nous avons alors pu calculer les taux d'érosion spécifique. Nous avons joint au tableau les données calculées pour le Rhin d'après les chiffres de Müller (1964). Remarquons que, si on considère la courbe de fréquence des concentrations sur un an, cette concentration moyenne définie plus haut est une moyenne pondérée par les débits qui diffère du mode (concentration la plus fréquente) de la médiane (concentration correspondant à 50 % dans la courbe des fréquences cumulées) et de la moyenne arithmétique.

TABLEAU II₅ : Erosions spécifiques chimiques du Rhône, de la Dranse et du Rhin Alpestre

	Rhône Alpestre		Dranse du Chablais		Rhin Alpestre	
	5 230 km ²		535 km ²		6 100 km ²	
Eléments	concentration	érosion	concentration	érosion	concentration	érosion
	en mg/l	en t/km ² /an	en mg/l	en t/km ² /an	en mg/l	en t/km ² /an
SiO ₂ ⁺	3,3	3,2	3,5	5,0		
Ca ⁺⁺	46	44	71	100	45,3	43,5
Mg ⁺⁺	5,8	5,4	8,4	11,8	11,0	10,6
Na ⁺	3,6	3,3	1,6	2,3	2,0	1,9
K ⁺	1,4	1,35	1,2	1,6		
Cl ⁻	3,7	3,4	(1,0)	(1,3)	1,4	1,35
SO ₄ ⁼	62	58	58	81	61,3	59
HCO ₃ ⁻	93	90	192	268	118,1	114
NO ₃ ⁻	(2,6)	(2,5)	(2,0)	(2,8)		
Total	221	211	339	470	(245)	(235)

L'érosion spécifique globale a été extrapolée pour le Rhin. Plusieurs remarques s'imposent :

- il y a une grande similitude entre le Rhône et le Rhin tant par la composition chimique très voisine que par les valeurs des érosions spécifiques. Ces deux rivières ont en effet des caractéristiques hydrologiques très semblables, de plus la nature lithologique de leur bassin versant est analogue. Les travaux de Müller (1964) montrent une variation identique de la plupart des éléments en fonction du débit. Müller donne en général les valeurs moyennes mensuelles mais pour les sulfates nous disposons des concentrations et des débits instantanés pour chaque prélèvement, nous avons comparé cette courbe à celle de la Dranse et du Rhône sur la figure II₉. Une fois encore le Rhin et le Rhône ont un comportement analogue.

Les valeurs des érosions pour la Dranse sont nettement plus fortes : en effet le débit spécifique est supérieur à celui du Rhône (43,4 l/s/km² contre 34,6 l/s/km²).

- ces valeurs d'érosions sont à comparer à celles calculées pour la Loire d'après les données de Berthois (1969) pour un bassin versant de 110 000 km², et un débit spécifique de 7,9 l/s/km².

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Total des éléments dissous
Erosion t/km ² /an	3,36	6,14	2,71	2,36	0,70	42
Concentration mg/l	13,5	24,6	10,9	9,5	2,8	169

On voit que sur l'ensemble d'un grand bassin l'érosion spécifique diminue considérablement. Pour certains auteurs le débit spécifique jouerait un rôle important. Nous verrons au quatrième chapitre (figure IV₆) que cette corrélation n'est pas encore bien établie :

il faudrait disposer d'un grand nombre de résultats sur des bassins versants de tailles, d'altitudes, et de climats différents.

2.6.2. - Cas de la silice.

- Une fois de plus il est à remarquer le comportement tout à fait à part de la silice dont l'érosion spécifique ne semble pas varier avec la taille des bassins étudiés. Pour Corbel (1957) la mise en solution de la silice est essentiellement liée au climat. Il donne, dans l'unité peu pratique de mm d'érosion de silicates pour 1 000 ans (!), les valeurs suivantes :

Climats arctiques a été chaud	0,8 mm/1 000 ans
Climats continentaux type Oregon	5 mm/1 000 ans
Climats tempérés océaniques	0,9 mm/1 000 ans
Climats tropicaux à période sèche	0,1 à 4 mm/1 000 ans
Climats équatoriaux (Amazonie)	4 à 9 mm/1 000 ans

En se basant sur une densité moyenne des silicates de 2,6 g/cm³ nous trouvons les valeurs suivantes :

Dranse du Chablais	1,8 mm/1 000 ans
Rhône Alpestre	1,25 mm/1 000 ans
Loire	1,25 mm/1 000 ans

Pour Davis (1964) par contre le taux d'érosion de la silice est directement lié à la lame d'eau écoulée sur le bassin versant. Il donne pour des bassins divers répartis sur tout les Etats-Unis, la relation entre la lame d'eau en cm/an et l'érosion de la silice en mg/cm²/an. Nos résultats s'expriment alors de la façon suivante :

	Lame d'eau	Erosion spécifique
Rhône	110 cm/an	0,33 mg/cm ² /an
Dranse	132 cm/an	0,35 mg/cm ² /an
Loire	25 cm/an	0,33 mg/cm ² /an

Il semble bien que l'hypothèse de Corbel soit la plus valable si on considère ces trois rivières, d'autant plus que nous avons vu que la silice provient surtout du lessivage des sols et non pas des eaux souterraines. De nombreuses analyses sur d'autres rivières différentes seraient nécessaires pour pouvoir vraiment trancher.

2.6.3. - *Conclusions.*

Nous avons vu que, pour une même rivière, les concentrations en éléments dissous étaient très variables. Les causes en sont multiples mais le phénomène essentiel reste la variation des concentrations en fonction du débit. Nous avons reporté cette variation sur la figure II₁₀ : pour des rivières très différentes le phénomène est partout le même. C'est seulement après avoir étudié le phénomène principal qu'on peut aborder les facteurs secondaires (saisons, épisodes hydrologiques etc...). Le comportement des différents éléments en solution donne alors des renseignements précieux sur leur origine probable (eaux souterraines, eaux superficielles, pollutions, précipitations atmosphériques). Enfin, à moins de disposer de mesures continues des concentrations, il est indispensable de déterminer d'abord les causes de leurs variations afin de trouver les modes de calcul des bilans les plus appropriés.

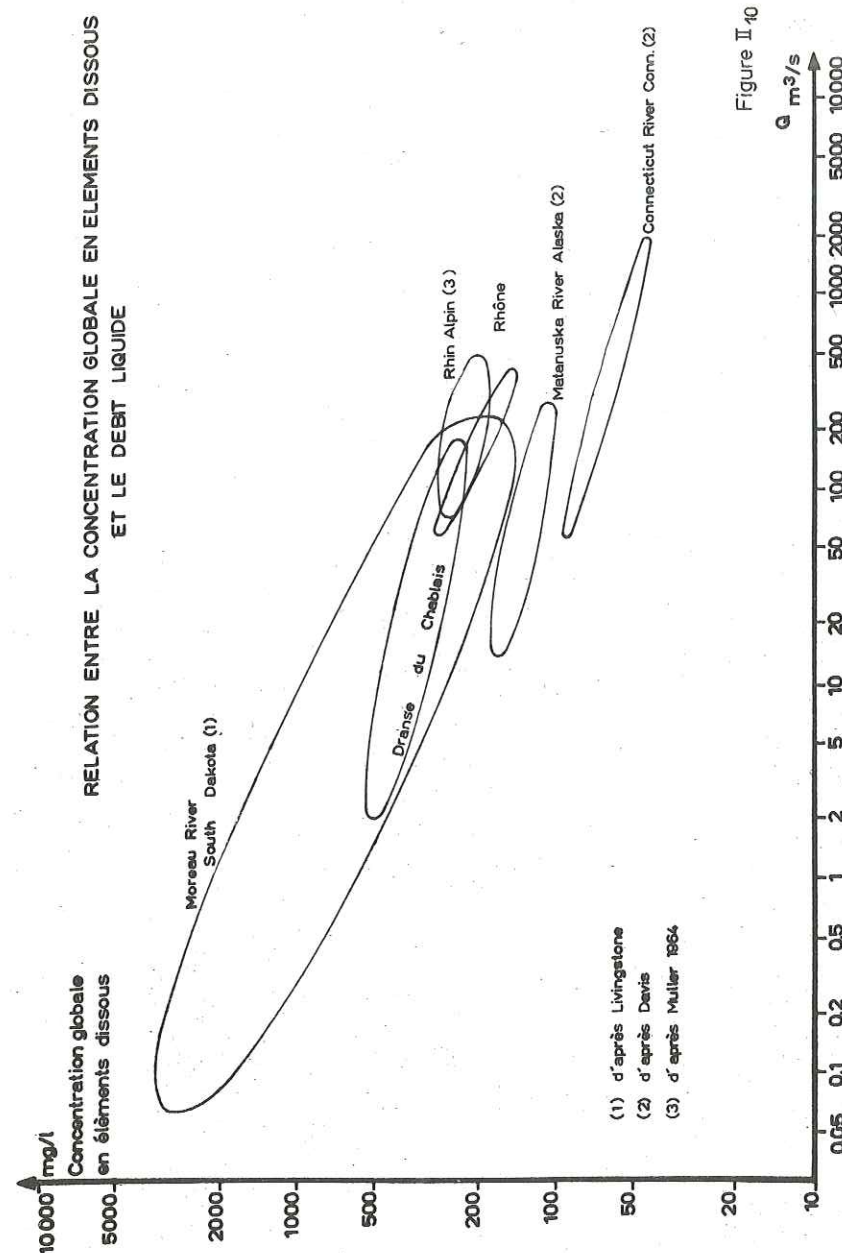


Figure II₁₀

Auteur	Rivière et lieu	Date	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	ISO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻ en H	Remarques
Ardestani	Abondance	22.1.64		48	6,5	2,7	0,04	3,5	11	175	Crue ?
	?	18.3.65		60	12	0,9	1,6	3,3	32	210	?
	?	18.3.65		72	9	0,7	1,2	2,5	47	210	?
	Moyenne			60	9	1,5	1	3	32	200	
Sayar	Morzine à Couvaloup	27.11.64		54,5	6,3	1,35	1,2	2,0	20,3	174	Etiage
		11.3.65		62,4	9,8	1,4	1,5	2,13	34,0	161	Crue
		1.6.65		47,4	5,8	0,5	0,75	1,3	14,4	154	?
		11.8.65		57,2	5,6	0,8	1,0	2,8	21,4	176	?
		8.11.65		62,0	6,0	1,05	1,1	1,2	31,6	182	Etiage
	Moyenne			56,0	6,7	1,0	1,1	1,6	24	170	
CRC Stage	Brevon Bioge	Jun 67	1,4	65	8,2	1,1	1,4	1	83	155	
Préfect travail	Brevon Bioge	19.6.69	2,73	62,2	3,9	0,85	0,95	?	20,6	183	Décrue
	Abondance Bioge	18 h	2,75	56,1	4,8	0,95	0,75	0,40	10,8	181	"
	Morzine Bioge	"	2,73	52,7	4,1	0,85	0,65	?	9,7	168	"
	Dranse Douceur	"	2,75	56,3	4,6	0,90	0,60	?	19,1	169	" 80 m ³ /s
Préfect travail	Brevon Bioge	4.11.69	4,3	160	18,8	3,5	2,0	2,0	275	239	Etiage
	Abondance Bioge	"	2,6	72	12,6	2,0	1,35	1,4	54	223	Exceptionnel
	Morzine Bioge	"	3,3	66	11,6	2,0	0,90	1,06	58	191	2 m ³ /s
	Dranse Douceur	"	3,6	110	16,2	2,65	1,2	1,5	160	221	

TABLEAU II₁
COMPARAISON DES ANALYSES CHIMIQUES DES TROIS DRANSES (mg/l)

REMARQUES : "Abondance" = Dranse d'Abondance
"Morzine" = Dranse de Morzine
"Brevon" = Dranse de Bellevaux
"Dranse" = Dranse du Chablais au pont de la Douceur, 10 km après le confluent

Date	21.11	19.6	17.7	6.8	7.8	16.10	7.12	31.1	30.3	13.5	2.6	16.6	5.7
heure	18 h	18 h	19 h 30	20 h	7 h	18 h	18 h	11 h	11 h 30	18 h 30	15 h	12 h	15 h
SiO ₂	3,42	2,84	2,40	2,50	2,06	3,40	4,52	4,36	4,32	3,56	3,49	2,91	2,50
Ca ⁺⁺	41,8	35,0	33,5	34,8	35,3	47,9	50,3	47,6	56,3	43,9	43,8	33,8	32,0
Mg ⁺⁺	7,5	4,3	4,0	3,5	2,4	4,8	6,6	5,6	6,9	4,3	5,1	4,0	3,9
Na ⁺	3,3	1,9	1,6	1,45	1,45	2,2	3,3	5,1	4,9	2,5	2,5	2,0	2,2
K ⁺	1,25	1,2	1,2	0,95	1,0	1,6	1,45	1,40	1,70	1,30	1,30	1,05	1,1
Cl ⁻	4,6	1,85	1,92	2,3	2,3	2,5	4,3	6,6	6,2	2,1	1,95	1,2	1,4
SO ₄ ⁻	56,6	42,5	38,4	45,4	44,1	54,7	75,6	67,8	88,8	48,6	53,6	34,9	33,6
HCO ₃ ⁻	96	76,4	69,0	75,6	74,2	91,0	93,0	90,3	103,9	102,5	91,7	74,7	70,8
NO ₃ ⁻	1,06	0,24	0,55	2,12	2,02		0,47	0,34	0,49	0,44	0,27	0,20	0,17
Q m ³ /s	120	224	224	250	310	125	105	100	83	265	230	290	305
Conc. totale	215	166	153	168	165	209	240	229	273	209	204	155	148

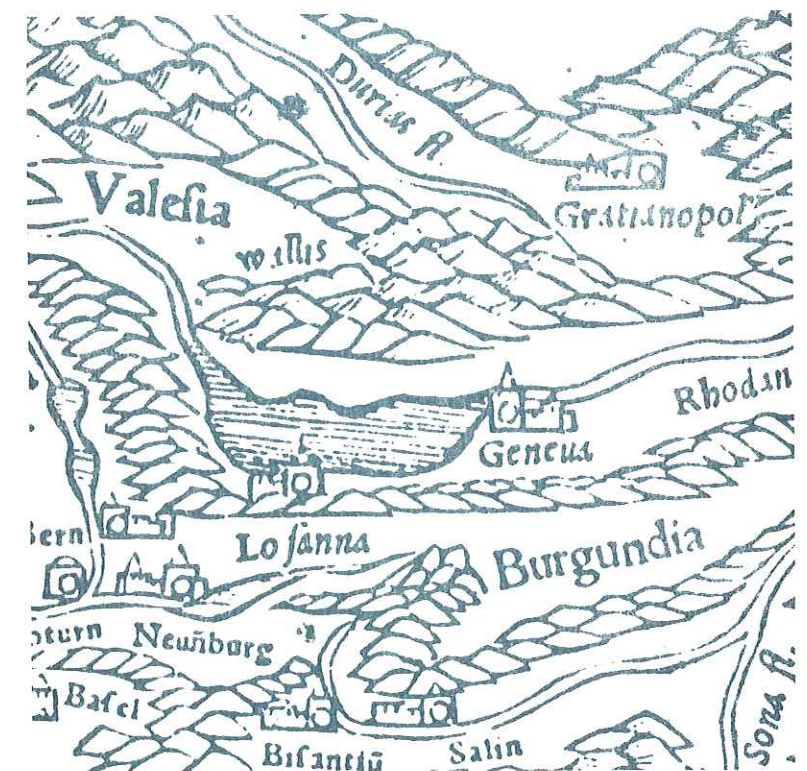
Date	30.7	1.9	24.9	6.10	13.10	13.11	17.12	15.2	22.3	24.3	30.3	24.4
heure	15 h	15 h	17 h 30	15 h	13 h	19 h	17 h	10 h 30	10 h 30	16 h 30	16 h 15	19 h
SiO ₂	2,43	3,44	3,20	3,10	3,70	3,16	3,10	3,64	0,85	2,87	4,29	2,89
Ca ⁺⁺	34,1	48,1	41,8	47,9	51,0	42,4	42,0	58,0	60,0	55,0	87,0	45,5
Mg ⁺⁺	2,6	5,7	4,7	4,8	8,0	5,7	6,4	8,9	9,1	7,5	12,7	6,5
Na ⁺	1,9	2,5	4,15	3,1	3,85	3,80	4,80	6,65	6,0	6,0	6,0	3,75
K ⁺	1,65	1,20	1,10	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,6	1,6	2,1	1,30
Cl ⁻	1,35	2,20	5,1	2,7	3,1	4,7	6,3	7,7	7,08	7,30	4,93	4,44
SO ₄ ⁻	27,0	60,6	57,8	72,0	86,0	53,4	60,5	65,1	86,4	72,6	130,2	61,4
HCO ₃ ⁻	84,7	99,0	80,0	85,9	93,0	92,8	86,4	112,2	(110,0)	(95,0)	158,6	
NO ₃ ⁻	0,14	0,25	0,19	0,29	0,34	0,44	0,28	0,48	0,46	0,43	0,78	
Q m ³ /s	1425	1145	1150	1145	1145	1160	1115	65	75	95	68,5	
Conc. totale	156	223	198	221	251	208	211	264	(280)	(250)	406	

TABLEAU II₂

ANALYSES CHIMIQUES COMPLETES EN MG/L DU RHONE A L'ENTREE DANS LE LEMAN
(Porte de Scex)

Remarques : - () Valeurs extrapolées
- NO₃⁻ en mg N/l

CHAPITRE III



COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LEMAN
ET
BILAN DES ELEMENTS DISSOUS

TROISIEME CHAPITRE
=====

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LEMAN ET BILAN DES ELEMENTS DISSOUS

A - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LAC.

3.1. - Histoire de l'étude chimique des eaux du Léman et position du problème.

Le Léman a attiré depuis très longtemps l'attention des analystes : Forel cite une analyse de Tingry effectuée en 1808 et exprimée en mesures royales. Jusqu'à Forel et Delebecque aucune étude globale des phénomènes chimiques dans le Léman n'est réalisée. A quelques années d'intervalle les deux chercheurs formulent des hypothèses contradictoires. Pour Delebecque (les lacs français, p. 211) la composition de l'eau est variable suivant la profondeur et ces variations s'observent essentiellement sur la silice et les carbonates, de plus l'action des affluents ne se fait sentir qu'à une faible distance de l'embouchure. Pour cet auteur l'origine des variations est essentiellement chimique sur les carbonates et biologique sur la silice. Cette étude déjà très poussée est encore complétée par des considérations sur l'émissaire : l'eau de l'émissaire a une composition voisine de celle des eaux de surface et non pas une composition moyenne des eaux du lac.

Pour Forel (Le Léman, tome II, p. 575) par contre, la composition des eaux doit être invariable : les seules causes pouvant entraîner une modification des eaux sont les affluents. Le savant vaudois se base sur la constatation suivante : pour qu'il y ait une variation d'1 mg/l dans la totalité du lac il faut un apport de 89 000 t, or il n'y a pas d'agent interne ou externe qui puisse faire varier ces

proportions d'un jour à l'autre ou d'une année à l'autre. Forel ne croit pas à la précipitation chimique ("variation très faible") quant à l'influence des organismes biologiques elle n'a pas d'"action sensible sur les eaux du lac". Quoiqu'il en soit "les actions très faibles d'altération que subissent les eaux du lac pendant leur séjour dans le Léman se font sentir uniquement dans les eaux de surface". Cependant à la fin de son ouvrage Forel reverra sensiblement sa position, les travaux de Delebecque étant parus entretemps. Enfin, pour ces deux auteurs les eaux sont entièrement homogènes en hiver.

D'autres auteurs ont donné depuis des analyses chimiques du lac, citons : Zender (1908), Dienert (1913) et Hubault (1947). En 1925 Balavoine à la suite d'une très intéressante étude poursuivie sur trois ans, montra pour la première fois la variation saisonnière de la composition globale du Petit Lac, notamment des carbonates et des sulfates. Mais il faudra attendre 1954 pour que l'étude approfondie et détaillée de la chimie du lac soit réalisée par Monod (1956). Cet auteur a étudié un grand nombre de paramètres physico-chimiques et d'éléments dissous à l'embouchure du Flon à Lausanne. Pour la première fois les phénomènes entrevus par Delebecque sont analysés, chiffres à l'appui, citons notamment : la précipitation des carbonates, le cycle de l'oxygène, la variation des phosphates et des composés azotés. Néanmoins l'étude de Monod reste très locale : il s'agit d'une zone de 1 km de diamètre à l'embouchure d'une petite rivière, avec des profondeurs maximales de 32 m. Il restait donc de nombreuses incertitudes et les variations géographiques, saisonnières ou suivant la profondeur, de la composition chimique dans l'ensemble du lac étaient encore mal connues. Notons que pour Monod (1960) également "en hiver les eaux se mélangent complètement de la surface jusqu'au fond, c'est la période de circulation".

En 1957 fut créée la "Commission Internationale pour la protection des eaux du Léman et du Rhône contre la pollution". Cette organisme, dont le Centre de Recherches Géodynamiques fait partie depuis 10 ans, comprend des laboratoires suisses et français. Des prélèvements

et des analyses réguliers sont effectués sur toute l'étendue du Léman et sur les affluents dans les domaines suivants : physico-chimie et chimie des eaux, microbiologie, bactériologie, biologie. Depuis près de quinze ans une somme énorme de résultats a été amassée, dont une partie seulement a été dépouillée, nous verrons plus loin tout l'intérêt d'une telle étude. Au point de vue du chimisme général du Léman les résultats de la Commission n'ont pas été exploités, de plus plusieurs éléments principaux n'ont pas été dosés dans tout le lac (silice, sulfates). Avant d'étudier le bilan géochimique du bassin du Léman, il était donc essentiel d'essayer d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Y a-t-il des variations importantes des éléments entre la surface et le fond du lac ?
- Y a-t-il des variations géographiques entre les différentes régions du lac et quelle est l'influence chimique des affluents ?
- Y a-t-il des variations saisonnières générales pour l'ensemble du lac et quels sont les éléments affectés ?
- Comment la composition de l'eau de sortie du lac se situe t-elle par rapport à l'ensemble du Léman ?
- Est-il possible de trouver un élément dissout qui puisse servir de repère ou de traceur pour l'étude du mouvement des eaux ?
- Y a-t-il véritablement une période de circulation avec une homogénéisation globale des eaux ?

Enfin rares sont les lacs dont l'étude a commencé avant 1900 et ce n'est pas l'un des moindres mérites des travaux de Forel et de Delebecque de nous donner avec précision l'état du Léman vers 1880. Nous essayerons de voir quels sont les changements apportés à la composition chimique des eaux par l'industrialisation et le peuplement massifs de son bassin versant depuis cette époque : y a-t-il une véritable pollution chimique comme dans certains lacs du St Laurent ou bien une eutrophisation surtout biologique ?

3.2. - Prélèvements et analyses.

3.2.1. - Points de prélèvements du C.R.G.

Les points réguliers sont portés sur la figure III₁. Il s'agit des anciens points de prélèvement de la Commission de Protection du Léman (C.R.G. 3, 4, 6 et 9) auxquels nous avons ajouté en 1968 trois nouveaux points destinés à étudier l'influence sur le lac des deux principales rivières, le Rhône et la Dranse. En plus de ces stations régulières un certain nombre d'autres prélèvements ont été réalisés soit dans la zone de la Dranse, soit dans celle du Rhône, ou au point C.R.G. 10 au centre du lac. Les coordonnées exactes des points sont données dans le tableau III₁.

TABEAU III₁ : Coordonnées des stations de prélèvements hydrologiques

Point	Profondeur en m	Coordonnées d'après la carte suisse au 1/50 000		Remarques
CRG 3	170	520,50	141,45	- transversale Thonon
CRG 4	90	517,61	143,78	- " Rolle
CRG 6	60	509,80	136,15	- transversale Nyon-Messery (entrée du Petit Lac)
CRG 9	200	535,13	149,07	- transversale Thonon-Ouchy (face à Ouchy)
CRG 21	200	529,87	140,75	- face au delta de la Dranse
CRG 22	195	552,50	142,50	- transversale Vevey-St-Gingolph (levée Nord)
CRG 23	195	551,70	139,97	- transversale Vevey-St-Gingolph (canyon du Rhône)
CRG 10	309	534,87	146,69	- transversale Thonon Ouchy (plaine centrale)

STATIONS HYDROLOGIQUES SUR LE LEMAN

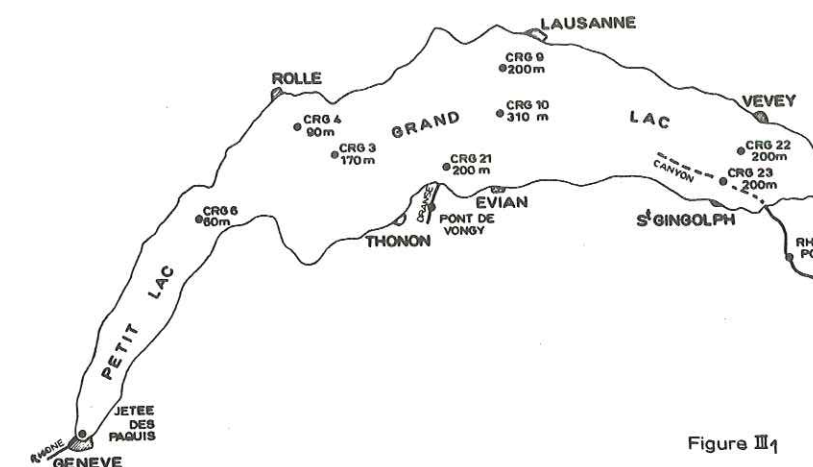


Figure III₁

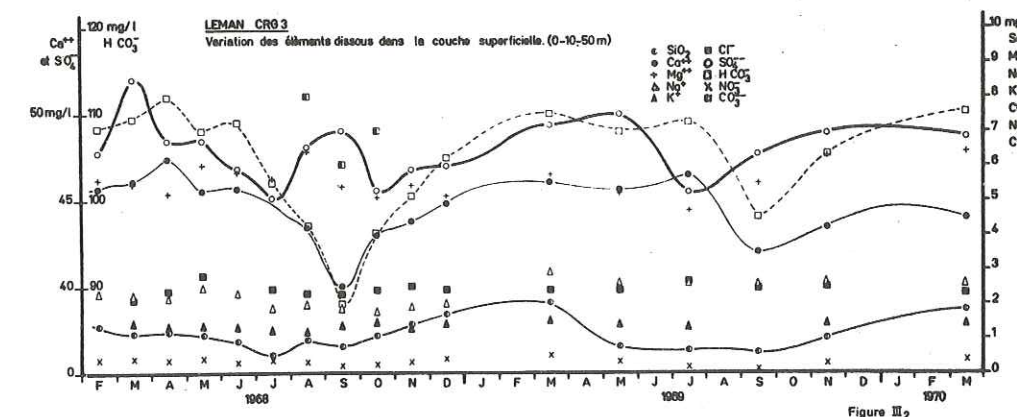


Figure III₂

Remarquons que le point CRG 23 est situé dans le canyon actuel du Rhône et que le point CRG 22 se trouve sur la levée Nord de ce canyon à la même profondeur. Enfin il est à regretter que notre programme de prélèvement déjà chargé ne nous ait pas permis de suivre régulièrement l'évolution du point CRG 10, seules des études particulières ont pu être réalisées, notamment pour la silice.

3.2.2. - Fréquence des prélèvements.

L'étude proprement dite a commencé en Février 1968, pour cette année là les prélèvements ont généralement eu lieu vers le milieu de chaque mois. Pour l'année 1969 la fréquence a été mensuelle seulement pendant l'été (mars, mai, juillet, août, septembre, novembre). En 1970 les campagnes ont été trimestrielles, nous verrons plus loin que les variations du lac sont surtout saisonnières, un tel programme donne donc déjà une idée qualitative satisfaisante des phénomènes.

3.2.3. - Profondeurs des prélèvements.

Vus les travaux antérieurs, surtout ceux de Monod, et les études isotopiques entreprises au C.R.G. depuis 1964, nous avons prélevé en surface et à 10 m afin d'étudier plus précisément la zone supérieure soumise à de fortes variations physicochimiques et biologiques. Ensuite les prélèvements ont été effectués à 50, 100, 150 m, 200 m, 250 m et 300 m s'il y avait lieu. Pour l'oxygène et quelquefois pour la silice, des prélèvements intermédiaires ont été réalisés à 20, 30 et 40 m.

3.2.4. - Éléments étudiés.

Les éléments dissous étudiés sont les mêmes que pour les rivières : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ et Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , CO_3^{--} , NO_3^- et la silice. A chaque campagne les mesures de pH par colorimétrie,

de température à l'électrothermomètre et par thermomètre à renversement mécabollier, et de transparence au disque de Szechi ont été effectuées sur place ainsi que la fixation de l'oxygène par la méthode de Winkler. Les méthodes d'analyses en laboratoire sont les mêmes que celles utilisées pour les eaux des rivières. Il est important de noter que les éléments étudiés concernent plus de 99 % de la concentration globale en éléments dissous (voir tableau III₁₁). L'erreur commise en assimilant la concentration globale à la somme de ces 10 éléments est donc faible.

3.2.5. - Problèmes de méthodologie.

Quand on aborde l'étude d'un lac comme le Léman il se pose la question très importante de l'échantillonnage : faut-il multiplier les profondeurs ou les points de prélèvements ou encore faut-il augmenter la fréquence des campagnes ? Comment faut-il échantillonner l'émissaire ? Les réponses à ces questions dépendent évidemment du type de variations de la composition chimique des eaux, nous pourrions essayer d'y répondre après avoir étudié les différentes variations : géographiques, saisonnières et suivant les profondeurs.

Compte tenu de nos derniers travaux d'hydrologie isotopique, nous avons, dans ce travail, divisé le lac en quatre couches : couche supérieure 0-60 m correspondant aux prélèvements de 0-10 et 50 m ; couche moyenne de 60 m à 180 m (100 et 150 m) ; couche intermédiaire 180 m à 220 m (200 m) et couche profonde de 220 m à 310 m. Cette division a été rendue nécessaire pour le calcul de la teneur moyenne du lac en tenant compte des volumes partiels de chaque couche.

Dans la plupart du temps nous avons comparé les valeurs moyennes des concentrations globales ou partielles par point, par couche ou par mois ; les fluctuations dues au simple hasard laissent ainsi place aux phénomènes principaux. Nous avons reporté toutes ces moyennes dans de nombreux tableaux. Seules les analyses de l'exutoire

du lac à Genève sont reportées intégralement au tableau III₂. Il n'était en effet pas possible de reporter ici l'intégralité de plus de 700 analyses chimiques complètes qui ont été réalisées sur le Léman en deux ans et demi au Centre de Recherches Géodynamiques.

Enfin nous nous sommes particulièrement attachés à l'étude du point CRG 3. Ce point, situé au milieu du lac entre Thonon et Rolle par 170 m de fond, représente assez bien l'ensemble du Léman (rappelons que la profondeur moyenne du Grand Lac est de 172 m). Nous donnerons donc pour ce point des données physico-chimiques complètes en plus des variations chimiques pour chaque élément.

3.3. - Variabilité de la composition chimique.

3.3.1. - Valeurs extrêmes du Léman.

Nous avons recherché pour les points principaux et pour l'ensemble du lac, les valeurs extrêmes observées de Février 1968 à Septembre 1970 (tableau III₃). Les premières mesures de Novembre 1967 ont été incluses dans cette recherche. Les quatre éléments les plus variables ont été étudiés : HCO_3^- et Ca^{++} , SO_4^{--} et silice dissoute. Nous voyons que les variations sont très fortes pour la silice de 0,03 à 3,64 mg/l pour une même station. Pour l'ensemble du Léman on peut noter des variations par rapport à la moyenne des valeurs, de 27 % pour les carbonates, 18 % pour le Ca et 14 % pour les sulfates.

En général les ions évoluent dans les mêmes sens, aussi les variations des concentrations globales sont-elles encore plus fortes comme le montre le tableau III₄.

TABLEAU III₄ : Valeurs extrêmes de la concentration globale, rencontrées dans le Léman de Novembre 1967 à Septembre 1970

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ en N	CO ₃ ⁼	Total mg/l	Total meq/l
Valeurs minimales												
CRG 3. 0 m	0,4	36,4	5,6	1,8	1,3	2,4	48,0	74,2	0,0	4,3	174	4,81
16 Sept. 1968												
CRG 21 0 m	0,4	36,4	5,7	1,7	1,3	2,2	45,6	74,9	0,0	5,0	173	4,81
16 Sept. 1968												
CRG 9 0 m	0,3	37,5	6,3	2,7	1,5	2,4	48,7	69,5	0,0	9,6	178	5,08
18 Août 1969												
CRG 9 0 m	0,2	33,0	6,25	2,55	1,25	2,5	45,6	75,2	0,0	/	166	4,55
01 Sept. 1970												
Valeurs maximales												
CRG 10. 306 m	3,5	49,4	6,6	2,3	1,4	2,7	45,6	122	0,4	/	236	6,19
24 Nov. 1967												
CRG 22. 200 m	2,7	48,2	5,9	2,2	1,3	2,8	53,4	117	0,4	/	234	6,17
19 Juin 1968												
CRG 23. 200 m	3,4	49,5	5,7	2,2	1,5	3,2	51,1	119	0,4	/	236	6,21
19 Juin 1968												
CRG 9. 200 m	3,0	48,9	5,8	2,2	1,5	2,4	56,4	119	0,4	/	240	6,28
19 Juin 1968												
CRG 9. 200 m	2,7	48,7	4,7	1,9	1,2	2,8	50,1	121	0,6	/	234	6,08
19 Août 1968												

Il est à remarquer qu'on devrait pouvoir trouver dans les eaux de fond au point CRG 10 des valeurs encore plus élevées (240 à 245 mg/l) si une surveillance suivie était effectuée. Quoiqu'il en soit les écarts sont encore plus grands que ceux observés pour chaque ion en particulier : on a des variations de 40 % pour la concentration globale en mg/l et de 30 % pour la

somme des milliéquivalents (CO_2 dissout inclus). Entre les opinions de Forel et de Delebecque il semble donc déjà que le savant français était le plus proche de la vérité. Regardons d'où proviennent ces fortes variations en examinant de plus près les phénomènes au point CRG 3.

3.3.2. - Etude physico-chimique et chimique du lac au point CRG 3.

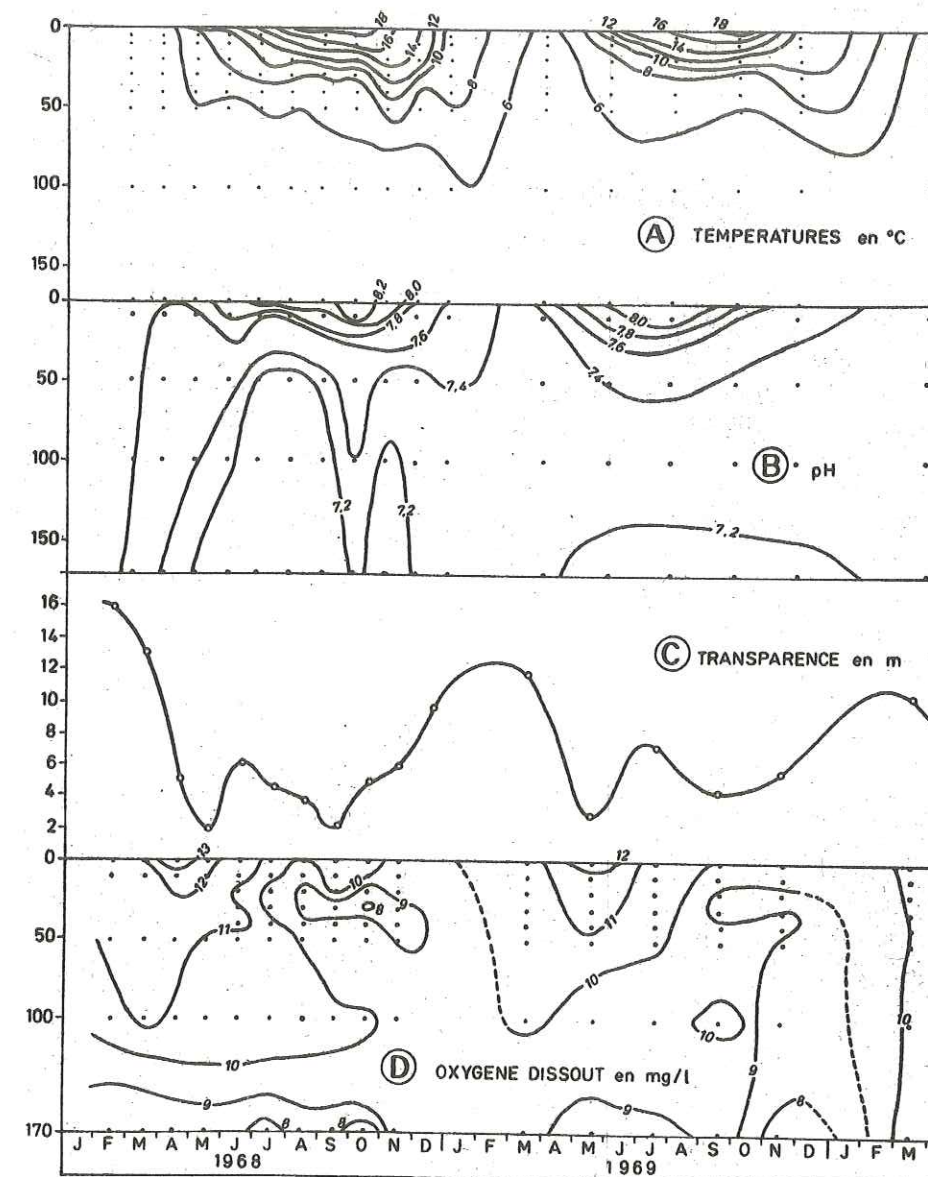
3.3.2.1. - Caractères physico-chimiques généraux.

Nous avons reporté sur la figure III₃ l'évolution sur deux ans aux profondeurs 0, 10, 50, 100 et 170 m (fond) de la température, du pH et de l'oxygène dissout. Il est également porté la transparence des eaux de surface.

Températures. En hiver l'ensemble des eaux est à $5,5^\circ\text{C}$; les eaux se réchauffent vers le mois d'avril, la thermocline devient de plus en plus profonde et s'estompe vers 50 à 60 m au mois de Décembre. En Janvier et Février l'homogénéité thermique est de nouveau réalisée (voir également la figure I₄).

pH. En hiver le pH est homogène en général à 7,3 - 7,4. Le pH va augmenter régulièrement en surface jusqu'à 8,2 au mois de Septembre puis diminue assez rapidement. En profondeur l'évolution du phénomène est moins nette mais on note toutefois un affaiblissement du pH jusqu'à 7,2 au fond. (Le pH maximum mesuré en surface en trois ans a été de 8,8 au point CRG 10 en Septembre 1970).

O_2 dissout. Les variations sont plus irrégulières que celles des deux paramètres précédents. En hiver les teneurs sont en général les mêmes en surface et au fond (10 mg/l) mais ce n'est pas toujours le cas, notamment pour l'hiver 1967-1968. Vers le mois d'Avril, date du début du réchauffement, de l'allongement des jours et du meilleur



LEMAN CRG 3 - Variations des paramètres température, pH, transparence et O_2 dissout de Février 1968 à Mars 1970

Figure III₃

ensoleillement un maximum est atteint en surface (12 à 13 mg/l). Les valeurs diminuent alors mais on observe à nouveau un maximum secondaire en Septembre. Nous n'entrerons pas dans le détail de ce mécanisme bien décrit par Monod (1956). Ce cycle est directement lié à celui du plancton dont le premier développement commence en Avril avec un maximum en Mai, la production d'oxygène par le plancton dépasse alors la désoxygénation physique due au réchauffement des eaux. Après le mois de mai ce phénomène l'emporte, il est seulement retardé par le 2ème pic de développement du plancton au mois de Septembre. Dans les couches profondes les valeurs sont beaucoup plus constantes et sont toujours inférieures aux valeurs de surface (8 à 9 mg/l). Ce phénomène est bien connu dans le Léman depuis les travaux de la Commission de Protection du Léman : le déséquilibre d'oxygène entre l'hypolimnion et l'épilimnion s'accroît et la réserve d'oxygène des eaux profondes diminue chaque année. Le taux de saturation -dont nous n'avons volontairement pas parlé ici- a atteint 10 % en 1969 (1,05 mg/l d'oxygène). Nous reparlerons de ces phénomènes plus loin.

Transparence. Au point CRG 3, situé loin des zones d'apports terrigènes, la transparence reflète directement l'activité biologique du lac. En hiver à la production très faible de plancton correspond un maximum de transparence. Aux développements importants du plancton, en Mai et en Septembre, correspondent chaque fois un minimum de transparence.

3.3.2.2. - Etude des éléments à fortes variations.

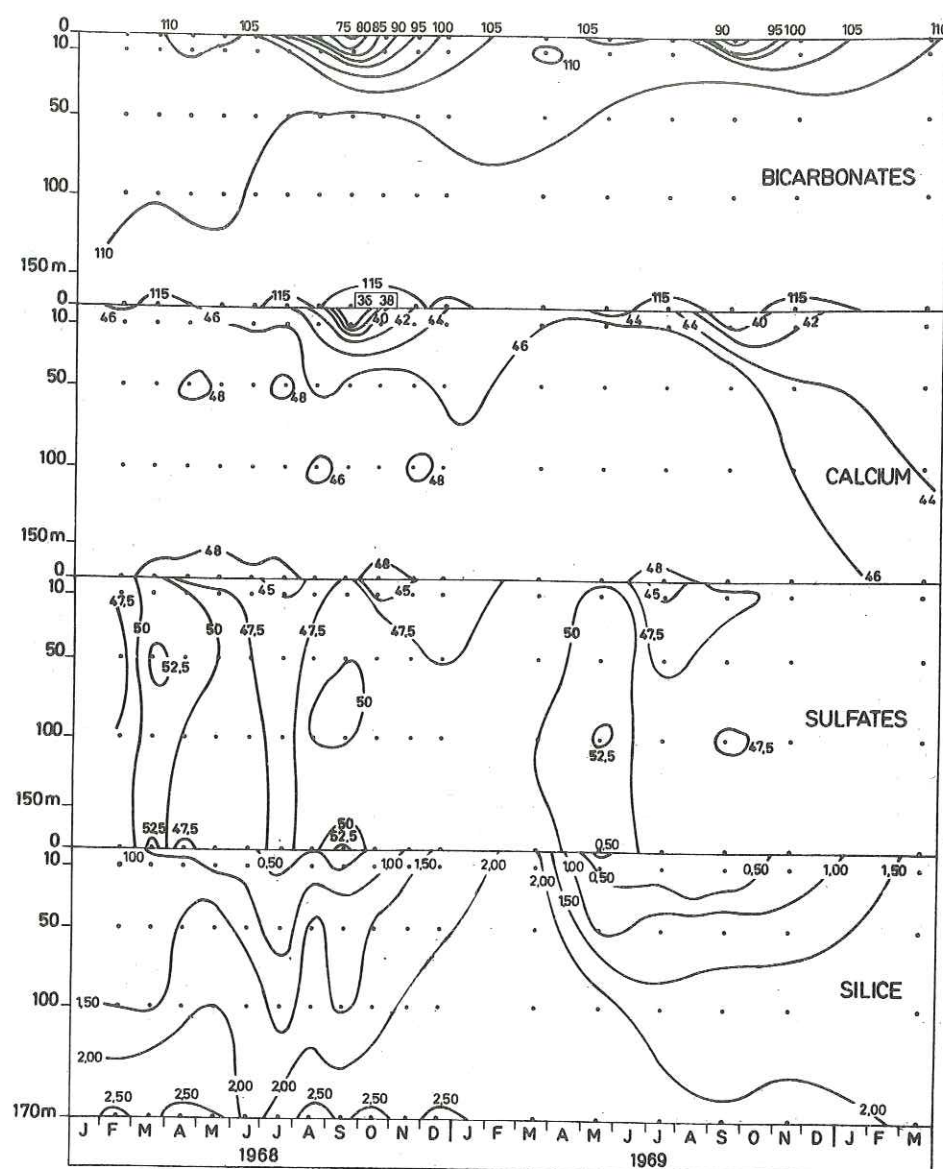
Comme nous l'avons vu les bicarbonates, le calcium, les sulfates et la silice sont les éléments les plus variables pour l'ensemble du lac. Si on considère le point CRG 3 il en est de même ainsi que le montrent bien les figures III₂ et III₄.

Bicarbonates. Les équilibres des carbonates sont bien connus (Hutchinson). Pour le Léman la précipitation des carbonates s'effectue

au mois de Septembre dans les couches superficielles de l'épilimnion quand les températures sont élevées (> 15,5°C) et les pH proches de 8,2. Cette précipitation est bien visible sur les diagrammes en 1968 et 1969. La teneur en HCO_3^- s'abaisse à 75 mg/l. Parallèlement la teneur en acide carbonique (CO_3^{--}) qui est nulle à toutes les profondeurs pendant une grande partie de l'année passe en surface à 5 mg/l aux mois d'Août et Septembre. Une baisse beaucoup moins importante des bicarbonates est visible en Avril, au premier maximum du plancton, elle est accompagnée d'une faible apparition de carbonates (traces à 2 ou 3 mg/l). Cette relation entre la précipitation des carbonates et l'activité biologique est bien connue, elle est due à la consommation de CO_2 dissout (il y en a dans le Léman jusqu'à 5 mg/l, Monod 1956) par photosynthèse lors du développement du plancton. Remarquons que certains composants du plancton sont calcaires : Joukowsky et Buffle (1938) ont signalé la présence de coccolithophoridés.

A partir de 40 m le cycle saisonnier des bicarbonates est presque nul, la principale variation est l'augmentation régulière en profondeur, les valeurs atteignent ici 115 mg/l à 170 m. Cette augmentation est sans doute liée à une redissolution des carbonates en raison du pH plus acide (7,2) et de la basse température (5 à 6°C). Remarquons que pour les zones peu profondes du lac cette redissolution n'a sans doute pas lieu, c'est une des raisons des fortes teneurs en Ca CO_3 des vases du petit lac, sur lesquelles nous reviendrons au chapitre IV.

Calcium. Les variations de cet élément sont analogues à celles des bicarbonates : les valeurs de surface passent de 45 à 46 mg/l en hiver, à 36 mg/l en Septembre. Il y a également un petit minimum secondaire en Avril. Cette diminution au mois de Septembre n'est sensible que dans l'épilimnion. En profondeur le Ca augmente régulièrement jusqu'à 48 mg/l. Cette précipitation des carbonates en Septembre s'observe dans d'autres lacs voisins, notamment à Nantua (Vivier P, Orand A).



LEMAN CRG 3 — Variation des éléments dissous pendant 1968 et 1969. (mg/l)

Figure III₄

Sulfates. La variation des sulfates est beaucoup moins régulière que celle des éléments précédents, néanmoins on observe toujours en surface des valeurs plus faibles qu'en profondeur ; de plus il semble bien qu'il y ait un minimum en surface vers Juillet-Août. Ces phénomènes de surface avaient été notés par Monod (1956) mais les causes de ces variations sont encore mal connues, il est certain que le plancton joue un rôle, il est possible que des bactéries interviennent également.

Silice. De tous les éléments que nous avons étudiés, la silice est celui qui est le plus variable (voir tableau III₃). Les caractères de la variation de la silice sont les suivants :

- fortes variations en surface (0-50 m) allant de plus d'1 mg/l à 0,1 mg/l.
- augmentation générale avec la profondeur à partir de 50 m, avec souvent un taux d'augmentation accru vers le fond.
- variations saisonnières faibles en profondeur.

Les variations en surface sont étroitement liées à l'activité biologique : le minimum principal est atteint en été (Juillet à Septembre), certaines espèces planctoniques comme les diatomées utilisant la silice dissoute. Mais il faut remarquer que le premier développement du plancton en Avril-Mai occasionne déjà une baisse sensible de la silice en surface. Un exemple type de la variation de la silice avec la profondeur est donné par l'analyse de Novembre 1967 au point CRG 10 (voir figure III₁₁).

Ce comportement de la silice s'observe dans les océans et de nombreux lacs (Hutchinson), notamment pour ceux proches du Léman : lac du Bourget, d'Annecy et aussi de Nantua (Vivier, Serruya, Orand, 1967), où des valeurs semblables, de 3 à 4 mg/l au fond, sont observées malgré des profondeurs différentes. Nous nous proposons de revenir sur ces phénomènes dans des publications ultérieures.

Nitrates. Nous ne développerons pas ici l'évolution des nitrates. Cet élément est si étroitement lié à la biologie que son étude nécessite une connaissance approfondie des conditions biologiques. Comme la silice, les nitrates varient fortement en surface : de 0,42 mg N/l en Mars 1968 à 0,02 mg M/l en Septembre 1968 pour remonter à 0,37 mg N/l en Décembre 1968. Au fond, si les valeurs sont toujours supérieures à celles de la surface (0,59 mg N/l en Juillet 1968) les variations saisonnières sont très atténuées.

D'autres éléments, mineurs, par rapport à la composition globale du lac, mais dont l'importance biologique est essentielle, peuvent présenter des variations importantes (nitrites, ammoniacque, phosphates). Notons aussi qu'en raison de la méthode peu précise de dosage -par différence- employée, l'étude détaillée du magnésium n'a pu être entreprise. Cet élément devrait se comporter comme le calcium mais ses variations ne semblent pas confirmer cette hypothèse : on n'observe pas du tout de diminution en Septembre. Nous verrons au chapitre IV la confirmation de cette différence de comportement.

3.3.2.3. - Éléments à faibles variations.

Un certain nombre d'éléments ne montrent aucune variation au cours de l'année, quelles que soient les profondeurs, il s'agit surtout du sodium, du potassium et des chlorures. Les seuls écarts observés sont à mettre au compte du hasard et de l'incertitude des mesures. Les incertitudes sur la détermination du magnésium nous l'avaient fait ranger dans cette catégorie. Cette constance a été vérifiée par la suite grâce au dosage direct par Absorption Atomique : en 1970 le magnésium n'a presque pas varié même au mois de Septembre pour lequel le calcium a fortement baissé (voir tableau III₄ : CRG 9, 0 m, 1er Septembre 1970)

3.3.2.4. - Conclusion de l'étude chimique du point CRG 3.

La première constatation est la différence entre la couche

supérieure délimitée par la thermocline, c'est-à-dire de quelques mètres en Avril à 60 m en Décembre, et les couches profondes. Cette couche correspond à ce qu'on appelle généralement l'épilimnion dans les études de thermique, son extension verticale varie au cours de l'année.

Dans cette couche supérieure s'observent de très importantes variations saisonnières (figures III₃ et III₄) des caractères physico-chimiques. Les paramètres primaires comme la température, la lumière reçue et les sels nutritifs à disposition, vont conditionner la productivité du plancton, phénomène dont dépendent à leur tour les concentrations en bicarbonates, silice, nitrates, etc... Evidemment tous ces éléments interfèrent les uns avec les autres. Ainsi le développement du plancton va limiter la pénétration de la lumière et la teneur en silice en surface est sans doute un facteur limitant du plancton, comme semble l'attester les très faibles valeurs rencontrées au mois de Septembre. C'est pendant cette période, où l'épilimnion est le mieux individualisé, qu'ont lieu les changements chimiques les plus importants : précipitation des carbonates de calcium, diminution très forte de la silice et des nitrates due au deuxième développement annuel du plancton.

A côté des éléments variables il en est d'autres qui restent remarquablement constants, il s'agit du sodium, du potassium et des chlorures. Ces différences de comportement sont bien mises en évidence sur la figure III₄ où nous avons reporté les valeurs moyennes dans la couche superficielle de tous les éléments dosés couramment au point CRG 3.

Enfin une minéralisation plus forte est notée pendant toute l'année en profondeur. Cette augmentation est très nette pour les bicarbonates et le calcium, encore plus pour la silice, mais légère pour les sulfates. En hiver les eaux superficielles sont entièrement homogènes, nous discutons plus loin ce phénomène.

3.3.3. - Etude chimique globale du Léman.

Cette étude porte sur les points CRG 3, 4, 6, 9, 21, 22, 23. La composition du lac à la sortie de Genève sera étudiée à part.

3.3.3.1. - Variations saisonnières.

1) Concentrations élémentaires.

Nous avons reporté dans le tableau III₅ les valeurs moyennes pour la couche supérieure, des bicarbonates, du calcium, de la silice, du magnésium et des sulfates pour chaque point mois par mois.

Bicarbonates et calcium pour tous les points. Ces deux éléments se suivent étroitement pendant toute l'année. En 1968, ce minimum de concentrations a lieu en Septembre pour 5 points, pour CRG 22 et CRG 23 ce minimum apparaît un mois plus tôt en Août. En 1969 cette évolution est analogue.

Sulfates. En 1968 la seule tendance générale est un minimum en Juillet, d'autres minimums secondaires se remarquent avec des décalages d'un ou deux mois suivant les points. Seuls les points CRG 22 et CRG 23 évoluent tout à fait parallèlement. La forte baisse du mois de Juillet s'observe de nouveau en 1969.

Silice. Pour tous les points les valeurs d'été (Juillet à Septembre) sont les plus faibles. On observe également un minimum secondaire marqué en Mai, à CRG 4 et CRG 9. En hiver les valeurs sont maximales partout.

Magnésium. Ainsi que nous l'avions dit aucune variation régulière n'est décelable.

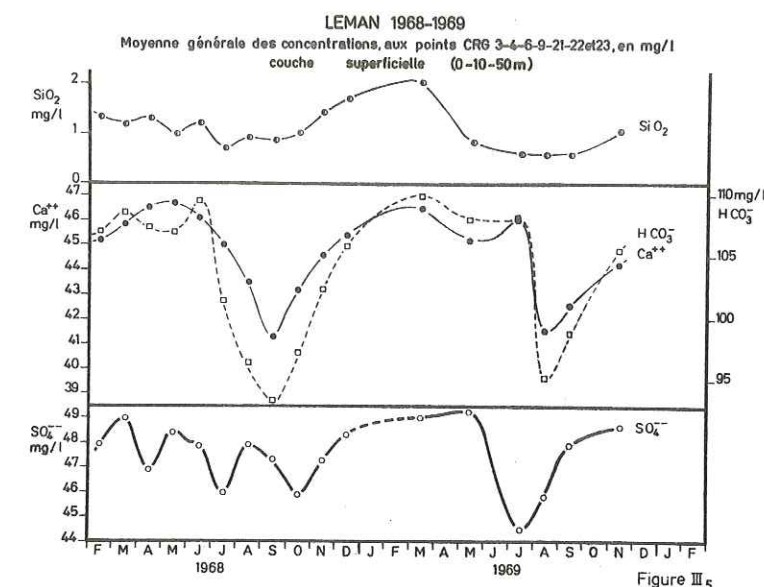


Figure III₅

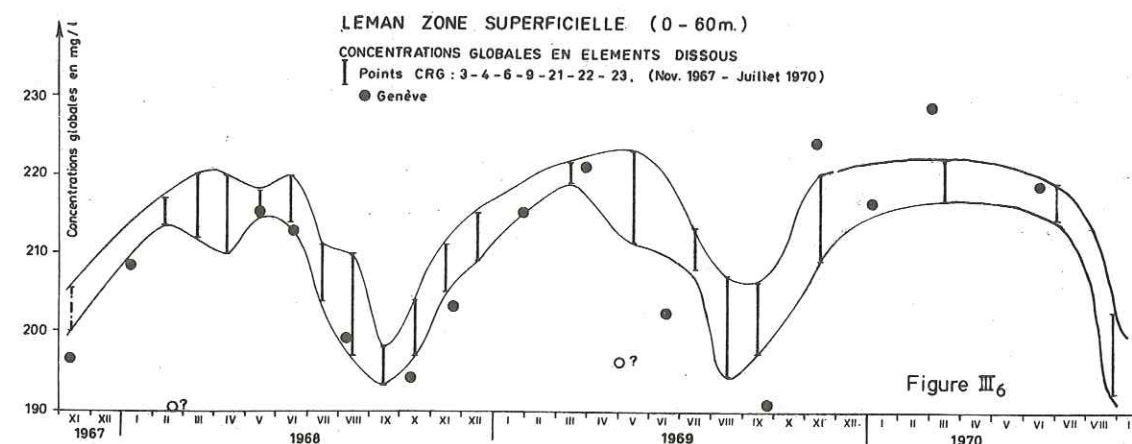


Figure III₆

Sur la figure III₅ nous avons porté chaque mois les moyennes des teneurs de surface pour tout le Léman. La précipitation des carbonates qui se produit sur tout le lac à la fin de l'été est particulièrement visible. Pour la silice, malgré de légères irrégularités, le cycle général est bien visible. Quant aux sulfates, comme nous l'avons dit, seule la baisse du mois de Juillet s'est reproduite de 1968 à 1969, mais nous avons manqué de mesures en 1969, les variations des sulfates étant assez brusques d'un mois à l'autre, il est nécessaire d'avoir au moins un échantillonnage mensuel. De plus la précision des analyses, plus faible par rapport aux autres éléments, limite les conclusions.

3.3.3.1. - Variations saisonnières.

2) Concentrations globales.

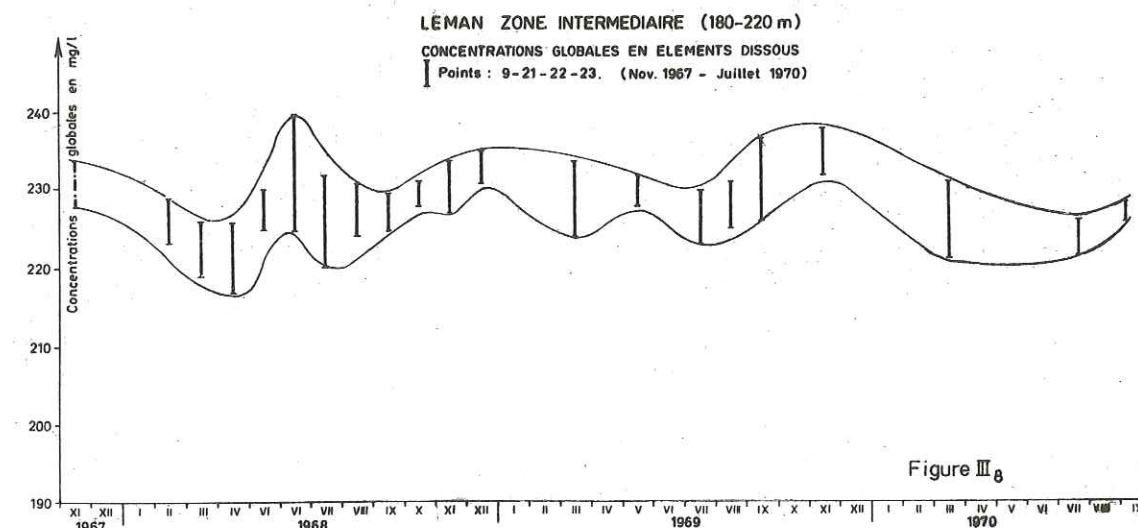
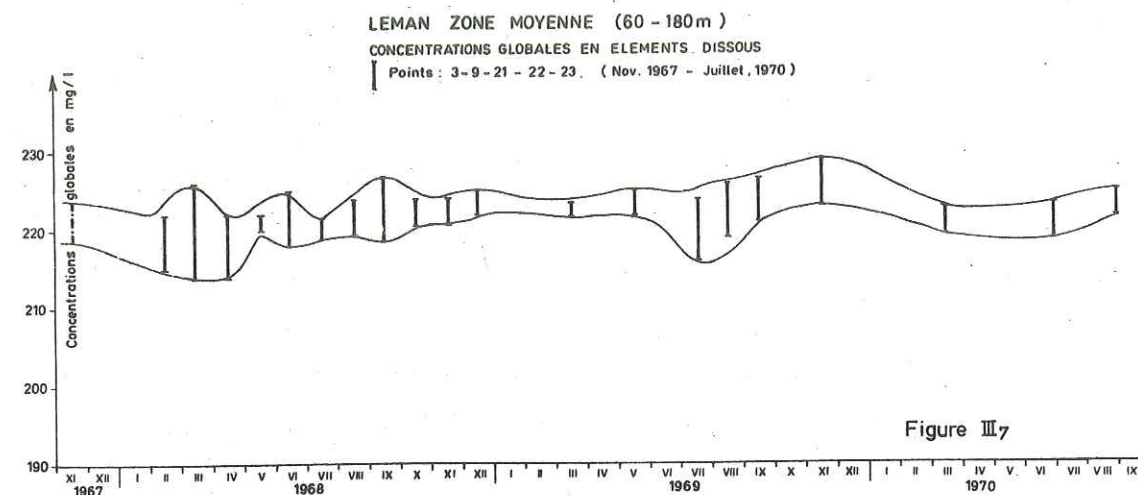
Nous avons porté sur la figure III₆ la variation mois par mois de la concentration globale moyenne du lac pour une couche donnée. Les barres verticales représentent la dispersion géographique des valeurs à un mois donné. Comme nous l'avons déjà dit les variations particulières des éléments s'ajoutent, la variation globale du lac est donc encore plus nette avec toujours un minimum à la fin de l'été.

3.3.3.2. - Variation suivant la profondeur.

1) Concentrations élémentaires.

Nous avons reporté dans les tableaux III₆ et III₇ en annexe les valeurs moyennes annuelles par couches et par éléments pour chaque point[§]. En 1968 pour tous les points on note une variation très nette de la silice, des bicarbonates, du calcium, des sulfates,

§ Pour l'année 1968, nous avons placé à part CRG 3 et CRG 4, en effet, le calcul des valeurs moyennes n'est pas rigoureusement le même du fait des profondeurs différentes.



des nitrates. La variation est nulle pour le sodium, le potassium, le magnésium. Quant aux chlorures aucune tendance n'est décelable. Les mêmes constatations peuvent être faites en 1969.

Il est très important de noter que les valeurs des sulfates et des nitrates sont sensiblement les mêmes pour les couches moyennes et intermédiaires : cela signifie qu'il n'y a pas de changement au sein de l'hypolimnion. Pour les bicarbonates, le calcium et la silice, on note une augmentation constante avec la profondeur. Cette augmentation peut avoir deux origines : une diffusion à partir des sédiments gorgés d'eaux plus minéralisées ou bien une dissolution totale ou partielle des carbonates précipités et des squelettes siliceux du plancton mort. La deuxième hypothèse semble jusqu'ici la plus vraisemblable. Une étude des eaux interstitielles des vases est actuellement en cours avec P. Blanc.

2) Concentration globale.

Elle augmente donc régulièrement avec la profondeur, quelque soit l'époque de l'année. Nous avons reporté dans le tableau III₈ en annexe les valeurs élémentaires moyennes par couches et par points sur deux ans. Les figures III₆, III₇ et III₈ construites sur ces données illustrent bien le phénomène. En hiver la composition chimique du lac s'homogénéise beaucoup mais en général les eaux de fond sont toujours très légèrement plus chargées. Cette augmentation se remarque pour tous les points. *Les barres verticales représentent la dispersion géographique des valeurs pour un mois donné.*

3.3.3.3. - Variations suivant les régions du lac.

1) Le Haut Lac. (Points CRG 22 et 23).

La région de l'embouchure du Rhône est caractérisée dans notre étude par les points CRG 22 et CRG 23 distants entre eux de 2,5 km et situés respectivement à 5 km et à 4 km de l'embouchure.

Les deux points sont aux mêmes profondeurs mais CRG 23 est situé dans le canyon du Rhône. Les évolutions et les concentrations sont les mêmes pour tous les éléments dissous à presque toutes les profondeurs et quelle que soit l'époque de l'année. Ainsi les moyennes des éléments en 1968 et 1969 sont sensiblement les mêmes avec une légère exception pour les chlorures dont la variabilité a déjà été remarquée (voir tableaux III₆ et III₇).

Par rapport à l'ensemble du lac les distinctions sont très faibles : les plus fortes variations s'observent pour la silice 1,05 mg/l, en surface dans le Haut Lac, contre 1,20 mg/l pour le reste du lac (1968), cette différence s'estompe presque totalement l'année suivante. Notons aussi que les eaux sont légèrement moins chlorurées dans le Haut Lac que dans le Grand Lac.

2) Partie Centrale. (Points CRG 3, 4, 9, 21).

Bien que ces points aient des situations assez différentes (profondeur, proximité des rives et des embouchures) leur comportement chimique est sensiblement le même. Les moyennes annuelles (tableaux III₆ et III₇) sont à peu près identiques pour toutes les couches, la seule exception étant pour la silice en surface, ce qui n'étonne pas vu le comportement à part de cet élément.

Du point de vue de l'évolution des éléments (tableau III₅) on note une bonne similitude entre CRG 3 et CRG 21, en particulier pour les sulfates (maximum en Mars 1968). Il n'en est pas de même pour le point CRG 9 pour lequel on note un maximum important au mois de Juin 1968. Mais ces différences restent mineures par rapport à l'ensemble des éléments.

3) Petit Lac. (CRG 6).

Le point CRG 6, situé à 60 m de profondeur dans le Petit Lac juste après le seuil d'Yvoire, est bien à part. En effet ses concen-

trations moyennes sont presque toujours supérieures au reste du lac, pour la même couche superficielle (0-60 m), ainsi que le montrent les tableaux III₆ et III₇. En 1968 la concentration moyenne de surface du Léman est de 208 mg/l, celle de CRG 6 de 210 mg/l et en 1968 209 mg/l contre 213 mg/l. Il est vraisemblable que cette augmentation est due à une proportion non négligeable d'eaux des couches moyennes et mêmes profondes plus minéralisées qui remontent au seuil d'Yvoire. Ce phénomène est bien mis en évidence si on étudie les mouvements des masses d'eau par la géochimie isotopique (Hubert, Meybeck et Olive, 1970). Nous en reparlerons plus loin. L'évolution des divers éléments au point CRG 6 est assez analogue à celle de CRG 3 et CRG 21.

3.3.4. - *Etude des eaux de l'émissaire à Genève.*

3.3.4.1. - *Comparaison avec le reste du lac.*

Nous avons effectué de Novembre 1967 à Mars 1970, 15 analyses complètes de l'eau du lac à sa sortie. Le point de prélèvement est situé à Genève à la jetée des Paquis sur la rive droite, à 750 m des vannes de sortie du lac. Dans l'ensemble les eaux à Genève présentent les mêmes variations que les eaux de la couche superficielle du Léman, ainsi que le montrent les variations des concentrations globales (figure III₆). Nous donnons les résultats complets des analyses sur le tableau III₂ en annexe. Nous pensons que les très faibles valeurs du 19 Février 1968 et du 1er Mai 1968, anormales pour cette époque de l'année sont sans doute dues à une précipitation des carbonates avant analyse. Si on fait abstraction de ces valeurs la variation des 3 éléments majeurs : bicarbonates, calcium et sulfates est rigoureusement identique entre CRG 6, à l'entrée du Petit Lac, et Genève. Notons entre autres la précipitation des carbonates en Septembre ainsi qu'un minimum secondaire de ces éléments en Avril-Mai. Pour les éléments mineurs, comme les nitrates ou les chlorures on observe des valeurs plus irrégulières. Pour eux il serait nécessaire d'augmenter la fréquence des prélèvements (un prélèvement hebdomadaire).

Nous avons comparé les moyennes sur deux ans 1968-1969, de Genève (13 analyses) et de CRG 6 (16 analyses). Il s'agit ici de moyennes arithmétiques en mg/l.

	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃
CRG 6	1,13	45,1	5,45	2,3	1,35	2,45	47,3	106,0	0,30
Genève	0,89	44,7	5,45	2,55	1,40	2,50	45,3	104,9	0,20

Les moyennes sont donc très semblables seules des différences s'observent pour la silice, les nitrates (mais le nombre de mesures n'est pas suffisant pour définir une moyenne), et dans une moindre mesure pour les bicarbonates et le calcium. L'influence des rivières qui se jettent dans le Petit Lac ne se fait pas beaucoup sentir. Cette similitude entre les deux points est explicable : par rapport à l'ensemble du Léman le Petit Lac qui ne représente que 3,6 % du volume global se comporte plutôt comme une rivière très large qui mettrait 4 mois à parcourir 20 km. Les données isotopiques comparées entre CRG 6 et Genève confirment ce temps de transit que nous avons calculé en divisant le volume du Petit Lac par le volume mensuel de sortie à Genève. Les observations de Delebecque sont donc confirmées : l'eau de l'exutoire a bien une composition chimique très proche des eaux de surface.

3.3.4.2. - *Teneurs moyennes à l'émissaire du Léman.*

Pour calculer la quantité d'éléments dissous passant à l'émissaire, étant donné que la composition des eaux et les débits sont variables il faudrait chercher la relation entre les deux paramètres comme nous avons fait pour les apports, puis trouver une méthode de calcul pour pondérer les concentrations par les débits.

Malheureusement il ne nous a pas été possible d'effectuer cette recherche n'ayant que trop peu d'analyses. De plus vu l'allure des variations chimiques et la courbe des débits -l'ouverture maximale des vannes est en été pour contrebalancer les apports du Rhône- il ne semble pas qu'il y ait de différences très nettes entre les moyennes arithmétiques et pondérées. La variabilité des eaux à Genève est celle de la couche superficielle du lac, c'est-à-dire 30 % par rapport à la moyenne, elle est très inférieure à celle des apports qui peut dépasser 100 % suivant les débits. Nous avons pris pour calculer le bilan de sortie en 1968 les valeurs suivantes :

COMPOSITION MOYENNE DES EAUX A GENEVE EN 1968 EN MG/L

! SiO ₂ !	! Ca !	! Mg !	! Na !	! K !	! Cl !	! SO ₄ !	! HCO ₃ !	! NO ₃ !	(en N) !
! 10,65 !	! 44,0 !	! 5,5 !	! 2,2 !	! 1,4 !	! 2,5 !	! 44,3 !	! 102 !	! 0,25 !	!

3.3.5. - Conclusions de l'étude chimique globale du Léman.

1) La composition des eaux est très peu différente suivant les régions du lac; les plus fortes variations moyennes annuelles n'exèdent pas 3 %, par rapport à la moyenne, d'un point à un autre quant à la concentration globale. Elles sont du même ordre pour la plupart des ions sauf pour la silice où les variations régionales atteignent 30 %. Ces variations, maximales en surface, sont vraiment très faibles dans l'hypolimnion où elles sont du même ordre de grandeur que les erreurs d'analyses.

2) La couche superficielle de 0 à 60 m, qui correspond aux fortes variations thermiques et biologiques, est le siège d'importantes variations saisonnières essentiellement des bicarbonates, du calcium, des nitrates et de la silice. Par rapport aux moyennes mensuelles de la couche superficielle pour tout le lac, les variations

dans cette couche sont de 15 % pour les bicarbonates et le calcium, de 1 à 4 pour la silice qui est l'élément le plus variable dans le Léman, et de 12 % pour les sulfates. En général les variations sont saisonnières sauf pour les sulfates qui évoluent beaucoup d'un mois à un autre.

3) Dans les couches moyennes et profondes, qui correspondent à l'hypolimnion, à une profondeur donnée les variations saisonnières des éléments s'estompent beaucoup. Par contre on note une augmentation régulière de la silice, des bicarbonates et du calcium. Cette augmentation est de 1 à 10 et même parfois plus pour la silice, de 25 % pour les bicarbonates et 18 % pour le calcium. Pour les autres éléments l'augmentation des teneurs au sein de l'hypolimnion est très faible.

4) On peut alors classer les éléments étudiés en trois catégories :

- Eléments à faibles variations.

- Sodium et potassium : pas de variations sensibles.
- Chlorures : variations faibles surtout dépendantes de la région du lac.
- Magnésium : variations faibles.

- Eléments à variations moyennes.

- Sulfates : faibles variations, saisonnières et mensuelles, uniquement dans l'épilimnion sans doute liées au cycle biologique mais encore mal connues.
- Nitrates : variations saisonnières très nettes reliées au cycle planctonique dans l'épilimnion, pas de variation nette en profondeur.

- Eléments à fortes variations.

- Bicarbonates et calcium : variations saisonnières fortes

dans l'épilimnion liées aux conditions physico-chimiques (t° , pH) et biologiques ; minimum principal en Août-Septembre, minimum secondaire en Avril-Mai ; augmentation nette et régulière dans l'hypolimnion jusqu'au fond. Elle peut être due à une redissolution partielle des carbonates précipités en surface

- *Silice* : variations saisonnières très fortes dans l'épilimnion, directement liées au cycle biologique, minimum pendant tout l'été, maximum en hiver ; augmentation nette et régulière dans l'hypolimnion jusqu'au fond, sans doute à cause d'une dissolution des squelettes siliceux du plancton (diatomées) mais une diffusion à partir des vases lacustres n'est pas exclue.

Les hypothèses que Delebecque avait formulées, en se basant sur l'observation des phénomènes et sur quelques analyses, sont donc confirmées point par point.

3.3.6. - Concentration moyenne annuelle du Léman et variations interannuelles.

Pour comparer l'état chimique du Léman d'une année à l'autre il est nécessaire de déterminer des concentrations moyennes annuelles. Nous avons vu que la variation avec la profondeur était la plus importante, nous avons donc basé notre méthode de calcul sur cette propriété. Nous avons divisé le lac en 4 couches pour lesquelles nous avons calculé la moyenne annuelle des teneurs. La couche superficielle est ainsi déterminée par 7 points, la couche moyenne par 5 points, et la couche intermédiaire de 180 m - 220 m par 4 points. Cette dernière couche correspond plus à un artifice de calcul pour tenir compte des données à notre disposition, qu'à une réalité physique. Pour la couche profonde de 220 m à 310 m nous avons extrapolé les valeurs moyennes après avoir comparé les analyses sur CRG 10 effectuées deux ou trois fois dans l'année et les analyses régulières mensuelles. L'incertitude sur les données de cette couche profonde est donc plus grande que celle

des autres couches. Les volumes partiels des couches étant bien connus (Hubault 1947) nous avons pu calculer les tonnages partiels pour chacune d'elles, puis le tonnage global du lac et enfin la concentration moyenne annuelle.

Les résultats pour les années 1968 et 1969 sont donnés dans les tableaux III₉ et III₁₀ en annexe. Dans l'ensemble il y a eu très peu de variations. Les bicarbonates ont augmenté en 1969 de 1 mg/l, ce qui s'est reporté sur la concentration globale. Notons une diminution sensible des nitrates et une augmentation de la silice dans le même temps : ces variations peuvent se comprendre par des phénomènes biologiques et chimiques légèrement différents d'une année à l'autre, il se peut aussi que les apports des affluents aient une influence, mais elle doit rester faible vu l'énorme masse du Léman, nous en reparlerons à propos des bilans. Enfin la variation importante du sodium 2,63 mg/l en 1969 contre 1,99 mg/l en 1968 est tout à fait anormale vu le comportement de cet élément, elle est en effet à mettre au compte d'un changement de méthode d'analyse au début de 1969.

Il nous semble intéressant de fournir également une analyse aussi complète que possible de l'eau du Léman. A côté de nos propres valeurs nous avons pris les valeurs moyennes des analyses très complètes publiées par Ramuz en 1957 ; pour les formes de l'azote et les phosphates les valeurs sont les moyennes pour tout le Léman en 1968 d'après les travaux de la Commission de Protection du Léman. L'ensemble de l'analyse est sur le tableau III₁₁, en annexe de ce chapitre.

3.4. - Problème de la circulation générale du lac en hiver et du renouvellement des eaux.

3.4.1. - Position du problème.

La circulation des eaux du Léman a fait l'objet de nombreuses études. Forel distinguait déjà les "courants d'écoulement du lac" dont la pénétration du Rhône est un aspect particulier, les

"courants de convection thermique" et les "courants causés par les vents". Mais la plupart de ces études concerne les courants superficiels qui sont les plus forts et les plus facilement étudiables, citons notamment la belle étude de Betant et Perrenoud (1932) sur les courants dans le Petit Lac. Malgré tout leur intérêt, ces études sont restées très localisées dans le temps et l'espace et aucune recherche d'ensemble sur le mélange des eaux n'avait été effectuée.

Seul Dussart (1948) avait abordé l'étude du devenir du Rhône et de la Dranse par les résistivités et les températures. Mais tous ces moyens d'étude étaient limités : seuils de détection trop élevés des courantomètres et homogénéité thermique, voire chimique du lac en hiver. Cette dernière particularité et le manque d'analyses chimiques complètes dans les couches les plus profondes avaient conduit la plupart des auteurs à l'hypothèse d'un retournement et d'un mélange complet des eaux de la surface jusqu'au fond à la fin de l'hiver (Forel, Delebecque, Monod 1956, etc...). Cette affirmation du mélange complet des eaux des lacs a deux origines :

- les lacs généralement étudiés à fond ont des profondeurs faibles, par exemple les lacs Windermere (Angleterre) et Mendota (U.S.A.). Le mélange des eaux peut donc se faire assez facilement par un apport d'énergie assez faible.

- les moyens d'étude sont en général basés sur des propriétés physiques de l'eau : température, résistivité. Dès qu'il n'y a plus de variation verticale de ces paramètres on admet qu'il y a mélange.

3.4.2. - Etude isotopique par le tritium.

Il suffit de trouver dans l'eau un élément qui ne présente pas les mêmes teneurs en surface et au fond pour affirmer que le mélange n'est pas complet. Le développement de la géochimie isotopique

a permis de trouver pour les études hydrologiques un traceur particulièrement bien adapté puisqu'il fait partie de la molécule d'eau elle-même, il s'agit du tritium. Cet élément radioactif qui provient aujourd'hui, dans sa plus grande partie, des essais thermonucléaires se trouve dans tout le cycle de l'eau, nous l'avons employé pour le Léman comme traceur et dateur naturel des eaux. Depuis 1964 le Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon effectue des analyses de tritium trimestrielles à CRG 22, CRG 10 et CRG 6 ainsi que sur les rivières et l'émissaire du lac. De nombreuses publications ont été faites (Blavoux et Olive 1966 ; Meybeck, Hubert, Martin, Olive 1970 ; Hubert, Meybeck, Olive 1970) ou sont en cours (thèses de MM P. Hubert et Ph. Olive).

Comme ce n'est pas le propos de ce travail d'étudier la dynamique du lac nous nous limiterons aux conclusions générales concernant le mélange des eaux :

1) Il y a dans le Léman une stratification dynamique des eaux en trois couches :

- la couche profonde de 150 m à 300 m est caractérisée par des variations de teneurs en tritium lentes et très faibles. Ces eaux ont donc une grande inertie et se renouvellent très lentement.

- la couche moyenne de 50 m à 150 m présente des variations de teneurs importantes. Cette couche représente environ 45 % des eaux du Léman et joue un rôle fondamental dans le renouvellement du lac, on doit y voir le "courant d'écoulement du lac" de Forel.

- la couche supérieure : l'action des vents, les variations thermiques et l'évaporation lui confèrent une dynamique particulière, bien révélée par les teneurs en tritium, irrégulières et très variables. Les mouvements des eaux y sont beaucoup plus violents que dans les deux autres couches et peuvent atteindre des valeurs supérieures à 10 cm/s. Les directions de ces courants sont également beaucoup plus aléatoires.

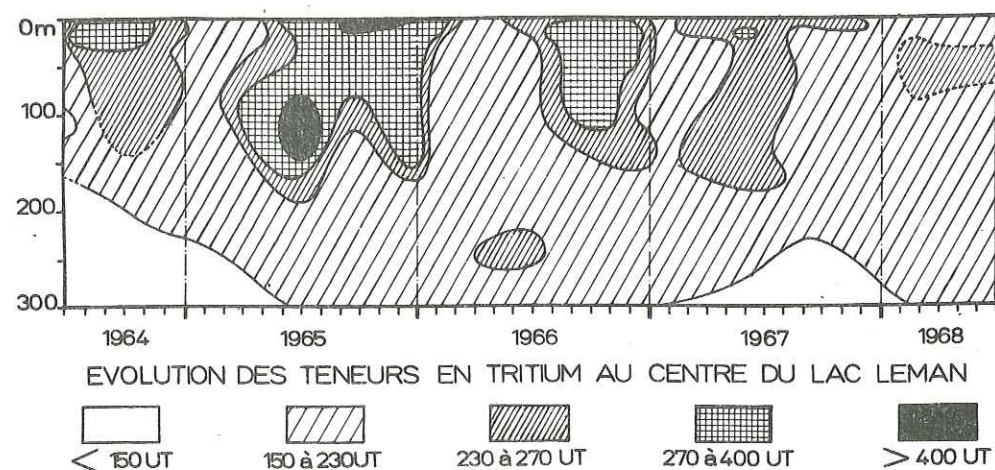
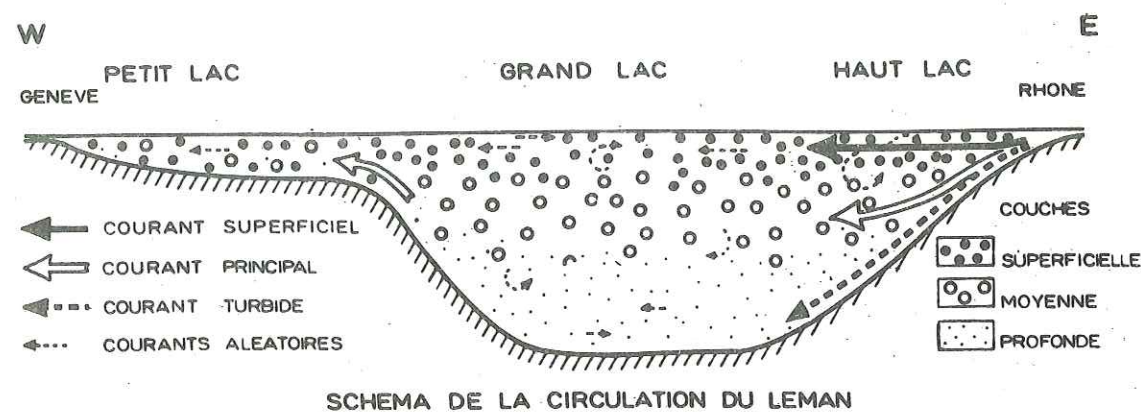


figure III₁₀

Au seuil d'Yvoire les données isotopiques montrent qu'il y a un mélange des 3 couches avec cependant une proportion majeure de la couche superficielle. Nous avons schématisé ces circulations sur la figure III₉.

2) En hiver seule la couche supérieure est fortement brassée, on a toujours une stratification isotopique mais elle est plus faible qu'en été. L'évolution des teneurs au point CRG 10 sur quatre ans met bien ce phénomène en évidence (figure III₁₀).

3.4.3. - Emploi de la silice comme élément traceur.

Nous avons essayé de trouver un élément dissout qui puisse nous servir de traceur pour juger du mélange des eaux du lac. La résistivité, employée par Dussart (1948), est une propriété globale de l'eau et ses variations peuvent être dues à de nombreuses causes différentes, de plus elles sont trop faibles pour faire des études précises. Il fallait un élément aux variations fortes et régulières surtout avec la profondeur, la perturbation des valeurs "normales" nous donnant alors des indications sur le mélange des eaux. La silice dissoute répondait bien à cette définition : à part dans la couche superficielle, où les variations saisonnières sont d'ailleurs bien définies, la silice augmente régulièrement vers le fond, en général à partir de 50 m, profondeur à laquelle l'utilisation biologique de la silice est très faible. La courbe des teneurs au point CRG 10 en Novembre 1967 est typique de ce phénomène (figure III₁₁).

En hiver les couches supérieures se mélangent et la teneur en silice s'homogénéise. En Février 1968 cette homogénéité se remarque jusqu'à 150 m, de même en Mars 1969. En Mars 1970, nous observons pour la première fois une teneur identique de la surface au fond. Il semble donc qu'on ait là un mélange complet. Il nous faut noter la bonne concordance entre la teneur en silice moyenne de Mars 1970 à CRG 10 : 1,80 mg/l, avec les teneurs moyennes annuelles calculées suivant

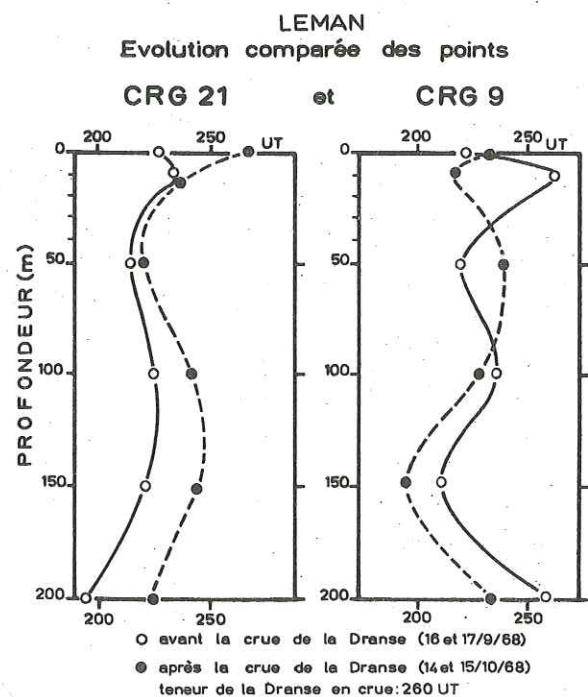
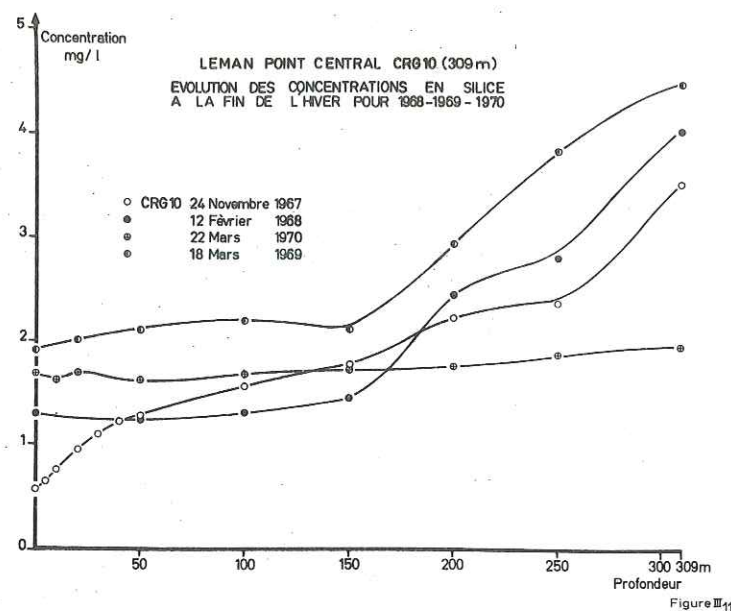


figure III₁₂

4 couches pour 1968 (1,79 mg/l) et 1969 (1,90 mg/l).

On peut essayer de comparer ces résultats avec ceux obtenus par le tritium en 1968 : la figure III₁₀ montre encore un léger noyau de teneurs supérieures à 230 UT mais cette distinction est faible. En effet depuis 1965 date à laquelle la différence de teneurs en tritium entre les couches est maximum, il y a une uniformisation due à la diffusion, aux mélanges à la limite des couches, et secondairement à la décroissance radioactive du tritium, l'impulsion des essais thermonucléaires de 1962-1963 s'estompe de plus en plus. La comparaison des deux méthodes n'est donc pas concluante. Néanmoins il est certain qu'en 1968 et 1969 les eaux profondes n'ont pas été mélangées.

3.4.4. - Conclusion.

Il semble que la vérité se trouve entre un mélange complet des eaux et nos premières conclusions tirées d'observations isotopiques de 1964 à 1968 : le mélange des eaux est variable, en général il peut atteindre 100 à 150 m de profondeur. D'après les teneurs en silice en 1970, il est possible, mais non encore prouvé, qu'il puisse atteindre le fond du lac. Ce phénomène a lieu à la fin de l'hiver, en Février-Mars, période où l'instabilité du lac est la plus grande du fait de l'homogénéité thermique.

3.5. - Pénétration du Rhône et de la Dranse dans le Léman.

3.5.1. - Etudes antérieures.

Forel rapporte (Le Léman, tome I, p. 387) que les auteurs anciens comme Strabon, Pomponius Mela ou Ammien Marcellin, affirmaient que "le Rhône traversait le Léman sans se mêler aucunement aux eaux du lac". Cette croyance encore tenace chez beaucoup de riverains du lac provient sans doute du phénomène connu sous le nom de *Batallière* : les eaux du Rhône chargées de suspensions sombrent très rapidement à

100 m ou 200 m de l'embouchure dans le lac et la différence entre ces deux types d'eaux est très tranchée. Pour le savant vaudois "les eaux descendent directement et pendant la plus grande partie de l'année, en suivant le ravin sous lacustre du delta du Rhône, dans les grands fonds du lac et s'y étalent en nappe horizontale". Forel se base pour cela essentiellement sur des considérations théoriques de densités et aussi sur des arguments sédimentologiques. Pour Delebecque l'action des affluents ne se fait sentir qu'à une distance très faible de l'embouchure. Dussart (1948) étudie en détail la pénétration du Rhône par la mesure des résistivités à des profondeurs variées en s'éloignant de plus en plus de cette rivière. L'étude est menée sur un cycle hydrologique complet. Dussart arrive aux conclusions suivantes :

- *En hiver* : le Rhône, plus froid que le lac et aux eaux plus minéralisées, s'enfonce et creuse lentement son ravin sous-lacustre. Les eaux se trouvent bien canalisées au début mais un peu plus loin se forme une "nappe secondaire" entre la surface et le fond.

- *En été* : le Rhône est beaucoup plus froid que les eaux superficielles, ses eaux moins minéralisées sont riches en suspensions. La position d'équilibre du Rhône est alors située vers 15-20 mètres. On peut déceler cette influence jusqu'à Thonon.

La méthode sur laquelle s'appuie Dussart nous semble très délicate si on effectue des interprétations sans tenir compte des variations du chimisme de l'eau. Ces variations sont maximales en été et dans les couches supérieures, or c'est dans ce domaine que Dussart a particulièrement travaillé. Pour cet auteur toutes les variations de résistivité observées sont à mettre au compte de l'influence du Rhône. Or nous avons vu que la diminution des bicarbonates, qui entraîne la plus grosse variation de la résistivité, a lieu sur le lac partout au même moment.

S'il semble bien qu'une partie du Rhône pénètre dans la couche superficielle en été (Meybeck et al, 1970), nous verrons par contre que le canyon du Rhône est creusé par des courants turbides violents lors des crues, c'est-à-dire principalement en été.

3.5.2. - Etude chimique générale de la pénétration de la Dranse et du Rhône.

Notre étude des points CRG 22 et CRG 23 nous a montré qu'en ce qui concerne les valeurs moyennes annuelles les différences avec le reste du lac étaient très faibles pour l'ensemble des éléments dissous. La silice seule est légèrement plus faible dans le Haut Lac. Dans les grandes lignes les variations de teneurs au long de l'année sont identiques à celles du reste du lac, seule la variation des sulfates est différente mais nous avons également noté des différences entre les points CRG 9 et CRG 21. En ce qui concerne les concentrations des eaux de fond on devrait s'attendre à des différences notables entre les eaux du canyon (CRG 23) et les eaux de la levée nord (CRG 22). Or, si on compare les valeurs Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^- , SO_4^{--} et silice reportées dans le tableau III₅, on voit que les teneurs comme le sens des variations sont identiques, il est donc difficile de déterminer par la chimie une différence de comportement entre ces deux points. Il en est de même pour le point CRG 21. Il faut donc faire appel à de nouvelles méthodes. Là encore nous avons utilisé le tritium, à la fois pour tracer les eaux et pour les dater. Cette étude a déjà fait l'objet d'une publication (Meybeck, Hubert, Martin, Olive 1970), d'autres travaux complémentaires sont en cours (P. Hubert).

3.5.3. - Etude isotopique par le tritium.

Sans entrer dans le détail, citons seulement deux exemples typiques de l'emploi du tritium :

Pénétration de la crue de la Dranse du 22 Septembre 1968.

Cette très forte crue dont nous avons déjà parlé dans le chapitre II a amené au Léman 62 millions de m³ d'eau en quelques jours (Hubert et al 1969). Il était intéressant de voir où sont allées ces eaux. En surface du lac, de 0 à 20 m, un courant turbide était très visible jusqu'à Thonon, mais les eaux de la Dranse ne semblaient pas du tout se diriger vers le nord. Nous avons étudié l'évolution avant et après la crue des points CRG 21, à 1 km de l'embouchure de la Dranse, et CRG 9 situé à 11 km de là près des côtes suisses. Nous avons ainsi pu mettre en évidence par le tritium deux autres courants dirigés vers le nord. En effet à la station CRG 21 la teneur avait augmenté en surface et dans une zone située autour de 100 m de profondeur alors qu'à la station CRG 9, de situation géographique et de profondeur analogues à celles de CRG 21 l'évolution était inverse (figure III₁₂). Cette variation au point CRG 21 est donc due à l'influence de la Dranse dont la teneur (260 UT) était supérieure à celle du lac. Notons que les compositions chimiques avant et après la crue étaient identiques. Seuls les bicarbonates ont augmenté au fond 120 mg/l en Octobre contre 115 mg/l quelques jours avant la crue, cette augmentation qui ne concorde pas avec une augmentation générale du lac à la même profondeur, pourrait être due aux eaux de la Dranse (160 mg/l lors de la crue).

L'étude comparée de CRG 21 et de la Dranse ainsi qu'une étude complète en hiver nous ont amené à la conclusion suivante :

- la pénétration des eaux de la Dranse dans le lac s'effectue suivant deux zones privilégiées : une zone superficielle et une zone de profondeur moyenne. Ces deux masses d'eau, d'origine fluviale récente, restent séparées par un coin "d'eaux lacustres" plus anciennes.

Pénétration du Rhône et courants turbides.

Des campagnes d'hiver et d'été nous conduisent à penser que

pendant la crue annuelle du Rhône, les eaux s'écoulent principalement suivant l'axe du canyon, à la fois en surface et dans une zone moyenne vers 100 m de profondeur. En plus de ce phénomène permanent durant tout l'été nous avons pu mettre en évidence et étudier les courants turbides qui ont lieu dans le canyon du Rhône.

Nous avons déjà vu que la morphologie sous-lacustre du Haut-Lac est caractérisée par l'existence d'un canyon dont la tête est située à l'embouchure du Rhône, et qui aboutit 15 km plus loin à la grande plaine centrale d'une profondeur de 309 m. Ce canyon joue un grand rôle dans le comblement du Léman en canalisant les apports détritiques du Rhône : ce phénomène est analogue aux courants de turbidité bien connus dans les océans. Nous reviendrons sur l'importance sédimentologique de ces phénomènes au chapitre suivant.

Les prélèvements ont été effectués en utilisant des bouteilles hydrologiques classiques et un carottier Jenkins - Mortimer^s qui ramène une petite carotte mixte eau - sédiment superficiel (L = 60 cm, Ø = 10 cm). La surface du sédiment n'est presque pas perturbée lors du prélèvement. Cette étude a été réalisée en Juin 1968. En effet c'est à cette période située au début de la crue du Rhône qu'on a le plus de chance d'observer des courants turbides. Les prélèvements sont localisés sur la figure IV₁₁.

Deux courants turbides ont pu être étudiés le 19 et le 26 Juin 1968 : les eaux prises par carottages dans le canyon étaient très chargées, de l'ordre de plusieurs grammes par litre alors que la teneur en suspensions du lac est normalement mille fois plus faible.

^s Cet appareil nous a été prêté par la Station d'Hydrobiologie Lacustre de l'I.N.R.A. que nous avons plaisir à remercier ici.

Ces fortes turbidités sont significatives et ce phénomène a été observé en plusieurs points différents du canyon : par 195 m (carotte LM 7) et 122 m (LM 8) le 19 Juin 1968, et par 150 m (LM 9) le 26 Juin. Aucun prélèvement effectué à la bouteille à plus de 3 m au-dessus du canyon n'a été turbide, ce qui localise bien le courant. Les carottes prises aux mêmes dates sur les flancs du canyon (LM 6) et dans la plaine centrale à CRG 10 (LM 4) étaient particulièrement limpides. Nous avons complété l'étude en prélevant dans toute la colonne d'eau au-dessus des carottes et dans le Rhône.

Le 19 Juin 1968 les eaux de fond dans le Haut Lac ont une teneur de 140 UT. Les eaux prélevées dans le courant turbide ont des teneurs très différentes et beaucoup plus fortes : 207 UT pour le prélèvement le plus proche du Rhône (LM 8) et 189 UT pour le plus éloigné (LM 7). Le Rhône ayant à ce moment là une teneur de 220 UT, *on peut donc attribuer aux eaux de ce courant une origine fluviale très récente.* Le courant est également bien localisé dans le canyon. En effet on remarque qu'au point CRG 10, situé loin dans la plaine centrale, les valeurs observées pour la carotte LM 4 (177 UT) sont bien les mêmes que pour les eaux de fond (177 UT à 250 m). Le 26 Juin 1968 la teneur de la carotte turbide LM 9 (194 UT) est également analogue à celle du Rhône. Remarquons que les deux courants observés ont eu lieu lors de la montée des eaux pendant une crue, par contre le 17 Juillet en période de décrue rapide, aucun des carottages effectués dans le canyon n'avait été turbide.

En conclusion les courants turbides du canyon du Rhône sont relativement rapides et très localisés dans le fond du canyon. Ils ont lieu essentiellement pendant les crues, se remarquent nettement jusqu'à 4 km de l'embouchure du Rhône et peuvent parcourir tout le canyon.

S'il n'avait pas été possible de mettre en évidence la pénétration profonde de la crue de la Dranse par les analyses

chimiques -même par la silice- il n'en est pas de même pour les courants turbides. En effet les analyses de tritium nous permettent d'attribuer aux eaux du Rhône plus de la moitié des eaux du courant du 19 Juin 1968. Les analyses complètes du Rhône, de l'eau du courant turbide et de l'eau limpide à 3 m au-dessus du fond au point CRG 23, montrent cette origine (tableau III₁₂).

TABLEAU III₁₂ : ANALYSE CHIMIQUE D'UN COURANT TURBIDE (en mg/l)

	Rhône du 19.6.68	Courant turbide à CRG 23 ; 20 cm au dessus du fond 19.6.68	Eaux limpides à CRG 23 3 m au-dessus du fond 19.6.68
SiO ₂	2,84	2,08	3,42
Ca ⁺⁺	35	46,5	49,5
Mg ⁺⁺	4,3	5,9	5,7
Na ⁺	1,9	2,3	2,2
K ⁺	1,2	1,4	1,5
Cl ⁻	1,85	2,40	3,25
SO ₄ ^{- -}	42,5	54,6	51,1
HCO ₃ ⁻	76,4	112,0	119,3
NO ₃ ⁻ (en mgN/l)	0,24	0,38	0,39

Pour la plupart des éléments majeurs -exception faite des sulfates- la composition du courant turbide se rapproche beaucoup de celle du Rhône ; la valeur de la silice, très faible à cette profondeur, est particulièrement significative.

Remarque.

- 1) On peut maintenant expliquer la similitude entre le chimisme

des eaux de fond de CRG 22 et de CRG 23 ; en effet nous prélevons toujours pour les analyses chimiques à 2 ou 3 m au-dessus du fond afin que le prélèvement ne soit pas pollué par la vase mise en suspension après l'arrivée de la bouteille (le poids de garde ne suffit pas toujours à arrêter la bouteille avant qu'elle ne touche). Aussi comme les courants turbides sont très localisés et qu'ils n'ont pas d'influence chimique sur les eaux immédiatement sus-jacentes, aucune différence n'était évidemment décelable.

2) L'influence chimique de ces eaux turbides dans la couche profonde du Léman doit rester très faible : ces courants sont localisés dans le temps et l'espace. Enfin si les eaux sont encore bien individualisées sur le plan chimique à 4 km du Rhône, on doit s'attendre à un mélange beaucoup plus fort au débouché du canyon dans la plaine centrale.

3.6. - Evolution des caractères physico-chimiques du Léman depuis 1870.

3.6.1. - Evolution des éléments principaux.

C'est encore à Forel que nous devons de précieuses recherches historiques sur les anciennes analyses chimiques du Léman : la première fut celle de Tingry en 1808 et fut publiée en "pouces du pied de roi et en grains de la livre poids de marc", Forel heureusement transcrivit cette analyse dans le système métrique. Les analyses suivantes furent celles de St Claire Deville (1848) Risler Walter (1872) et Lossier (1877). Avec Duparc (1888), Freundler (1891) et Delebecque (1896), le lac est analysé presque couramment et les premières analyses complètes sont effectuées. De son côté Forel multiplie les observations sur le lac notamment les mesures de transparence.

Après 1900, les analyses de Dienert (1912) -effectuées en vue d'alimenter Paris avec les eaux du Léman- de Monod (1956) et de Ramuz (1957) sont les plus marquantes. Il en résulte que nous pouvons

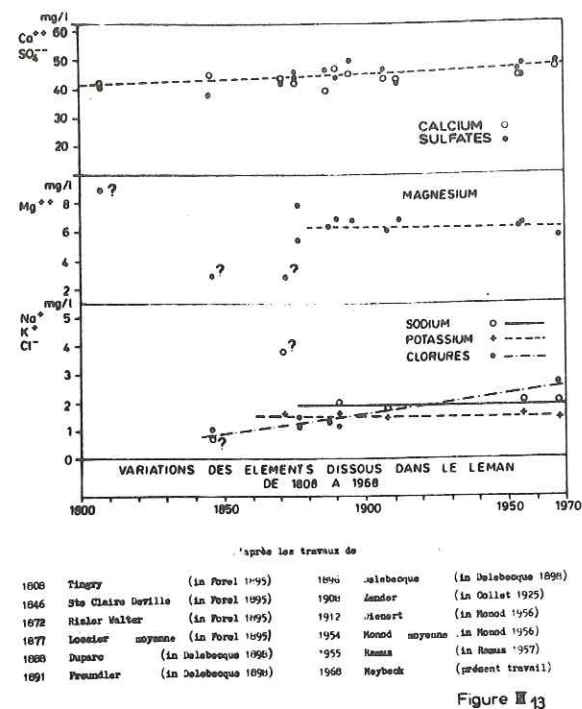
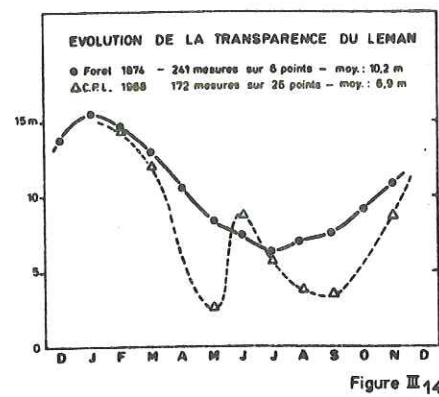
retracer l'évolution chimique du Léman depuis plus d'un siècle. Nous avons porté sur la figure III₁₃ la variation des concentrations depuis l'analyse de Tingry pour les éléments suivants : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- et SO_4^{--} . Malgré les dispersions -comme pour le Mg- dues aux différentes méthodes d'analyses, on note dans l'ensemble une *remarquable constance de la composition chimique*. Seuls les chlorures ont augmenté nettement de 1 mg/l en 1850 à 2,5 mg/l en 1970. Les autres éléments sont constants (Na^+ , K^+ , Mg^{++}) ou en très légère augmentation (Ca^{++} , SO_4^{--}), ce qui peut être dû aussi au nombre plus grand d'analyses d'eaux profondes plus minéralisées.

3.6.2. - Evolution du caractère eutrophe du Léman.

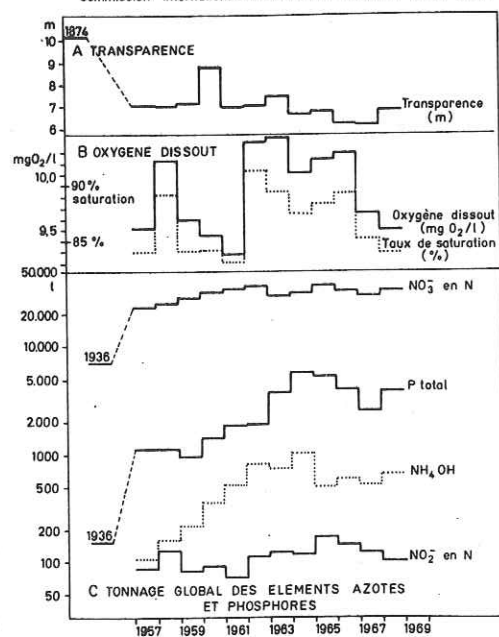
3.6.2.1. - Transparence.

La transparence est une mesure simple qui apporte beaucoup de renseignements sur l'état d'un lac pour autant qu'on effectue un grand nombre de mesures. Pour le Léman ce facteur dépend essentiellement du développement du plancton. Si la masse planctonique s'accroît d'année en année, phénomène d'eutrophisation, la transparence tendra à diminuer. C'est exactement le cas du Léman : en 1874 Forel avait 10,2 m de transparence moyenne annuelle (241 observations sur 6 points), en 1968 cette valeur, calculée par la Commission de Protection du Léman, est passée à 6,9 m.

De plus l'allure générale de la variation annuelle a radicalement changé (figure III₁₄). Du temps de Forel il n'y avait qu'un minimum annuel de transparence en Juillet, maintenant on note chaque année deux minima en Mai et Septembre qui correspondent aux deux développements du plancton. C'est un signe frappant des changements biologiques de l'état du lac. Enfin remarquons que le lac arrive encore à résorber cette énorme masse de plancton puisque la transparence en hiver atteint encore celle de 1874. C'est en été que la situation se dégrade et des transparences moyennes inférieures à 2 m ne sont plus rares dans le Léman.



EVOLUTION DU CARACTERE EUTROPHE DU LEMAN
 D'après Forel (1885) - Hubault (1936)
 Commission Internationale de Protection du Léman (1957-1968)



3.6.2.2. - Oxygène.

Jusqu'à ces dernières années la répartition de l'oxygène dissout dans le Léman était orthograde, c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de diminution importante de l'oxygène dans les couches profondes. Hubault (1947) donne des valeurs de près de 10 mg/l au fond du lac en 1936. Quand un lac s'eutrophise les couches supérieures (épilimnion) s'enrichissent de plus en plus en oxygène jusqu'à dépasser le taux de saturation défini par la température et la pression, parallèlement les eaux profondes s'appauvrissent. Ce déséquilibre est de plus en plus net dans le Léman : la distribution d'oxygène a tendance à devenir clinograde, les eaux de fond ne sont plus saturées en oxygène qu'à 50 %, mais cette valeur peut être encore plus faible (10 %).

Nous avons porté sur la figure III₁₅ l'évolution de la teneur moyenne globale en oxygène du Léman d'après la Commission de Protection du Léman. La concentration tend constamment à baisser et c'est seulement grâce à des hivers longs et rigoureux que les eaux du lac peuvent se réoxygéner. C'est le cas pour l'hiver 1962-1963 (Monod 1965).

3.6.2.3. - Éléments nutritifs.

La cause principale du développement très important du plancton est l'augmentation des teneurs dans le lac d'éléments nutritifs azotés et phosphatés indispensables à son développement. La provenance de ces éléments est multiple : naturelle (sels minéraux), agricole (engrais azotés et phosphatés), ménagère (détergents phosphatés) enfin industrielle et urbaine. Depuis 1957 la Commission de Protection du Léman a pour tâche principale dans ses études chimiques d'effectuer le bilan de ces éléments (apports des rivières, valeurs moyennes du lac, sorties à Genève). Nous avons reporté sur la figure III₁₅ l'évolution des tonnages globaux de tout le lac en nitrates,

nitrites, ammoniacque et phosphates : en comparant avec les valeurs en 1936 estimées d'après les données d'Hubault (1947) on constate les faits suivants :

- En 30 ans, de 1936 à 1957, la masse de nitrates dans le Léman est passée de 7 000 t à 23 000 t d'azote équivalent, les phosphates sont passés de 150 t à 1 100 t (phosphore total).

- De 1957 à 1963 il y a eu une augmentation importante des nitrates, phosphates et ammoniacque.

- Depuis 1963 la masse totale des éléments azotés est plus stable et oscille autour de 35 000 t, de même pour les phosphates, il semble que l'augmentation se soit stabilisée depuis 6 ans.

Il est donc certain que la très forte augmentation des éléments nutritifs est à l'origine d'un déséquilibre profond de la biologie du Léman. La masse totale de plancton s'est trouvée fortement augmentée et on note les changements qualitatifs de l'état biologique du Léman. (Commission de Protection du Léman).

- Développement massif de macrophytes sur tous les bords du Léman.

- Changements qualitatifs dans la répartition des espèces planctoniques : nombre d'espèces recensées multiplié par 10 de 1957 à 1967, baisse nette de la proportion de diatomées, apparition d'*oscillatoria rubescens* en 1967 etc...

- Changements nets dans la faune du Léman : apparition et développement intense de *dreissena polymorpha* Pallas depuis 1962, prolifération de l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus* L.) (d'après P. Laurent 1966).

Il faut remarquer que cette évolution du Léman s'est déjà

remarquée dans bien d'autres lacs périalpins. Ainsi la teneur en phosphates du Bodensee a brusquement augmenté : de 0,003 mg/l vers 1950 elle est passée à 0,025 mg/l (Müller, 1967). Dans le lac des quatre Cantons la concentration moyenne est passée de 0,012 mg/l en 1962 à 0,020 mg/l en 1968 (Ambühl, 1969). Le phosphore est considéré pour ces lacs comme le facteur essentiel du développement du plancton.

Depuis 1965 il semble que la quantité globale d'éléments nutritifs a cessé d'augmenter dans le Léman, mais nous verrons la difficulté de l'établissement des bilans, de plus, comme dans le même temps la quantité totale de matière vivante dans le lac s'accroît énormément, il semble donc que le lac continue son évolution vers l'eutrophisation. Compte tenu du temps de renouvellement du Léman, la réponse du lac à une quelconque impulsion sera très lente, inversement la réaction du lac à des mesures de protection et d'assainissement sera également très longue.

3.6.3. - *Comparaison du Léman et des Grands Lacs du St-Laurent.*

Les Grands Lacs américains sont sans doute parmi les mieux étudiés depuis des dizaines d'années et leur évolution est bien connue. Dans son excellente étude Beeton (1965) arrive aux conclusions suivantes : les lacs accusent à la fois une pollution chimique très forte et des changements biologiques importants. Sauf pour le Lac Supérieur, tous les grands lacs ont accusé depuis 1900 une minéralisation nette des eaux pour les éléments majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^{--} , Cl^-). Les lacs Erie et Ontario ont vu leurs concentrations globales passer de 140 mg/l à 190 mg/l en 60 ans. Citons encore :

- lac Michigan : SO_4^{--} passe de 7 mg/l à 18 mg/l.

- lac Huron : SO_4^{--} passe de 7 mg/l à 15 mg/l.

- lac Ontario : Ca^{++} passe de 30 mg/l à 38 mg/l.

Cl^- passe de 7 mg/l à 25 mg/l.

L'interprétation de ces données est compliquée du fait que les lacs se déversent les uns dans les autres mais Beeton attribue ces énormes changements au développement et à l'industrialisation de toute cette région. Il y a là un exemple frappant de pollution chimique effectuée par le peuplement humain. De plus les teneurs en oxygène dissout sont maintenant très faibles dans certains lacs -moins de 3 mg/l au fond du lac Erie-. Les changements biologiques quantitatifs et qualitatifs sont très visibles également : Si 6,8 millions de kg de brochets bleus se prenaient chaque année dans le lac Erie avant 1950, seuls quelques spécimens très âgés étaient encore pris en 1963 !

Il y a donc une différence radicale entre le Léman et les Grands Lacs : ces derniers ont été essentiellement pollués par des déversements d'eaux industrielles usées qui ont entre autres complètement changé leur équilibre chimique. Pour le Léman par contre aucun changement important dans la composition des éléments majeurs ne s'est produit depuis 100 ans ; mais l'augmentation catastrophique des substances nutritives azotées et phosphatées est à l'origine d'un développement intense du plancton et de changements biologiques, signes de l'évolution du Léman vers l'eutrophisation.

B - BILAN DES ELEMENTS SOLUBLES DU BASSIN DU LEMAN

3.7. - Problèmes posés par l'établissement du bilan.

3.7.1. - Les termes du bilan.

Plusieurs éléments entrent en ligne de compte pour effectuer le bilan des éléments dissous d'un lac à son émissaire. Les apports sont les suivants :

- rivières arrivant au lac
- sources sous-lacustres
- ruissellement direct
- égouts, rejets de stations d'épuration, etc...
- précipitations atmosphériques directes sur le lac et retombées sèches
- dissolution d'éléments en suspension dans le lac
- diffusion à partir des eaux intersticielles des vases

les retraits sont les suivants :

- émissaire
- pertes sous-lacustres
- pompages de l'eau du lac avec rejet en dehors du bassin
- évaporation et formation d'aérosols
- précipitation chimique
- précipitation biologique (plancton, animaux morts, etc...)

On voit tout de suite la complexité d'une telle étude, néanmoins on peut éliminer les sources et les pertes sous-lacustres qui sont très faibles sinon nulles dans le Léman (Blavoux, Dussart, Maneglier, Salvetti, 1962). Le déficit du bilan hydrique d'une année moyenne est de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, il correspond au ruissellement direct et sans doute aux nappes alluviales du Rhône, de la Dranse et des autres affluents. Les précipitations directes sur le Léman sont de l'ordre de $1\,000 \text{ mm}/\text{an}$, ce qui équivaut à un apport moyen annuel d'environ $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Les eaux de pluie sont de l'ordre de 10 à 50 fois plus faiblement minéralisées que les rivières du Léman. Henson et al (1969) ont estimé que, dans le bilan du lac Champlain (U.S.A.), les proportions des apports d'origine atmosphérique vont de 0,26 % pour le magnésium à 1,21 % pour les chlorures. Cet ordre de grandeur est bien en dessous des incertitudes que nous avons ici sur les apports des rivières. Il en est de même pour l'évaporation et la formation d'aérosols chargés en ions dissous : leur influence sur le bilan doit être encore plus minime. Si les pompages d'eau du lac avec rejet en dehors du bassin versant (cas du Canton de Genève) ne sont pas très importants par rapport au bilan, il n'en est malheureusement pas de même du ruissellement direct et des rejets d'eaux usées : ces deux facteurs sont très difficiles à mesurer et bien que les masses d'eau usées soient faibles les concentrations peuvent être très élevées, surtout pour les éléments azotés et phosphatés. Quant à la diffusion à partir des vases, les expériences en cours (P. Blanc, M. Meybeck) montrent que les eaux intersticielles sont beaucoup plus minéralisées que les eaux de fond. Nous avons vu que seule la silice présente un taux d'augmentation accru dans les couches profondes (voir sur la figure III₁₁, CRG 10 en Novembre 1967) pouvant être expliqué par une diffusion à partir du fond. Les études en cours permettront de préciser l'ampleur du phénomène pour chaque élément. Dans l'état actuel de nos connaissances nous ne savons rien sur la dissolution possible des matières en suspensions.

En effectuant donc la différence des apports des rivières

et des sorties à Genève nous obtiendrons par défaut la quantité de matières dissoutes consommées par les organismes vivants et précipitée chimiquement. La précision du bilan permettra de dire si ces différences sont significatives ou non.

3.7.2. - Période de calcul du bilan.

Dans tout bilan il faut choisir comme limites des périodes de faibles variations des paramètres, nous avons choisi ici Janvier et Décembre. De plus il importe de tenir compte de la variation de tonnage global dans le lac entre ces deux limites, en effet *le Léman ayant un temps de renouvellement moyen de 11 ans, les eaux sorties en Décembre n'ont rien à voir avec les eaux arrivées au mois de Janvier précédent*. On peut donc faire : soit un bilan entrées-sorties sur une longue durée, sans faire de mesures sur le lac, soit un bilan sur une durée plus faible en tenant compte de la variation des teneurs du lac pendant cette période. Nous avons choisi cette deuxième méthode.

3.8. - Bilan.

3.8.1. - Bilan sans tenir compte de la variation du lac.

Pour ce bilan de Janvier 1968 à Décembre 1968, les apports du Rhône et de la Dranse sont tels que nous les avons calculés au chapitre II. Pour les autres rivières affluentes qui représentent moins de 15 % des apports directs nous avons utilisé les données de la Commission de Protection du Léman pour les éléments suivants : Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , NO_3^- . Les éléments restants (SiO_2 , Na^+ , K^+ , SO_4^{--} , HCO_3^-) ont été calculés par extrapolation en assimilant ces petites rivières à la Dranse et à la Venoge de compositions chimiques bien connues. Pour les sorties à Genève nous avons pris la moyenne arithmétique en 1968. Le tableau III₁₃ représente le bilan. On note un déficit hydrique de $21 \text{ m}^3/\text{s}$ provenant du ruissellement direct, des égouts, et de la différence pluie-évaporation. Ce bilan est donc largement

donné par défaut. Il semble que les différences pour la silice et les nitrates sont significatives. Nous allons voir ce qu'il y a lieu d'en penser.

3.8.2. - Bilan en tenant compte de la variation de composition des eaux du lac.

Nous avons estimé la masse totale pour chaque élément contenu dans le Léman en Janvier 1968 et en Décembre 1968 en milliers de tonnes.

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TOTAL
Janvier 1968	160	4 160	525	200	125	310	4 315	9 840	36,4	19 670
Décembre 1968	220	4 260	450	170	125	215	4 370	10 005	44,9	19 865

Les variations du magnésium, des chlorures et du sodium sont suspectes, en effet, elles peuvent être dues aux erreurs d'analyses ou même aux changements de méthode. Par contre il apparaît nettement que les concentrations en silice ont augmentées de 30 % et celles des nitrates de 20 %, c'est-à-dire 60 000 t supplémentaires de silice et 8 500 t de nitrates en azote équivalent. Les autres éléments, Ca⁺⁺, SO₄⁼ et HCO₃⁻ n'ont varié que de moins de 2 % mais ces variations représentent quand même 100 000 t pour le calcium, 55 000 t pour les sulfates et 165 000 t pour les bicarbonates.

Le bilan précédent que nous avons effectué n'est donc plus significatif : une petite variation de 0,1 mg/l pour l'ensemble du Léman suffit à équilibrer une augmentation de 1 mg/l des concentrations moyennes des apports.

3.8.3. - Bilan sur plusieurs années.

Nous pouvons essayer de faire un tel bilan avec les phosphates et les nitrates grâce aux données fournies par la Commission de Protection du Léman sur une durée de cinq ans, de 1964 à 1968 :

	Azote total minéral	Phosphore total minéral
Entrées de 1964 à 1968	+ 22 000 t	+ 5 000 t
Sorties de 1964 à 1968	- 14 000 t	- 1 000 t
Variation du lac (1964)-(1968)	- 2 000 t	+ 1 800 t
Quantité stockée dans le lac	6 000 t	5 800 t

Ce bilan n'est bien sûr qu'indicatif puisqu'il devrait porter sur au moins 11 ans, mais on peut quand même avancer que le lac s'est enrichi (biomasse, sédiments) d'environ 6 000 t d'azote total minéral et 5 800 t de phosphore total minéral en cinq ans.

3.9. - Erosion chimique du bassin versant du Léman.

Si on considère que la surface du bassin versant fermé au Pont du Mont-Blanc à Genève est de 7 975 km², et en prenant les concentrations moyennes à Genève sur deux ans on aura les valeurs suivantes comparées au Bodensee (tableau III₁₄)

TABLEAU III₁₄ : EROSIONS SPECIFIQUES COMPAREES DES BASSINS VERSANTS
DU LEMAN ET DU BODENSEE

	LEMAN		BODENSEE	
	7 975 km ²	240 m ³ /s	11 000 km ²	273 m ³ /s
	mg/l	t/km ² /an	mg/l	t/km ² /an
SiO ₂	0,90	0,81		
Ca ⁺⁺	44,7	40,6	45,9	35,8
Mg ⁺⁺	5,5	4,95	8,6	6,7
Na ⁺	2,55	2,3	3,4	2,6
K ⁺	1,4	1,25		
Cl ⁻	2,5	2,25	2,9	2,25
SO ₄ ⁻	45,3	41,1	41,5	32,4
HCO ₃ ⁻	105,0	95,2	138,0	107,5
NO ₃ ⁻	0,25	0,23		
Concent. totale	208	189		190 [§]

§ - valeur extrapolée.

Les érosions spécifiques sont calculées d'après les données de Müller (1964) pour le Rhin lacustre ou Seerhein, émissaire du Bodensee (Obersee). Une fois encore la similitude géochimique des deux lacs est frappante.

On peut donc estimer que l'érosion chimique moyenne sur le versant nord des Alpes est de 190 t/km²/an. Il est intéressant de comparer cette valeur avec celle du Pô. D'après L. Canalli (1964) le Pô amène chaque année à la mer 11,5 millions de tonnes d'éléments

dissous. Pour un bassin versant de 70 000 km² cela correspond à une érosion spécifique chimique de 16,5 t/km²/an c'est-à-dire 10 fois moins que celle du versant nord des Alpes. Remarquons que l'érosion chimique pour la Bregenzer Ach, deuxième affluent du Bodensee et aussi semblable à la Dranse que le Rhin l'est au Rhône, est de 535 t/km²/an. Nous voyons au chapitre IV (tableau IV₂) que ces valeurs sont très fortes.

3.10. - Conclusion générale de l'étude et du bilan chimique des eaux du Léman.

Nous nous étions posé beaucoup de questions méthodologiques au début de ce chapitre, nous pouvons maintenant tenter d'y répondre. Les variations principales des composants dissous du Léman sont fonction de la profondeur, seules les couches supérieures sont soumises aux importantes variations saisonnières. Dans l'hypolimnion les variations sont très atténuées, seuls quelques éléments y varient encore comme les bicarbonates, calcium et silice qui augmentent régulièrement vers le fond. Les variations géographiques sont secondaires dans le Léman.

Dans l'état actuel de nos connaissances il n'est pas possible d'atteindre dans l'établissement des bilans d'éléments dissous une grande précision. D'abord il est nécessaire de connaître avec précision les variations des teneurs dans le lac : en effet vu l'énorme volume du Léman une petite variation de la concentration générale peut rendre compte d'une grosse différence entre les apports des rivières et la sortie de l'émissaire. Il suffira donc pour avoir une bonne idée de l'état du lac de choisir 4 ou 5 stations d'études, d'y effectuer des prélèvements mensuels -les variations se produisent en effet sur plusieurs mois en général-, les profondeurs des prélèvements devant être 0 - 10 - 20 - 50 - 100 - 150 m etc... pour bien tenir compte des variations de l'épilimnion. Il faudra au moins une station au-dessus de la plaine centrale à 310 m de profondeur.

Pour les apports au Léman par les rivières une fréquence bimensuelle semble suffisante pour la plupart des éléments dissous. Pour ceux dont la variabilité ne dépend pas directement du débit (chlorures, nitrates, etc...) il faudrait envisager des prélèvements intégrés proportionnels aux débits. Par contre les apports par ruissellement direct et par les égouts ne sont pas actuellement mesurables.

L'étude de l'exutoire à Genève doit être faite avec un prélèvement bimensuel nécessaire pour déterminer avec une bonne précision le bilan de sortie.

Néanmoins il reste encore beaucoup de travaux en chimie : citons la relation avec le cycle biologique des éléments azotés, phosphorés et siliceux dans l'épilimnion ; l'étude approfondie des sulfates et celle du cycle des bicarbonates, carbonates, gaz carbonique dissous.

A partir de ces études il sera alors possible d'effectuer un bilan très précis du Léman permettant d'expliquer les phénomènes géochimiques que nous avons décrits.

Date	21.11 67	16.1 68	19.2 68	10.5 68	16.6 68	9.8 68	10.10 68	26.11 68
SiO ₂	0,70	0,60	0,28	0,91	0,51	0,26	0,79	1,29
Ca ⁺⁺	41,5	46,1	40,2	47,5	45,5	42,5	42,3	44,7
Mg ⁺⁺	7,9	5,1	6,3	4,8	5,8	5,7	4,85	4,5
Na ⁺	2,9	2,6	2,15	2,30	2,33	1,75	1,72	2,06
K ⁺	1,45	1,3	1,4	1,5	1,3	1,4	1,35	1,6
Cl ⁻	3,0	2,6	2,05	2,3	2,65	2,25	2,4	2,95
SO ₄ ⁻	41,4	43,4	45,0	50,6	44,2	46,1	40,8	43,5
HCO ₃ ⁻	96,5	106,0	92,0	106,0	110,5	99,5	100,0	102,5
NO ₃ ⁻	0,8	1,67	0,07	0,33	0,17			0,25
en N								
Conc. totale	196	209	190	216	213	199	194	203
Date	31.1 69	2.4 69	1.5 69	16.6 69	15.10 69	12.11 69	6.1 70	24.3 70
SiO ₂	1,88	1,26	0,27	0,59	0,17	1,81	0,85	1,42
Ca ⁺⁺	46,7	47,1	40,1	44,9	41,8	46,4	44,0	49,0
Mg ⁺⁺	4,8	5,25	5,15	5,25	4,2	6,35	6,35	6,9
Na ⁺	2,63	2,73	2,78	2,93	3,35	2,68	3,1	3,1
K ⁺	1,35	1,4	1,4	1,4	2,0	1,45	1,7	1,65
Cl ⁻	2,25	2,8	2,5	1,2	3,15	2,5	3,6	3,6
SO ₄ ⁻	45,6	48,0	48,6	40,3	42,0	48,0	47,8	51,0
HCO ₃ ⁻	109,0	112,0	94,5	105,5	92,5	114,5	108,5	(118,0)
NO ₃ ⁻	0,40	0,42	0,03	0,10	0,02	0,43	0,28	0,47
en N								
Conc. totale	215	221	195,5	202	189,5	224	216,5	(235)

TABLEAU III₂

ANALYSES CHIMIQUES COMPLETES DU RHONE A LA SORTIE DU LEMAN
(Genève) en mg/l

Remarques : - () Valeurs extrapolées - Les nitrates sont donnés en mg N/l
- Les analyses du 19-2-68 et 1-5-69 sont sans doute faussées par les précipitations du carbonate de calcium avant l'analyse.

	HCO ₃ ⁻			Ca ⁺⁺			SO ₄ ⁻			SiO ₂		
	Valeur	Date	Profond.	Valeur	Date	Profond.	Valeur	Date	Profond.	Valeur	Date	Profond.
CRG 3	74,8	Sept. 68	0	36,4	Sept. 68	0	42,9	Oct. 68	10	0,12	Sept. 68	10
170 m analyses	115,7	Mars 68	170	49,2	Avril 68	170	53,3	Mars 68	170	2,85	Déc. 68	170
CRG 6	80,6	Sept. 68	0	37,3	Sept. 68	0	42,7	Juil. 68	10	0,07	Sept. 68	10
60 m analyses	114,6	Avril 68	0	48,2	Mai 68	0	53,5	Mai 68	60	2,26	Avril 68	60
CRG 9	69,9	Oct. 68	0	37,5	Oct. 68	0	42,3	Rev.	150	0,03	Sept. 68	10
200 m analyses	121,0	Oct. 68	200	52,4	Déc. 68	200	56,4	Juin 68	200	3,69	Mai 68	200
CRG 21	74,9	Sept. 68	0	36,3	Sept. 68	0	43,6	Juil. 68	10	0,10	Oct. 68	0
200 m analyses	119,8	Oct. 68	200	50,9	Oct. 68	200	51,8	Mars 68	150 m	3,63	Oct. 68	200
CRG 22	78,0	Sept. 68	0	37,0	Sept. 68	0	43,2	Juil. 68	10	0,10	Sept. 68	0
200 m analyses	120,3	Déc. 68	200	49,7	Mai 68	200	53,4	Juin 68	200	3,64	Déc. 68	200
CRG 23	75,4	Oct. 68	0	37,3	Sept. 68	0	42,0	Juil. 68	0	0,03	Sept. 68	0
200 m analyses	120,0	Nov. 68	200	51,3	Déc. 68	200	53,4	Juin 68	150	3,63	Déc. 68	200
Léman seul	69,9	Oct. 68	CRG 21	36,3	Sept. 68	CRG 21	42,0	Juil. 68	CRG 23	0,03	Sept. 68	CRG 9,25
Genève	122,2	Nov. 67	0	52,4	Déc. 68	0	56,4	Juin 68	0	4,95	Nov. 68	CRG 10
700 à 750 Analyses			306			200			200			306

TABLEAU III₅

CONCENTRATIONS EN HCO₃⁻, Ca⁺⁺, SO₄⁻ et SILICE DISSOUE. VALEURS EXTRÊMES OBSERVÉES ENTRE FÉVRIER 1968 ET MARS 1970 (en mg/l).
POUR 6 STATIONS RÉGULIÈRES DE PRÉLÈVEMENTS ET POUR LE LÉMAN DANS SON ENSEMBLE, GENÈVE EXCEPTÉ.

	1968												1969					
	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Mars	Mai	Juil.	Sept.	Nov.		
CRG 3	1,36	1,15	1,22	1,11	0,89	0,53	0,95	0,73	1,04	1,37	1,68	2,05	0,73	0,63		0,59	0,97	
4	1,33	1,40	1,46	0,82	0,92	0,59	0,98	0,77	0,99	1,94	1,75	2,18	0,85	0,59		0,33	1,15	
6	1,28	1,28	1,46	1,19	1,00	0,76	1,19	0,98	0,97	1,51	1,70	1,89	0,97	0,64		0,63	1,58	
9	1,33	1,23	0,72	1,04			0,92	0,80	1,02			1,62	2,10	0,55	0,54	0,60	0,50	0,90
SiO ₂ 21	1,28	1,34	2,10	0,95	2,61	0,54	0,87	0,87	0,99	1,41	1,65	2,10	0,90	0,50	0,60	0,70	1,00	
22	1,22	0,66	0,65	0,99	0,91	0,83	0,77	0,96	0,99			1,70	2,00	0,70	0,80	0,40	0,70	0,90
23	1,21	1,21	0,79	1,02	1,01	0,66	0,87	0,84	1,13			1,64	2,00	0,90	0,60	0,70	0,60	1,00
Moyenne	1,28	1,16	1,27	0,97	1,20	0,68	0,93	0,85	1,01			1,68	2,04	0,80	0,61	0,58	0,57	1,07
CRG 3	44,7	46,1	47,4	45,5	45,7	46,1	43,4	40,0	43,0	43,8	44,8	46,1	45,6	46,4		42,0	43,4	
4	45,4	46,2	46,9	46,7	46,3	46,2	44,1	40,0	42,8	44,1	44,9	46,4	45,8	46,3		41,8	44,4	
6	44,9	46,6	47,4	47,9	46,4	46,0	47,3	41,9	42,6	44,2	44,9	46,6	46,5	46,0		42,0	46,0	
9	45,1		45,4	46,9	46,2		43,3	41,3	43,9			46,3	46,5	45,9	141,5	42,0	43,2	
Ca ⁺⁺ 21	45,0	45,3	47,4	46,8	46,2	45,0	43,0	41,1	42,7	44,1		46,2	45,1	46,1	43,1	44,3	44,8	
22	46,1	45,5	45,7	46,5	46,2	43,8	41,6	43,9	43,8			45,3	47,2	44,7	45,4	140,5	42,8	44,0
23	45,8	45,9	45,5	46,9	46,2	43,6	41,8	41,2	43,6			47,0	46,8	44,0	46,0	41,5	42,6	44,0
Moyenne	45,2	45,8	46,5	46,7	46,1	45,0	43,5	41,3	43,2			45,4	46,5	45,2	46,0	41,6	42,5	44,2
CRG 3	108,4	109,5	112,1	108,0	109,0	101,9	97,2	88,0	96,1	101,4	104,8	110,1	107,7	109,0		98,2	105,4	
4	107,8	107,7	107,7	108,1	109,2	103,6	99,4	90,3	98,3	101,4	106,6	110,8	111,0	110,5		96,3	106,8	
6	107,9	110,0	109,5	109,1	110,3	102,1	105,2	97,2	96,6	103,5	106,6	109,9	111,9	108,7		98,5	110,4	
9	106,4		106,2	103,6	109,9		93,7	93,0	101,2			108,3	107,0	108,0	93,2	97,3	103,9	
HCO ₃ ⁻ 21	107,3	109,4	105,0	108,5	110,0	101,0	94,7	93,7	106,0	102,7		110,1	108,6	109,1	97,6	100,8	104,8	
22	106,3	108,4	110,5	110,2	109,6	100,0	93,9	95,5	97,6			110,2	110,3	110,6	106,2	93,9	99,7	103,9
23	106,0	108,2	106,3	105,8	109,4	99,7	91,0	93,6	96,6			106,3	110,6	105,0	107,6	96,1	100,4	104,8
Moyenne	107,1	108,7	107,3	106,9	109,6	101,3	96,4	93,0	97,3			105,8	110,0	110,1	108,1	95,0	98,7	105,7

	1968												1969					
	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Mars	Mai	Juil.	Sept.	Nov.		
CRG 3	5,6	5,5	5,2	6,0	5,8	5,6	6,4	5,4	5,1	5,4	5,1	5,7	5,3	4,7		5,5	6,3	
4	6,2	5,8	5,4	5,8	5,3	5,2	5,7	5,8	5,3	5,4	5,5	5,6	5,5	4,9		5,2	6,4	
6	6,2	5,8	5,4	5,0	5,5	5,0	5,3	5,4	5,3	5,2	5,6	5,6	5,4	5,2		5,4	6,4	
Mg ⁺⁺ 9	6,5		6,4	5,4	5,5		5,2	5,2	5,4		4,8	5,5	5,5	5,3	6,3	5,5	6,3	
21	5,8	5,8	5,3	5,6	5,6	5,8	5,2	5,5	5,1	5,4	5,8	5,7	5,8	5,3	4,3	4,9	6,3	
22	5,5	5,8	6,3	5,3	5,6	5,4	5,5	5,4	4,5		5,4	5,2	5,5	5,2	6,0	5,4	6,3	
23	5,7	5,8	6,5	5,4	5,5	5,7	5,5	5,3	5,1		4,3	5,3	5,6	4,9	6,4	4,6	6,3	
Moyenne	5,9	5,8	5,7	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4	5,1		5,2	5,5	5,5	5,1	5,6	5,2	6,3	
CRG 3	47,8	52,0	48,4	48,4	46,8	45,1	48,0	49,0	45,5	46,8	47,0	49,4	50,1	45,5		47,7	48,9	
4	48,0	48,6	49,2	47,6	45,4	45,8	48,0	49,2	45,0	46,8	47,7	48,8	49,9	45,2		47,1	49,0	
6	47,0	50,4	47,9	48,4	44,9	46,0	47,9	46,4	44,7	46,9	47,7	48,5	51,2	43,8		47,7	49,0	
9	47,1		44,5	48,9	51,2		47,8	47,7	46,0			48,0	49,1	48,9	43,6	46,8	46,6	48,1
SiO ₂ 21	46,9	51,2	49,3	47,8	46,3	46,3	47,6	47,1	45,9	46,7	48,6	49,2	48,8	45,0	46,7	48,2	48,4	
22	49,0	47,5	44,5	49,4	49,9	45,2	48,0	46,1	47,1			50,0	49,0	48,8	44,5	44,8	48,5	48,6
23	49,6	46,1	44,4	48,6	50,1	45,3	48,4	45,6	46,5			49,6	49,5	48,8	43,2	46,0	49,5	48,4
Moyenne	47,9	49,0	46,8	48,4	47,8	45,9	47,9	47,3	45,8			48,3	49,0	49,5	44,4	45,8	47,9	48,6

TABLEAU III₅

CONCENTRATIONS EN HCO₃⁻, Ca⁺⁺, SO₄⁻, SILICE DISSOUE, et Mg⁺⁺
DANS LA COUCHE SUPERFICIELLE (MOYENNE DES VALEURS 0 m, 10 m et 50 m)
EVOLUTION POUR LES POINTS CRG 3, 4, 6, 9, 21, 22, 23 DE FÉVRIER 1968 A NOVEMBRE 1970

Point	S ₂ O ₂			Ca ⁺⁺			Mg ⁺⁺			HCO ₃ ⁻			Mn ⁺		
	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.
6	1,21			45,1			5,4			105,5			2,00		
9	1,40	1,90	2,65	44,9	46,9	48,9	5,6	5,6		105,0	110,8	116,3	1,98	1,93	1,93
21	1,32	1,92	2,70	44,6	47,3	48,5	5,5	5,4	5,4	105,0	110,7	115,1	1,98	1,95	2,08
22	0,99	1,78	2,63	44,7	46,9	48,9	5,4	5,6	5,5	102,6	111,5	116,8	1,97	1,96	1,95
23	1,07	1,82	2,63	44,9	47,1	48,6	5,4	5,4	5,5	102,3	111,4	115,4	1,99	1,95	1,93
Total	1,13	1,85	2,65	44,8	47,0	48,7	5,45	5,5	5,45	103,2	111,0	115,9	2,0	1,95	2,0
3	1,09	2,08		44,7	47,3		5,5	5,5		105,3	111,9		2,0	1,95	
4	1,18	1,85		44,9	47,2		5,6	5,5		105,3	110,5		2,0	2,0	
Point	K ⁺			SO ₄ ⁻⁻			Total des ions			Cl ⁻			NO ₃ ⁻		
	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.	couches sup.	couches moy.	couches inter.
6	1,31			47,1			210			2,58			0,32		
9	1,53	1,39	1,42	47,4	47,6	49,1	208	1219	1229	2,63	2,591	2,56	0,29	0,47	0,49
21	1,51	1,50	1,35	47,6	48,6	49,0	207	1221	1227	2,72	2,71	2,61	0,30	0,48	0,49
22	1,51	1,53	1,45	47,7	48,7	49,1	208	1220	1229	2,40	2,471	2,36	0,28	0,48	0,50
23	1,35	1,35	1,35	47,5	48,5	48,8	207	1220	1227	2,55	2,45	2,61	0,29	0,48	0,49
Total	1,32	1,35	1,37	47,4	48,4	49,0	208	1220	1228	2,58	2,55	2,53	0,29	0,48	0,48
3	1,3	1,3		47,7	48,0		209	1222		2,70	2,76		0,31	0,49	
4	1,25	1,3		47,4	48,2		209	1220		2,85	2,76		0,29	0,47	

TABLEAU III⁶ ANNÉE 1968

MATIERES ANNUELLES PAR POINTS ET PAR COUCHES DES CONCENTRATIONS (mg/l.) DE 9 ELEMENTS ANALYSES COURAMMENT.

- des extrapolations ont été faites pour tenir compte des mois manquants dans le calcul des moyennes annuelles.

- les nitrates sont exprimés en mg. N/l.

- les couches sont les suivantes :

S = couche supérieure 0 - 60 m (0 - 10 - 50)
M = couche moyenne 60 - 180 m (100 - 150 m)
I = couche intermédiaire 180 - 220 m (200 m).

SiO ₂			Ca ⁺⁺			HCO ₃ ⁻			Concentration globale			Na ⁺		
Point	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.
6	1,05		45,1		107,0		213							
9	0,89	1,7	44,0	46,8	102,9	112,3	1117,2		222	1229		2,7	2,7	2,6
21	0,96	2,0	44,7	45,8	105,2	112,9	1115,9		224	1228		2,65	2,65	2,55
22	0,90	1,8	44,1	46,9	103,4	111,8	1117,4		208	1221		2,65	2,65	2,6
23	0,95	1,9	44,1	47,3	104,1	112,6	1117,2		209	1229		2,7	2,65	2,55
Total	0,95	1,85	44,4	47,1	104,5	112,4	1117,1		209	1222,5	1229	2,65	2,65	2,60
K ⁺			SO ₄ ⁻⁻			Cl ⁻			NO ₃ ⁻ en N			Mg ⁺⁺		
Point	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.	sup.	couche mov. inter.
6	1,4		47,5		2,3		0,28							
9	1,45	1,45	47,1	48,1	2,5	2,45	2,4		0,33	0,40	0,42	5,5	5,7	5,8
21	1,4	1,45	47,7	49,0	2,3	2,4	2,2		0,26	0,42	0,41	5,7	5,4	5,4
22	1,45	1,45	47,3	48,3	2,3	2,3	2,2		0,23	0,40	0,40	5,6	5,8	5,8
23	1,4	1,5	47,5	48,5	2,35	2,2	2,1		0,23	0,41	0,42	5,5	5,7	6,0
Total	1,4	1,45	47,4	48,4	2,35	2,55	2,25		0,26	0,41	0,41	5,5	5,65	5,75

TABLEAU III.⁷ ANNEE 1969

MOYENNES ANNUELLES PAR POINTS ET PAR COUCHES DES CONCENTRATIONS (mg/l) POUR LES 9 ELEMENTS ANALYSES COURAMMENT

MOYENNES ANNUELLES PAR POINTS ET PAR COUCHES DES CONCENTRATIONS (mg/l). POUR LES

NEUF ELEMENTS ANALYSES COURAMENT.

Date	6	9			21			22			23		
	couche sup.	couche sup.	couche moy.	couche inter.	couche sup.	couche moy.	couche inter.	couche sup.	couche moy.	couche inter.	couche sup.	couche moy.	couche inter.
Fév.	215	214	215	227	214	221	229	215	220	226	216	218	223
Mars	220	/	/	/	219	220	226	214	216	225	214	216	220
Avril	218	210	215	217	215	219	226	208	215	225	209	214	218
Mai	218	213	222	228	217	222	225	214	221	230	214	221	229
Juin	215	220	222	240	218	218	225	219	223	234	219	225	236
1968 Juil.	206	/	/	/	204	220	220	201	221	226	200	220	226
Août	210	197	220	224	198	220	231	196	224	231	194	224	228
Sept.	197	194	219	229	194	221	226	197	220	229	192	222	225
Oct.	195	203	223	228	195	221	231	199	221	230	199	221	231
Nov.	207	/	/	/	206	221	227	/	/	/	/	/	/
Déc.	209	212	224	233	213	223	231	214	225	235	215	223	234
Moyenne 1968	210	208	219	228	208	221	227	207	220	229	207	220	227
Mars	220	219	222	234	220	222	224	220	223	228	221	222	225
Mai	223	214	223	232	216	223	228	213	223	228	211	222	229
1969 Juil.	211	210	220	228	212	223	230	209	216	224	208	219	223
Août	/	195	219	225	199	223	231	192	219	225	197	226	232
Sept.	201	199	226	232	206	225	226	204	224	237	205	223	233
Nov.	220	209	223	228	211	229	232	211	225	233	211	227	233
Moyenne 1969	213	207	222	229	210	224	228	208	221	229	209	223	229
1970 Mars	217	222	221	221	221	222	231	220	220	225	221	221	227

TABLEAU III₈

CONCENTRATION GLOBALE EN ELEMENTS DISSOUS (mg/l)
 (SiO₂, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻, NO₃⁻)
 PAR POINTS ET PAR COUCHES DE FEVRIER 1968 A MARS 1970

REMARQUES : -des extrapolations ont été faites dans les moyennes pour tenir compte des mois manquants.
 -il n'a pas été tenu compte des gaz dissous.

	Couche supérieure 0 - 60 m 31,0 km ³		Couche moyenne 60 - 180 m 39,2 km ³		Couche intermédiaire 180 - 220 m 8,7 km ³		Couche profonde 220 - 310 m 10,4 km ³		Ensemble du lac Tonnage global Moyenne	
	10 ³ t		10 ³ t		10 ³ t		10 ³ t		10 ³ t	
1968										
Silice	35,3	1,14	74,5	1,90	23,0	2,65	42,6	4,1	159	1,79
Ca ⁺⁺	1 388,8	44,8	1 846	47,1	424	48,7	520	50,0	4 179	47,0
Mg ⁺⁺	170	5,5	215,6	5,5	47,4	5,45	57,2	5,5	490	5,51
Na ⁺	62,0	2,0	76,5	1,95	17,4	2,0	20,8	2,0	177	1,99
K ⁺	40,3	1,30	52,5	1,34	11,9	1,37	14,6	1,4	119	1,35
Cl ⁻	80,6	2,60	101,9	2,60	22,0	2,53	27,0	2,6	231	2,59
SO ₄ ⁻	1 472	47,5	1 900	48,5	426	49,0	515	49,5	4 313	48,5
HCO ₃ ⁻	3 202	103,3	4 359	111,2	1 008	115,9	1 280	123,0	9 849	110,7
NO ₃ ⁻	9,3	0,30	18,8	0,48	4,2	0,48	5,20	0,50	37,5	0,42
en N										
Total 1968	6 460	208,5	8 644	220,5	1 984	228	2 480	238,5	19 568	219,8
1969										
Silice	30,1	0,97	74,5	1,9	23,0	2,65	42,6	4,1	170	1,90
Ca ⁺⁺	1 380	44,5	1 840	47,0	421	48,4	520	50,0	4 160	46,6
Mg ⁺⁺	170,5	5,5	219,5	5,6	50,0	5,75	58,2	5,6	498	5,58
Na ⁺	82,1	2,65	103,9	2,65	22,6	2,60	27,0	2,6	235	2,63
K ⁺	43,4	1,4	56,8	1,45	12,6	1,45	15,1	1,45	128	1,43
Cl ⁻	73,8	2,38	92,1	2,35	19,6	2,25	23,9	2,3	209	2,34
SO ₄ ⁻	1 475	47,6	1 909	48,7	418	48,1	504	48,5	4 306	48,2
HCO ₃ ⁻	3 255	105,0	4 406	112,4	1 019	117,1	1 300	125,0	9 980	111,8
NO ₃ ⁻	8,4	0,27	16,5	0,42	3,6	0,41	4,4	0,42	32,9	0,37
en N										
Total 1969	6 510	210	8 722	222,5	1 992	229,0	2 496	240	19 720	220,8

TABLEAUX III₉ et III₁₀

LEMAN : TENEUR MOYENNE EN ELEMENTS DISSOUS EN 1968 ET 1969

1ère colonne : tonnages partiels et globaux en milliers de tonnes

2ème colonne : concentrations moyennes en mg/l (NO₃⁻ exprimés en azote)

TABLEAU III₁₁ : ANALYSE CHIMIQUE COMPLETE DU LAC LEMAN

Elément	Concentration mg/l	Références
SiO ₂	1,85	Moyenne 1968-1969 (700 analyses)
Ca ⁺⁺	46,8	Centre de Recherches Géodynamiques
Mg ⁺⁺	5,55	"
Na ⁺	2,3	"
K ⁺	1,4	"
Cl ⁻	2,4	"
SO ₄ ^{- -}	48,3	"
HCO ₃ ⁻	111,2	"
Sr ⁺⁺	0,50	1968 (30 analyses)
Fe ⁺⁺	0,002 - 0,070	1968 (200 analyses)
Bore	0,011 - 0,015	1968
Molybdène	0,0015 - 0,002	"
I ⁻	0,0	Ramuz 1957, moyenne (4 analyses)
F ⁻	0,12	"
SH ⁻	0,00	"
Al ⁺⁺⁺	0,00	"
Mn ⁺⁺⁺	0,00	"
P total (en P)	0,030	Commission de Protection du Léman 1968 (130 analyses)
NH ₄ ⁺ (en N)	0,011	"
NO ₂ ⁻ (en N)	0,0011	"
NO ₃ ⁻ (en N)	0,38	"

	Rhône	Dranse	Autres affluents	Total des apports	Genève	Différence (apports) -(sorties)
SiO ₂	16 700	2 600	3 500	22 800	4 900	+ 18 000
Ca ⁺⁺	232 000	53 300	117 000	402 000	330 000	+ 70 000
Mg ⁺⁺	28 000	6 300	14 100	48 400	41 000	+ 7 500
Na ⁺	17 000	1 200	4 400	22 600	16 500	+ 6 000
K ⁺	7 000	900	2 600	10 500	10 500	0
Cl ⁻	17 500	750	10 400	28 650	18 800	+ 19 000
SO ₄ ^{- -}	296 000	43 500	44 000	383 500	335 000	+ 50 000
HCO ₃ ⁻	475 000	144 000	233 000	852 000	770 000	+ 70 000
NO ₃ ⁻ en N	(2 600)	380	1 550	4 500	1 880	+ 2 500
Total	1 090 000	253 000	430 000	1 770 000	1 530 000	+ 240 000
Q annuel m ³ /s	166	23,6	28	218	239	- 21

TABLEAU III₁₃

BILAN GLOBAL (EN TONNES) DU LEMAN POUR 1968 PAR ELEMENTS, EFFECTUE SANS
TENIR COMPTE DE LA VARIATION DE TENEUR DU LAC.

CHAPITRE IV



BILAN SEDIMENTAIRE ET SEDIMENTATION ACTUELLE DU LEMAN

ELLE DU LEMAN
Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptelour@univ-grenoble.fr

QUATRIEME CHAPITRE
=====

BILAN SEDIMENTAIRE ET SEDIMENTATION ACTUELLE DU LEMAN

A - LES APPORTS TERRIGENES.

4.1. - Erosion du bassin du Léman.

4.1.1. - Méthodologie.

L'évaluation de la masse de matériaux détritiques apportés au Léman est fondamentale pour l'étude de la sédimentation actuelle du Léman, de plus elle nous donne des indications très utiles sur les taux d'érosions dans cette partie des Alpes. Néanmoins la mesure et le calcul de ces données sont très délicats et appellent les remarques suivantes.

4.1.1.1. - Mesure de turbidité.

Deux types différents de mesures existent :

1) Mesures discontinues par pesées.

Ces méthodes consistent à prendre un échantillon représentatif de la section, soit par prélèvements multiples, soit par prélèvement intégré. L'échantillon est ensuite filtré, séché et pesé.

2) Mesures en continu et in situ.

Il y a actuellement trois possibilités :

- turbidimètre optique basé sur l'absorption de la lumière

émise par une source d'intensité connue. Cette méthode est surtout appliquée pour les faibles turbidités.

- sonde à transmission nucléaire, absorption ou diffusion du rayonnement gamma émis par une source connue (méthode ponctuelle).

- mesure de la radioactivité naturelle des suspensions par un détecteur placé in situ (méthode d'intégration). La radioactivité mesurée est proportionnelle à la turbidité. Cette méthode, qui nécessite un étalonnage précis, a été particulièrement développée ces dernières années par Martin (Martin, Meybeck, Heuzel, 1970), elle est surtout valable pour les très fortes turbidités allant jusqu'à quelques centaines de g/l.

Dans le cas du Rhône seules des mesures par pesée ont été effectuées à notre connaissance à la station de la Porte de Scex. L'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique Suisse de Berne[§] effectue des prélèvements deux ou trois fois par semaine depuis 1964 sur plusieurs verticales à l'aide d'une bouteille spécialement mise au point par l'Office Fédéral. Les eaux sont filtrées, puis le filtrat est séché à plus de 100°. Cet échantillonnage nous a été très utile pour étudier les lois des transports solides du Rhône.

Actuellement le débit solide sur le fond (traction load) est difficilement mesurable, depuis quelques années les méthodes de traceurs radioactifs ont fait beaucoup progresser cette mesure. Sur le Rhône nous ne disposons que des estimations fournies par le laboratoire d'Hydraulique de l'EPUL à Lausanne.

[§] Je tiens à remercier vivement Mrs Guenin et Kohler de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique de Berne pour leur amabilité et les documents qu'ils ont mis à ma disposition.

4.1.1.2. - Méthodes de calcul.

Encore plus que pour le bilan des éléments dissous, les méthodes de calcul sont très importantes pour déterminer le débit solide : l'expérience montre que sur certaines rivières le débit solide peut atteindre en un ou deux jours de crue, 90 % du débit annuel. La charge en suspension (g/l) est en effet extrêmement variable pour un même bassin versant. Si la variation principale est due au débit, comme pour la charge en solution, on note en plus des variations extrêmement fortes avec la rapidité de montée des eaux, la saison, la place de la crue dans la saison (les premières crues étant les plus turbides). Au sein d'une même crue, il y a en plus un décalage entre la montée et la descente des eaux : le maximum de charge en suspension se situe généralement avant le maximum du débit, vers le deuxième tiers de la montée des eaux ; les eaux de crue seront donc toujours plus chargées que les eaux de décrue. Enfin plus encore que pour les charges en solution, des événements localisés dans un des sous-bassins comme les glissements de terrains, avalanches, rupture de poches glaciaires, auront des effets à l'exutoire très importants sans qu'on puisse toujours analyser ces augmentations de turbidité. La plupart du temps les auteurs ne communiquent pas leurs méthodes de calcul, pour le Rhône les méthodes suivantes ont été employées :

- Forel (1895). Cet auteur avait déjà remarqué la disparité entre les charges en suspension des crues et des décrues. Il dresse donc deux correspondances (Le Léman, tome I, p. 375) entre les débits liquides et la charge en suspensions, en crue et en décrue. Cette distinction est déjà excellente mais malheureusement dans son calcul du bilan pour 1886 Forel prend les débits moyens mensuels, les effets des crues sont donc complètement effacés.

- Serruya (1969). A partir des données de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique, Serruya calcule la moyenne mensuelle des

charges solides puis multiplie ces moyennes par les débits moyens mensuels. Les crues étant pour le Rhône étalées sur quelques jours (voir figure II₆), cette méthode appelle les mêmes remarques que celle de Forel. Mais contrairement au savant vaudois Serruya "n'a jamais constaté aucune relation valable entre la charge solide et le débit instantané" et il lui semble "hasardeux de déterminer la charge solide d'après le débit du fleuve pour des périodes inférieures au mois". Nous verrons plus loin ce qu'il y a lieu de penser d'une telle affirmation.

Nous sommes amenés à faire les remarques suivantes sur les bilans d'éléments en suspension :

1) Méthodes discontinues de turbidimétrie (prélèvement et filtration).

Comme les charges en suspensions C_s (kg/m³) varient en fonction des débits liquides Q_1 (m³/s), il ne faut jamais effectuer des moyennes sur des charges en suspensions mais toujours sur des débits solides Q_s en kg/s, tels que $Q_s = Q_1 \cdot C_s$.

En raison de la variabilité de la fonction $Q_s = f(Q_1)$, il faut déterminer pour chaque rivière un intervalle de temps pendant lequel on considère que la charge en suspension ne sera pas trop variable et auquel on pourra donc attribuer une charge en suspension déterminée. Cet intervalle peut aller de quelques heures (cas de la Dranse) à plusieurs jours (cas des rivières à crue annuelle régulière). Pour le Rhône nous avons pris une journée, cet intervalle est sans doute encore trop grand, la turbidité pouvant en effet encore varier beaucoup. Si l'on dispose d'une mesure (C_{si}) par intervalle de temps choisi, on la considère comme représentative et on peut effectuer le calcul $Q_{si} = Q_{1i} \cdot C_{si}$. La masse des suspensions transportée pendant la période T sera alors d'après

les N mesures :

$$M_s = \frac{T}{N} \sum_{i=1}^{i=N} Q_{si}$$

Si l'on ne dispose pas d'une mesure pour chaque intervalle de temps choisi, deux solutions sont possibles :

- soient n mesures de C_{sj} pendant la période T on calculera le débit solide moyen

$$Q'_s = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{Q_{sj}}{n} \text{ puis la masse totale } M'_s = Q'_s \cdot T$$

Mais par cette méthode on risque de laisser passer entre deux mesures une crue dont l'effet peut être très important. Ceci est facilement vérifiable si on considère les débits liquides. Il faut donc extrapoler entre deux mesures de turbidité.

Nous sommes alors conduits à attribuer à notre intervalle de temps une valeur de turbidité en se basant sur le débit, la position de l'intervalle par rapport au cycle hydrologique, etc..., ce qui est possible si on a pu tirer de la série incomplète de mesures, des lois de variations de la turbidité valables pour l'ensemble de la période T.

Pour notre part nous avons essayé de faire le bilan des apports en suspension du Rhône en 1967. Nous avons d'abord déterminé les lois de variations de la turbidité en fonction du débit de crues pour deux périodes : hautes eaux d'été et basses eaux d'hiver. Puis nous avons affiné ces relations en séparant encore les montées des eaux des décrues. Nous avons alors attribué à chaque journée sans mesure, une valeur de turbidité basée sur les relations précédentes, en tenant compte des valeurs de turbidité mesurées encadrant notre journée.

Nous avons ensuite calculé les débits solides journaliers avec les valeurs de turbidités -mesurées et ainsi extrapolées- et les débits liquides journaliers. Cette méthode est bien sûr encore trop approchée puisqu'on devrait tenir compte des débits instantanés mais il nous semble qu'elle tient déjà compte des paramètres qu'on peut étudier. Comme nous l'avons dit, la turbidité dépend encore d'autres facteurs beaucoup plus difficilement analysables, il faut donc arriver à mesurer la turbidité en continu.

2) Les mesures en continu de la turbidité.

Elles suppriment les inconvénients et les incertitudes des calculs de bilan. Néanmoins, ces méthodes sont souvent incomplètes : les appareils de mesure en continu sont en général fixes, on doit donc par de nombreuses comparaisons avec la méthode par pesée, déterminer le rapport entre la turbidité mesurée par l'appareil et la turbidité réelle de toute la section. Le débit liquide $Q_1(t)$ étant également enregistré, on peut effectuer le calcul du débit solide instantané $Q_s(t) = Q_1(t) \cdot C_s(t)$.

3) Il est important de connaître la densité des alluvions transportées : cette densité varie généralement de 1,5 pour les sédiments humides à 2,7 pour les sédiments secs, il est donc nécessaire de donner la nature des alluvions transportées. On peut ainsi déterminer le volume des apports et par là même arriver à la notion d'érosion spécifique, exprimée en $t/km^2/an$ ou en $mm/1\ 000\ ans$, ce qui est très utile en géomorphologie.

4.1.2. - Apports du Rhône.

Nous avons effectué une étude qualitative d'après les données de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique de Berne. Nous verrons que pour les études quantitatives les résultats obtenus sont faibles, même si on considère les faibles débits de l'année considérée. Nous nous sommes alors basés sur les estimations de l'EPUL (dans Houbolt, 1968).

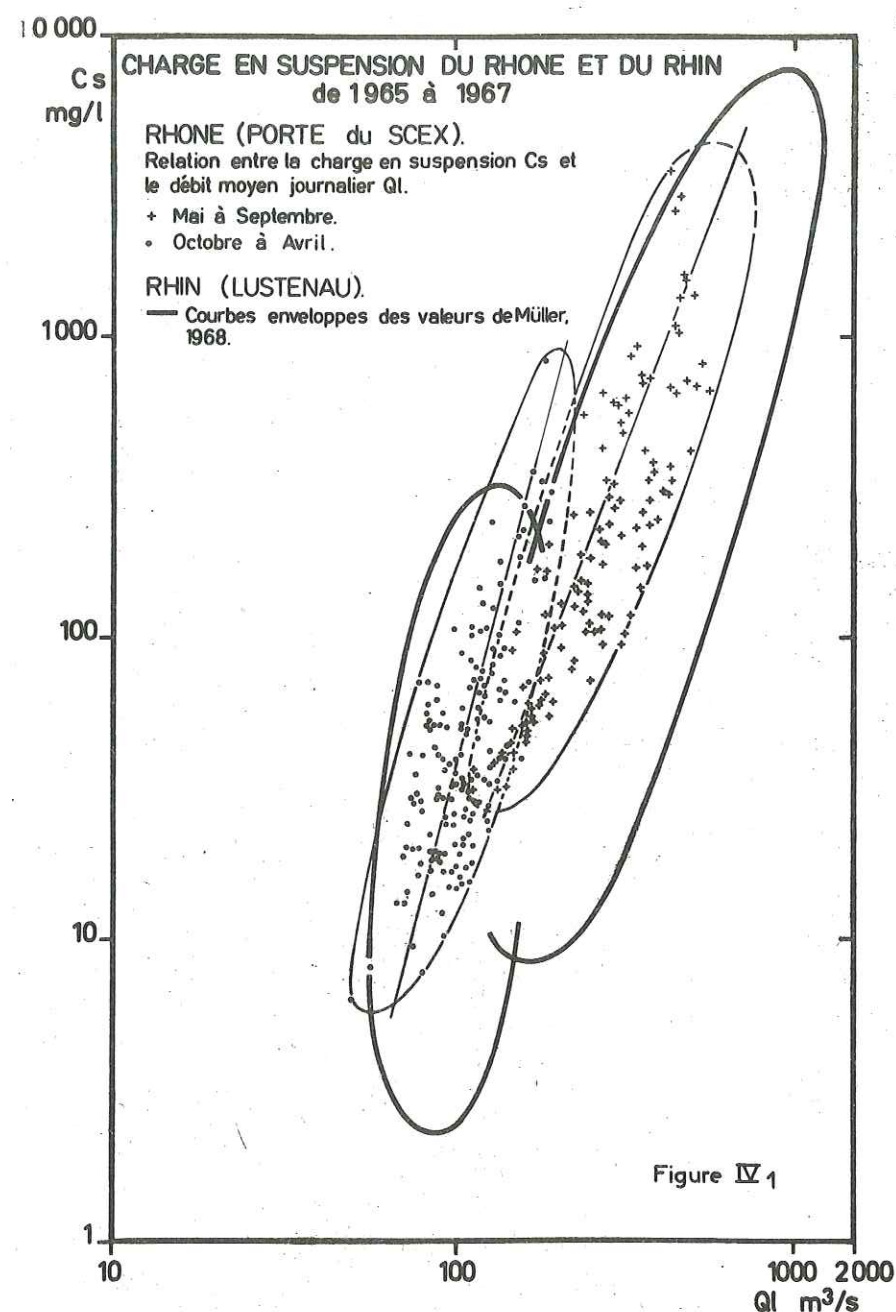
4.1.2.1. - Variations saisonnières et interannuelles.

Nous avons porté sur la figure IV₁ la relation entre la charge en suspension C_s en g/m^3 -généralement mesurée vers midi- et le débit liquide moyen en m^3/s du même jour pour trois ans. La relation est de la forme $C_s = A Q_1^B$, cette loi est générale pour tous les transports en suspension quelque soit le climat (voir Müller, 1968). Si on prend soin de séparer les mesures effectuées en hautes eaux d'été de Mai à Septembre et celles effectuées en basses eaux d'hiver d'Octobre à Avril, deux corrélations différentes sont nettement visibles.

Dans la relation $C_s = A Q_1^B$, le facteur A rend compte de la turbidité générale de la rivière, le facteur B de la variabilité de la turbidité en fonction du débit. Les coefficients numériques A et B dépendront donc de la saison. On peut voir sur la figure IV₁ que *les turbidités sont plus fortes, à débit égal, en hiver qu'en été*. Cela est facilement explicable : la turbidité est surtout liée à des variations de débits, en hiver les débits de l'ordre de $200\ m^3/s$ correspondront aux crues, en été par contre ces débits correspondront aux étiages relatifs sans érosion importante. De plus on note que la turbidité augmente plus vite en fonction du débit en hiver qu'en été : les eaux en hiver ont donc un pouvoir d'érosion plus important, le ruissellement dû aux averses et aux orages d'automne ou à la fonte des neiges de basses altitudes, est sans doute supérieur à celui provoqué en été par la fonte des glaciers.

Si la variation saisonnière est primordiale il y a également des variations interannuelles ; ainsi sur la figure IV₂ on voit bien la différence en hiver comme en été, entre l'année 1965 et l'année 1966. Il y a un décalage des nuages de points, l'année 1966 ayant des turbidités plus faibles, à débit égal que l'année 1965.

Nous pouvons comparer le comportement du Rhône à la Porte du Scex et du Rhin à Lustenau grâce aux travaux de Müller (1968).



La figure IV₁, montre les courbes enveloppes des points représentant $C_s = f(Q_1)$ pour les mêmes années 1965 à 1967. Dans son article Müller n'avait pas séparé les valeurs obtenues en période de basses eaux et de hautes eaux mais sur sa figure il y a très nettement deux corrélations différentes, nous avons matérialisé ces deux nuages de points. Les remarques sur l'érosion suivant la saison sont donc également valables pour le Rhin. Nous voyons que les deux rivières ont pour les deux périodes hydrologiques considérées des relations presque identiques : une fois de plus la similitude des bassins versants, des régimes et des terrains aboutit à des valeurs semblables.

4.1.2.2. - Variation de la charge solide au sein d'une crue.

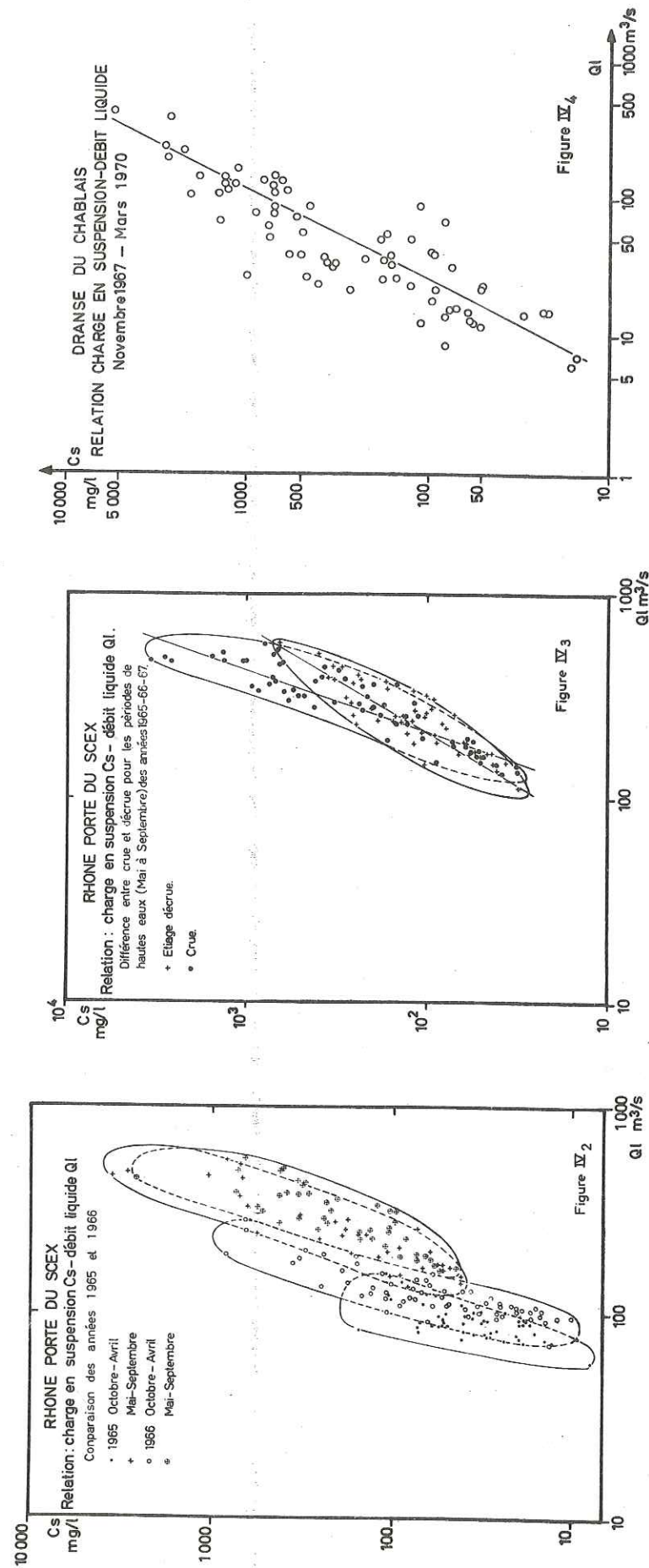
Comme nous l'avons dit, du fait du décalage entre le maximum de charge en suspension et le maximum de débit liquide, les turbidités en montée des eaux sont toujours plus fortes que celles en décrue. Ce phénomène est général et a été remarqué sur de très nombreuses rivières. La figure IV₃ montre bien sur trois années des corrélations nettement différentes $C_s = A Q_1^B$ en crue et en décrue.

4.1.2.3. - Calcul des apports du Rhône en suspensions pour 1967.

Choisissant l'année 1967 nous avons donc procédé comme suit :

- Etablissement des lois de variations $C_s = A Q_1^B$ pour l'année considérée en séparant les périodes de régimes hydrologiques différents et les valeurs obtenues en crue ou en décrue, soit quatre relations basées sur 103 mesures de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique.

- Interpolation des valeurs de C_s pour les jours sans



mesures en tenant compte des lois précédemment établies et des valeurs mesurées de part et d'autre.

- Intégration de la fonction $Q_s(t) = C_s(t, Q_l) \cdot Q_l(t)$ sur toute l'année avec un pas d'intégration d'une journée

$$M_s = \int_0^T Q_s(t) dt$$

On arrive ainsi à un débit solide moyen annuel de $Q_s = 45 \text{ kg/s}$ ce qui correspond à $1,42 \cdot 10^6 \text{ t}$ de matières en suspension transportées au Léman pendant l'année 1967.

Nous avons porté sur le tableau IV₁ les débits liquides de 1967 comparés aux débits liquides interannuels de 1935 à 1967, puis le détail du calcul du débit solide moyen mensuel et de la turbidité par les trois méthodes suivantes :

1) Méthode des moyennes des débits solides.

$$\text{Débit solide moyen mensuel } Q_{sml} = \sum_{i=1}^{i=30} Q_{li} \cdot C_{si} / 30$$

avec C_{si} charge solide (mesurée et extrapolée) du ième jour

Q_{li} débit liquide moyen du ième jour.

$$\text{Masse annuelle de suspension } M_{sal} = T \sum_{j=1}^{j=12} Q_{smj} / 12$$

avec Q_{lmj} débit liquide moyen mensuel du j^{ième} mois

Vla volume liquide annuel

T durée d'une année

Charge solide moyenne mensuelle $C_{smj} = Q_{smj}/Q_{lmj}$

Charge solide moyenne annuelle $C_{sa1} = M_{sa1}/V_{la} = Q_{sa1}/Q_{la}$

2) Moyenne des charges solides (mesurées et interpolées).

$$C_{sm2} = \sum_{i=1}^{i=30} C_{si}/30$$

$$Q_{sm2} = Q_{lm} \cdot C_{sm2}$$

$$M_{sa2} = T \cdot \sum_{j=1}^{j=12} Q_{smj}/12$$

3) Moyenne des charges solides mesurées.

$$C_{sm3} = \sum_{i=1}^{i=n} C_{si}/n \quad \text{avec } n \text{ mesures dans un mois}$$

C_{si} charge solide mesurée du $i^{\text{ième}}$ jour

$$Q_{sm3} = Q_{lm} \cdot C_{sm3}$$

$$M_{sa3} = T \cdot \sum_{j=1}^{j=12} Q_{smj}/12$$

Le tableau IV₁ montre bien les grandes différences obtenues uniquement en changeant les méthodes de calculs. On voit aussi que les façons de calculer la moyenne annuelle de turbidité sont multiples. Comme pour les charges en éléments dissous C_d il convient de différencier les concentrations les plus fréquentes, les moyennes arithmétiques et les moyennes pondérées par les débits, ces dernières intervenant seules dans les bilans. Ainsi à côté des turbidités moyennes annuelles C_{sa} calculées en divisant la masse annuelle de suspension par le volume liquide annuel, on peut ainsi calculer pour chaque méthode les moyennes arithmétiques des charges en suspensions mensuelles. On aura alors :

$$C_{s'a} = C_{sm}/12$$

En raison du type de loi les moyennes arithmétiques sont systématiquement inférieures aux moyennes pondérées :

Masse annuelle transportée en suspension	Concentration moyenne pondérée	Concentration moyenne arithmétique
$M_{sa1} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ t}$	$C_{sa1} = 0,241 \text{ g/l}$	$C_{s'a1} = 0,166 \text{ g/l}$
$M_{sa2} = 1,23 \cdot 10^6 \text{ t}$	$C_{sa2} = 0,202 \text{ g/l}$	$C_{s'a2} = 0,141 \text{ g/l}$
$M_{sa3} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ t}$	$C_{sa3} = 0,130 \text{ g/l}$	$C_{s'a3} = 0,090 \text{ g/l}$

4.1.2.4. - Apports solides du Rhône au Léman.

La valeur obtenue pour 1967 est sans doute très sous-estimée pour deux raisons : d'abord les prélèvements sont effectués vers le milieu de la journée, or ce moment correspond à un minimum journalier de débit en raison du régime glaciaire du Rhône en été ; de plus l'année 1967, bien qu'ayant un débit liquide moyen annuel se rapprochant de très près du module interannuel, n'a eu que très peu de fortes crues par rapport aux années normales (on note juste une crue en Février, responsable d'ailleurs de la forte turbidité relative de ce mois). Il convient donc de se reporter à d'autres estimations. Les études du laboratoire d'Hydraulique de l'EPUL à Lausanne (d'après Houbolt, 1968 et Vernet, 1969) arrivent aux conclusions suivantes :

- années sèches 3 - 4 millions de tonnes/an (année 1949)
- années humides 9 - 10 millions de tonnes/an (année 1945)
- années moyennes 6 - 7 millions de tonnes/an (période 1935 - 1962).

Pour ce qui est des matières apportées au lac par charriage de fond elles sont estimées à 0,1 million de tonnes. Ce très faible apport, de l'ordre de 1 % des apports en suspensions, est analogue aux estimations de Müller pour le Rhin. Ce chiffre peut sembler faible -on estime en général cette proportion à 10 %, et elle peut aller jusqu'à 50 % pour certains torrents alpins- mais il ne faut pas oublier que le Rhin et le Rhône peuvent déposer dans leurs plaines alluviales la plupart de leurs éléments grossiers.

Nous avons reporté sur le tableau IV₂ les érosions spécifiques détritiques calculées d'après les nombreuses données bibliographiques (Collet, Pardé, etc...). Les valeurs sont assez différentes : notre estimation pour 1967 est la plus faible pour les raisons que nous avons évoquées, celle de l'EPUL est la plus élevée. Pour la comparaison des érosions spécifiques nous choisirons cependant cette dernière valeur qui correspond d'ailleurs à l'estimation des apports du Rhône (voir chapitre V) depuis la fin des glaciations wurmiennes : 8 millions de tonnes par an pendant 15 000 ans.

4.1.3. - Apports de la Dranse.

Nous ne disposons malheureusement pas de données aussi complètes sur la Dranse que sur le Rhône. Nous avons porté sur la figure IV₄ les résultats des premières mesures effectuées depuis 1967. Comme pour le Rhône la relation générale $C_s = A Q_1^B$ est bien nette, mais nous ne pouvons pas encore différencier les relations spécifiques pour les crues et décrues, ni effectuer un bilan sur ces premiers résultats. Aussi nous avons évalué la valeur du delta de la Dranse dans le Léman à 1,5 km³ soit 4.10⁹ tonnes en admettant que ce delta s'est construit depuis le dernier retrait des glaciers il y a 15 000 ans on aurait alors un dépôt annuel de 260 000 t/an de graviers, sables et galets. Cet apport représente

à la fois le charriage de fond de la Dranse et une partie des alluvions transportées en suspensions. Compte tenu des alluvions en suspensions plus fines sédimentées plus loin nous pensons que l'apport annuel moyen doit être de 500 000 à 1 million de tonnes par an, ce qui correspondrait à une érosion spécifique à 1 000 à 2 000 t/an/km². *= 1 kg/m². # 2,5 mm d'épaisseur de terre.*

4.1.4. - Effets des crues.

Les crues ont une action déterminante en sédimentologie : dans nos régions les apports de quelques jours de crue peuvent atteindre l'ordre de grandeur des apports annuels. Une étude détaillée de la crue du 22 Septembre 1968 de la Dranse du Chablais a pu être menée tant sur le plan hydrologique, hydrochimique que sédimentologique (voir Hubert et al, 1969). Nous en tirons la comparaison suivante :

Crue du 8 Août 1968	Crue du 22 Septembre 1968
Débit maximum : 150 m ³ /s	420 m ³ /s
Volume d'eau en deux jours : 15.10 ⁶ m ³	45.10 ⁶ m ³
Masse d'éléments dissous en deux jours : 3 500 t	10 000 t
Masse d'éléments en suspension en deux jours : 13 400 t	120 000 t

Si le volume est multiplié par 3 dans la crue du 22 Septembre, les apports en suspension sont multipliés par 9, on mesure encore plus l'importance d'une telle crue lorsqu'on remarque qu'elle a apporté en deux jours de 20 à 30 % des apports annuels.

A limnologist is a zoologist who, during the summertime, studies chemical and botanical aspects of geological problems in readily accessible lakes, 15 m deep, located in the vicinity of universities.

J.R. Vallentyne

Limnology et Oceanography Septembre 1969.

Il en est de même pour le Rhône et le Rhin. Nous avons calculé, d'après les relations $C_s = f(Q_1)$ pour les montées des eaux, les débits solides de quelques crues du Rhône que nous comparons aux crues analogues du Rhin (d'après Müller, 1966). Il est à remarquer de nouveau qu'une forte crue d'hiver a un débit solide bien plus élevé qu'une crue d'été de même débit liquide.

	Rhône		Rhin	
	Débit liquide journalier m ³ /s	Débit solide t/j	Débit liquide journalier m ³ /s	Débit solide t/j
Crue ordinaire d'été	500	75 000	400 à 700	28 000
Très forte crue d'été	850	750 000	1 400 à 1 600	950 000
Crue exceptionnelle d'été			2 500 à 2 700 22 Août 1954	1 950 000
Crue ordinaire d'hiver	130	2 000		
Très forte crue d'hiver	300	250 000		

Les débits solides annuels peuvent ainsi facilement varier de 1 à 10 : pour le Rhin Müller (1966) cite un volume de sédiment transporté de 560 000 m³ en 1949 et de 5 070 000 m³ en 1935. Aussi les mesures de turbidités doivent-elles être poursuivies sur des dizaines d'années pour avoir des valeurs moyennes correctes, nous y reviendrons.

4.1.5. - Comblement du Léman.

Si on considère un apport de 6 à 7.10⁶ t/an pour le Rhône, un apport de 0,5 à 1,0 . 10⁶ t/an pour la Dranse et autant pour le reste des affluents, on arrive à une valeur comprise entre 7 et 9 millions de t/an de matériaux secs. On aura donc un *taux de*

sédimentation annuelle moyenne sur tout le lac de 1,40 g/cm²/an.

Il va sans dire que cette vitesse est très variable et que la grosse majorité des apports détritiques au Léman sert à accroître les deltas du Rhône, de la Dranse et des autres petites rivières. Il est probable qu'au centre du Léman les valeurs des vitesses de sédimentation soient considérablement plus faibles, nous verrons plus loin l'ordre de grandeur de la sédimentation annuelle dans la plaine centrale.

4.1.6. - Comparaison des érosions spécifiques détritiques et chimiques.

4.1.6.1. - Taux d'érosions actuels des Alpes centrales.

Nous avons reporté dans le tableau IV₂ les érosions spécifiques calculées d'après les nombreuses données bibliographiques. Les érosions chimiques sont assez fortes et comprises entre 165 t/km²/an pour le Pô et 535 t/km²/an pour la Bregenzer Ach. Pour l'Arve nous avons augmenté la valeur donnée par Baeff (Forel Le Léman, 1890), qui nous semblait beaucoup trop faible vu les analyses modernes et la valeur de la Dranse : en reprenant les valeurs journalières de Baeff et en appliquant la méthode d'analyse décrite au chapitre II, nous trouvons une concentration globale moyenne de 200 mg/l.

Il est à remarquer que pour le Rhône et le Rhin, l'érosion spécifique chimique varie peu entre l'entrée et la sortie des lacs Léman et de Constance. Il n'en est bien sûr pas de même pour les érosions détritiques : cette différence entre les deux types d'érosion est très importante, elle s'ajoute à celle que nous avons déjà vue pour les crues. (La valeur moyenne de 20 mg/l de turbidité pour le Rhin lacustre, d'après Müller 1966, que nous avons choisie nous semble assez forte comparée au Rhône lacustre pour lequel nous n'avons trouvé que 4,0 mg/l en moyenne sur 3 ans d'après les données

de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique).

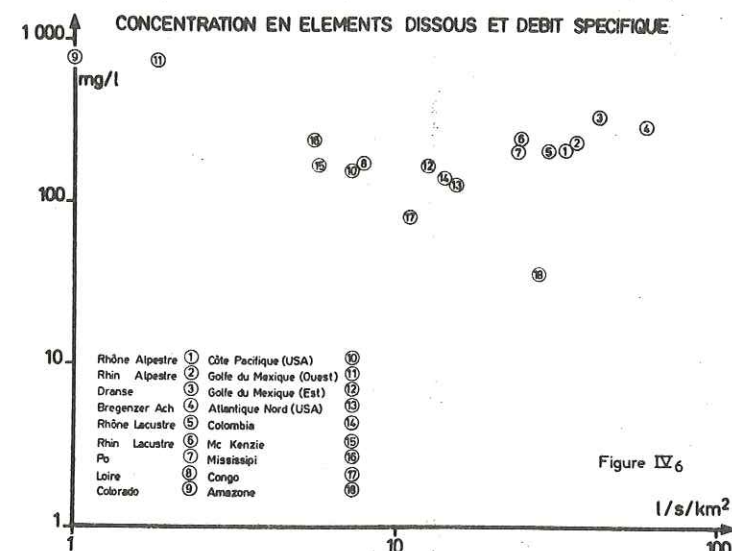
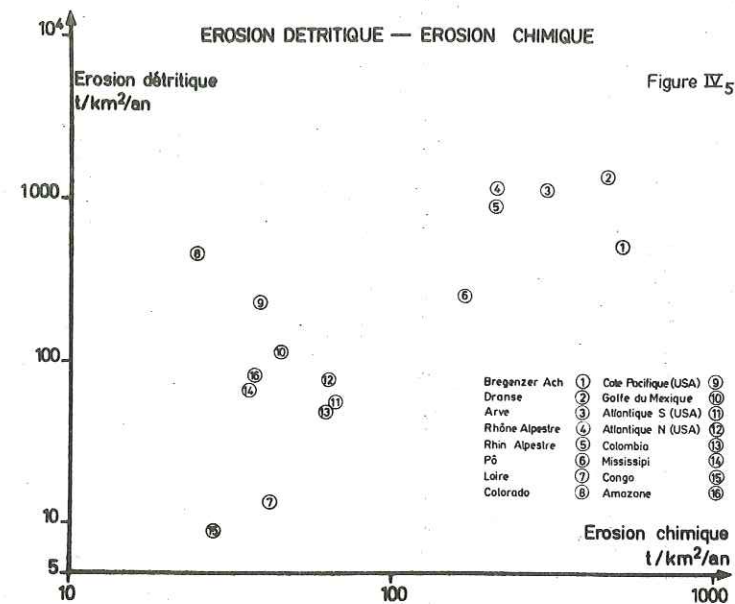
Pour les érosions détritiques nous remarquons que les valeurs du versant nord des Alpes sont en général plus fortes que celles du versant sud, seule la Dora Baltea a des érosions spécifiques analogues, l'Adige est beaucoup plus faible (nous avons bien sûr éliminé de ce tableau les rivières sortant des grands lac italiens).

En considérant les bassins versants de la Dranse du Chablais, du Rhône alpestre, du Rhin alpestre, de la Bregenzer Ach, de l'Arve et de la Dora Baltea, soit un total de 18 000 km² on arrive à une érosion détritique moyenne de 900 t/km²/an. Ces chiffres sont encore très imprécis, surtout pour les érosions détritiques qui sont quelquefois à 50 % près, néanmoins nous pouvons compter sur un ordre de grandeur d'érosion totale de 1 200 t/an compte tenu également des transports sur le fond.

Pour la région centrale alpine l'érosion est alors de 0,45 mm/an ou de 450 mm/1 000 ans. Cette valeur correspond normalement aux érosions des reliefs accusés sous des climats à régime pluvial continental. Ainsi dans son excellent article Young (1969) donne des valeurs allant de 92 à 970 mm/1 000 ans pour les reliefs accusés.

4.1.6.2. - Comparaison des érosions chimiques et détritiques.

A la suite de Judson et Ritter (1964) et Durum, Heidel et Tison (1960), nous avons essayé d'étudier les variations comparées des érosions chimiques et détritiques. Pour les premiers auteurs, qui se basent sur des valeurs pour les Etats-Unis, l'érosion spécifique détritique diminue quand l'érosion spécifique chimique augmente. Nous avons reporté sur la figure IV₅ les valeurs des érosions obtenues pour les Alpes, celles de Judson et Ritter pour les U.S.A.



et quelques autres : rivière Mc Kenzie au Canada (Levinson et al, 1969), l'Amazonie et le Congo (Gibbs, 1967). Il semble bien que les érosions augmentent en même temps : les valeurs du Colorado et de la côte pacifique ont poussé Judson et Ritter à affirmer l'inverse. En fait il semble que pour ces régions, surtout pour le Colorado les érosions détritiques sont tout à fait à part en raison du climat très différent de celui des autres rivières. En général, les érosions semblent d'abord être liées à la taille du bassin-versant puis au climat. Comme la concentration en éléments dissous varie peu au long d'une rivière, l'érosion spécifique chimique tend à diminuer vers l'embouchure; de même l'érosion détritique baisse en raison du relief peu accusé et de la vitesse plus faible des courants.

Pour Durum, Heidel et Tison, la concentration en élément dissous croît si le débit spécifique liquide diminue. Là aussi ces auteurs ont tiré des conclusions pour les Etats-Unis, il ne semble pas que cette loi de variation s'applique aux rivières alpines, comme le montre la figure IV₆ sur laquelle nous avons reporté les couples de valeurs pour 18 rivières du monde entier (d'après les mêmes auteurs que précédemment, voir tableau IV₂).

Ces deux études comparatives montrent bien que notre connaissance des phénomènes d'érosions est encore limitée, malgré des études nombreuses et poussées surtout pour les érosions détritiques (Fournier, 1960). Seule la comparaison d'un grand nombre de rivières à caractères différents (climat, végétation, relief, type de roches, etc...) permettra de déterminer l'importance relative de chaque paramètre.

4.1.6.3. - Valeur des érosions mesurées actuellement.

Nous avons déjà vu que pour une même rivière les érosions chimiques sont relativement constantes (variation du simple au double) tandis que les érosions détritiques sont soumises à des

variations très importantes : augmentation très forte lors des crues ou diminution complète par l'effet de rétention des bassins. Il en résulte que si l'on peut avoir une bonne approximation des érosions chimiques, l'estimation des érosions détritiques est beaucoup plus délicate et nécessite des dizaines d'années de mesures. Néanmoins il est très probable que même pendant ce laps de temps important à l'échelle humaine, des phénomènes courants à l'échelle géologique comme les grands séismes, les crues centenaires et millénaires, les grands glissements de terrains, etc... ne vont pas se produire. *L'action de ces phénomènes exceptionnels est en fait aussi importante pour la dégradation et le transport que la lente érosion annuelle.*

Un exemple de phénomènes exceptionnels nous est donné dans le bassin du Léman : en l'an 563 après Jésus-Christ, il s'est produit dans la vallée du Rhône un formidable éboulement à Tauredunum qui a formé un lac en barrant la vallée. Le barrage s'est rompu brutalement provoquant une "crue" du Léman qui eu des effets catastrophiques. Le souvenir de cet événement rapporté entre autres par Grégoire de Tours s'est conservé pendant tout le moyen-âge (Forel, Le Léman, tome III, p 496). Il est donc difficile de mesurer à notre échelle de temps un tel phénomène qui est à l'échelle géologique, *il semble préférable d'effectuer des estimations indirectes de l'érosion détritique notamment en considérant non pas l'oblitération des reliefs mais le remplissage des bassins* (Tricart, 1962). On intègre ainsi les phénomènes exceptionnels à notre échelle. Un exemple sera donné au chapitre V pour le remplissage de la cuvette lémanique. A une autre échelle citons le remplissage du bassin du Pô au quaternaire : Gabert (1960) y estime en volume des sédiments quaternaires à $40\,000\text{ km}^3$, ce qui correspond à une érosion spécifique de $1\,250\text{ t/km}^2/\text{an}$ en considérant une durée de 500 000 ans pour le quaternaire ou bien $625\text{ t/km}^2/\text{an}$ pour une époque quaternaire d'un million d'années.

4.2. - Nature physique des apports.

4.2.1. - Mode de prélèvement et méthodes d'analyses des sédiments.

Les sédiments du Rhône et de la Dranse ont été prélevés à la main sur les berges. Les eaux turbides ont été prises généralement en bidons de 30 l, quelquefois la faible turbidité de la rivière nous a conduit à prendre plus de 200 litres. Les prises de suspensions ont essentiellement servi aux analyses chimiques, aucune détermination des caractéristiques physiques n'étant possible sur d'aussi faibles quantités (quelques grammes le plus souvent).

Sur les sédiments ont été réalisés systématiquement les séparations de la fraction fine de la fraction grossière par tamisage sur tamis de 40 microns et quand il y avait lieu des granulométries de fraction grossière, non attaquée à l'acide sur colonne de tamis agités par un système ROTAP pendant 20 minutes. Les calcimétries des fractions fines ont été faites au calcimètre Bernard dont la précision absolue moyenne est de 0,5 % de CaCO_3 . Pour la fraction grossière le pourcentage de carbonate a été déterminé par différence de pesée après attaque à l'acide chlorhydrique. Les teneurs en eau sont données par rapport au poids de la vase sèche. Les densités ont été réalisées au picnomètre.

4.2.2. - Les apports du Rhône.

Granulométrie.

De nombreuses déterminations ont été réalisées à l'Ecole Polytechnique de Lausanne, sur la base de ces analyses Houbolt et Jonker (1968) et Vernet (1969) citent les résultats suivants :

LEMAN. FRACTION GROSSIERE DES SEDIMENTS

Courbes cumulées types

--- Rhône 6-8-68
 --- LZ 8 111-114
 --- LZ 7 36-39
 --- LB 28 F
 --- LB 15 F
 --- LB 17 S
 --- LB 2 F

Enveloppes des courbes cumulées

--- LZ 4
 --- LZ 7
 --- LZ 8
 --- Canyon actuel (sauf LB 2 F)
 --- Berge du Rhône

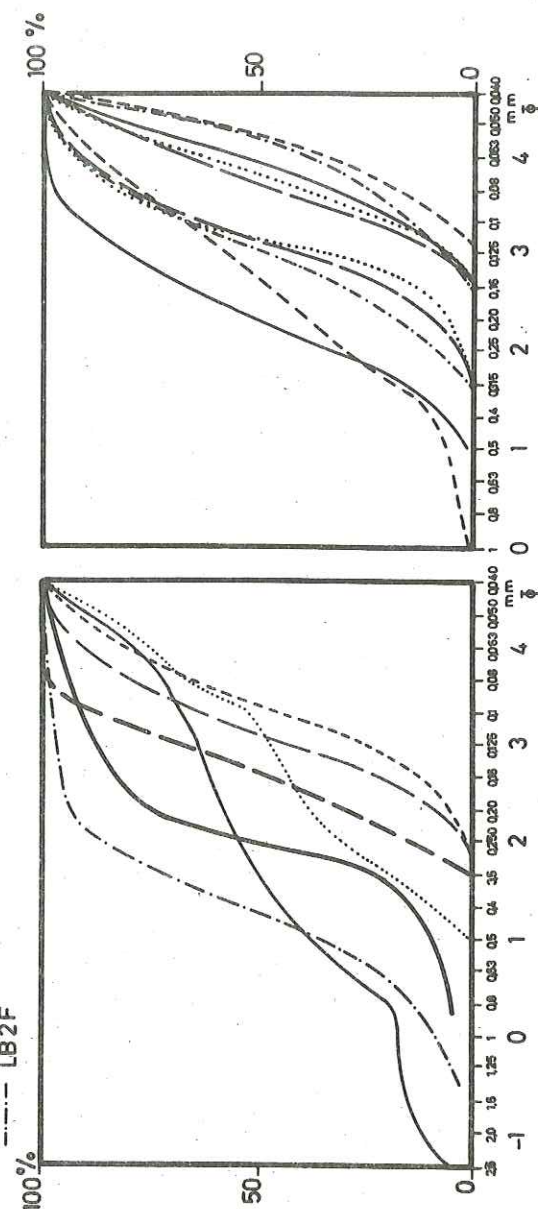


Figure IV 7

Houbolt - Jonker

> 250 μ 35 %
 60-250 μ 20-85 %
 20-60 μ 15-80 %
 < 2 μ absent

Vernet

sables grossiers maximum de 35 %
 sable fin 20-85 %
 limon 18-80 %
 argile 0- 5 %

Il ressort de ces résultats que le Rhône charrie très peu d'argiles et de sables grossiers, la majeure partie des apports est constituée de sables fins et de sablons (100 μ à 20 μ) ou par des silts (63 μ - 4 μ). Nos résultats (tableau IV₃ en annexe) confirment ces données, la fraction grossière (> 40 μ) varie de 47 % à 92 % et la médiane des courbes cumulées de 76 μ à 115 μ , le sédiment grossier est toujours bien classé.

Nous donnons sur la figure IV₇ une courbe cumulée typique de la fraction grossière ainsi que l'enveloppe d'une dizaine de courbes cumulées. La granulométrie de la fraction fine n'a pas été réalisée, citons toutefois une détermination réalisée avec un appareil Coultronics (compteur Coulter) sur le prélèvement du 16 Octobre 1968, de très faible turbidité, recueilli sur filtre : la médiane est de 6 μ .

Densités et calcimétries.

Les résultats sont portés dans le tableau IV₃. Vu le mode de prélèvement aucune mesure de densité humide n'a été réalisée, la densité sèche est de 2,55 à 2,7. La teneur en CaCO₃ varie de 16 à 29% pour la fraction fine et de 15 à 34 % pour la fraction grossière sans qu'il soit possible de mettre en évidence des variations saisonnières.

Nature minéralogique des apports.

Outre les éléments légers très abondants quartz, micas,

feldspaths, on trouve parmi les minéraux lourds surtout de l'épidote, de l'amphibole puis le grenat, zircon, et dans une moindre mesure apatite, glaucophane, etc... Ces déterminations font partie d'une étude plus générale de S. Duplaix du Laboratoire de Géologie Dynamique, en cours depuis plusieurs années avec le C.R.G. de Thonon. Pour ce qui est de la fraction argileuse Vernet (1969) a analysé les échantillons recueillis par l'EPUL et donne la composition suivante (fraction < 7 μ).

illite	40 à 50 %
chlorite	20 à 30 %
kaolinite	20 à 30 %

La présence d'illite et de chlorite est bien confirmée par une analyse effectuée par diffractométrie, A.T.D. et par diagramme de Debye-Scherrer au laboratoire d'analyse des argiles (B. Siffert) de l'E.S.C.M. de Mulhouse, par contre la kaolinite n'avait pas été détectée en aussi grande quantité.

4.2.3. - Dranse.

La détermination de la qualité des apports de la Dranse est beaucoup plus délicate en raison de l'hétérogénéité très grande de ceux-ci allant des blocs jusqu'aux argiles. Le prélèvement de sédiment est donc délicat et les résultats correspondant ne peuvent être qu'indicatifs. Les galets sont bien sûr essentiellement calcaires (calcaires compacts, dolomitiques, bréchiques, etc...) mais la destruction des dépôts fluvio-glaciaires et glaciaires libère également du matériel cristallin. Voici un exemple d'analyse de sédiment de la Dranse :

galets (> 2 cm)	56 %
graviers (2 mm-2 cm)	25 %
sables et sablons	19 %

Sur la fraction inférieure à 2 mm, 63 % des grains sont supérieurs à 40 μ avec une médiane de 0,63 mm. Si on prend donc le sédiment total il y a au moins 4 ou 5 modes correspondant à des origines et des transports différents de matériaux. A cet égard les apports du Rhône sont beaucoup plus homogènes. Dans la fraction fine (< 40 μ) la teneur en CaCO_3 varie entre 35 et 40 %. Cette valeur qui est le double de celle du Rhône rend bien compte de la différence des bassins versants, nous verrons plus loin son influence sur la sédimentation du lac.

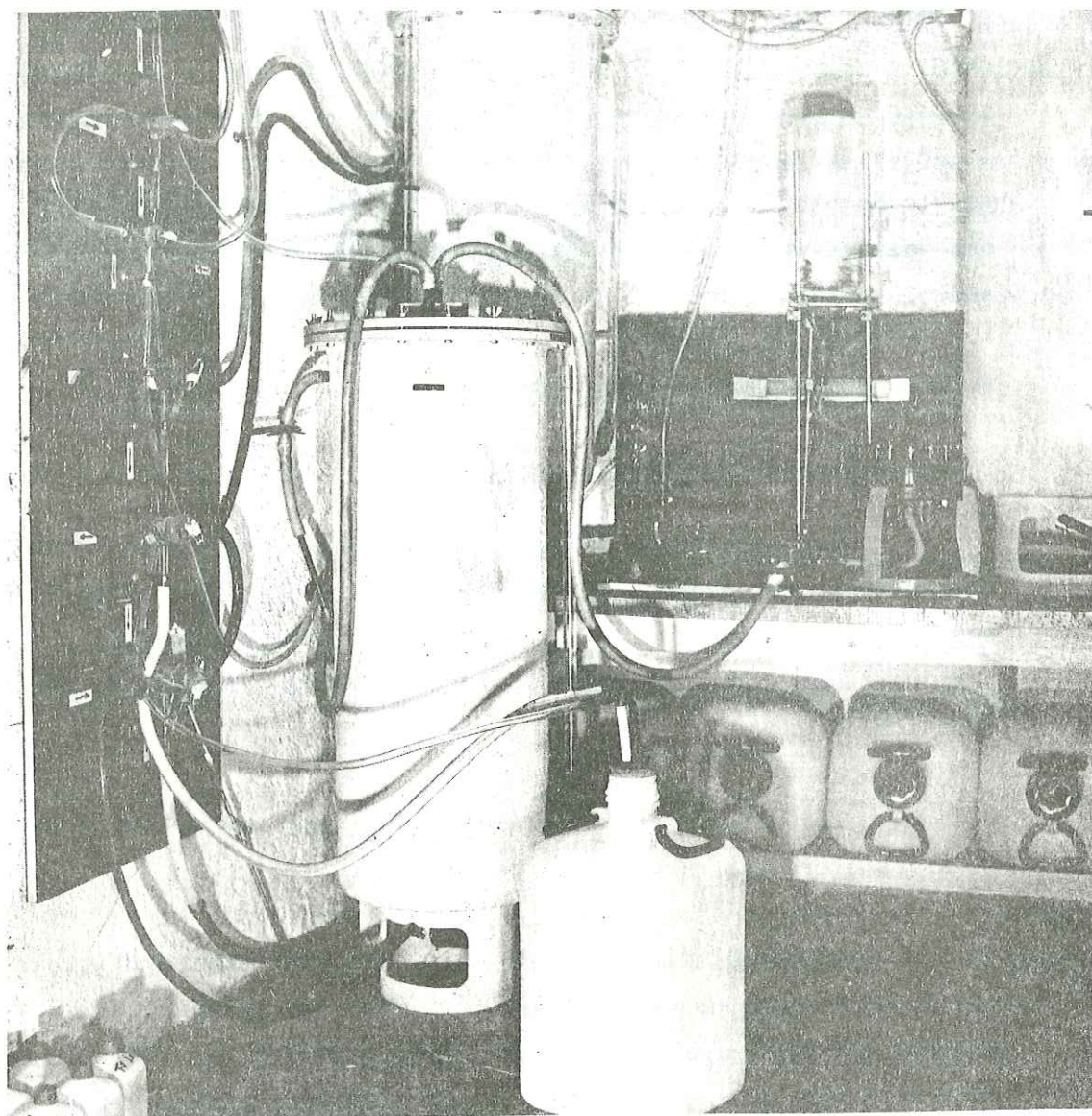
4.3. - Nature chimique des apports.

4.3.1. - Filtration des eaux.

Les apports du Rhône étant essentiellement sous forme de suspensions nous avons été amenés à faire les analyses chimiques sur celles-ci. Pour avoir les quantités nécessaires il nous a fallu concevoir une installation de filtration pouvant traiter de grandes quantités d'eau.

Le principe est de créer un vide sous le filtre, l'eau passe alors à travers celui-ci par dépression.

L'installation (figures IV₈ et IV₉) se compose de trois cuves d'une contenance de 100 l chacune. Dans les deux premières sont placées les eaux chargées, la troisième constitue le collecteur des eaux filtrées. Les eaux peuvent passer sur deux filtres montés en parallèles, on peut donc changer un filtre sans arrêter la filtration. Le vide est fait dans le collecteur au moyen d'une pompe Beaudoin protégée par une série de pièges à eau. En général nous avons filtré les eaux deux fois : une première fois sur filtre en papier "sans cendre", puis sur filtre Millipore HAWP de 0,45 μ qui retient plus de 95 % des suspensions. Pour remplir les cuves avec les eaux brutes ou filtrées une première fois, nous avons imaginé de chasser



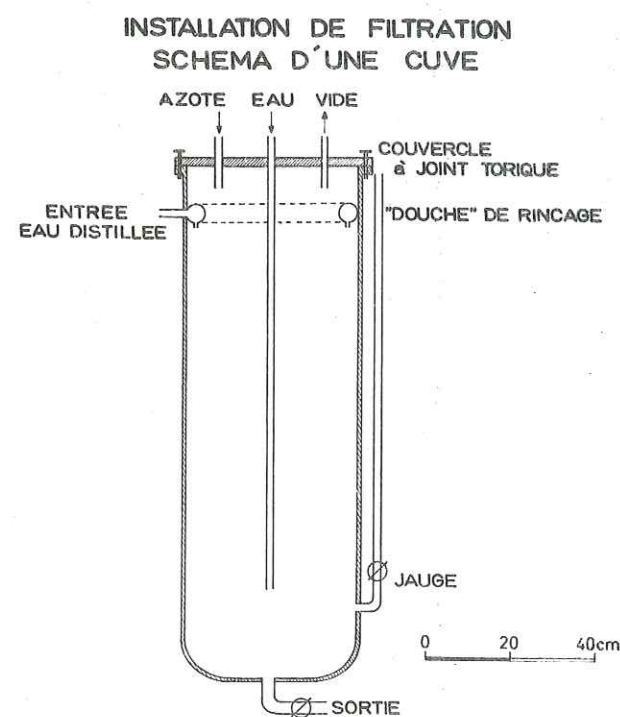
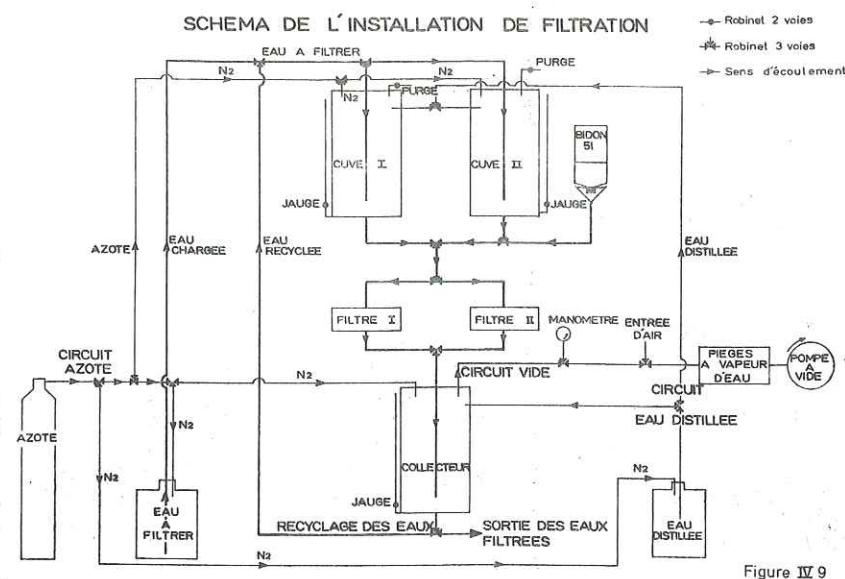
Installation de filtration

figure IV₈

l'eau par une surpression d'un gaz inerte : l'azote. Il y a donc en parallèle au circuit général des eaux à filtrer un circuit d'azote. On place sur le bidon de 30 l un bouchon de caoutchouc avec une entrée d'azote et une sortie pour l'eau, la surpression dans le bidon chasse l'eau dans le circuit et un ensemble de robinets permet de la répartir dans la cuve intéressée. De même la vidange des eaux filtrées du collecteur est également effectuée sans manutention par une surpression d'azote.

Il était nécessaire de maintenir l'installation à l'abri des poussières : une fois que le filtre est mis sur son support l'ensemble est hermétiquement clos. De plus nous avons aménagé à l'intérieur de chaque cuve une douche permettant à de l'eau distillée de ruisseler le long des parois et de rincer la cuve après chaque filtration. Aux deux premiers circuits -eaux brutes et azote- s'ajoute donc un troisième, celui de l'eau distillée. L'eau distillée est également chassée dans l'installation par de l'azote. Nous présentons sur la figure IV₁₀ une coupe d'une cuve montrant les diverses entrées et sorties. Une jauge a été aménagée sur le côté. L'ensemble de la cuve est en fibre de verre ; le couvercle en PVC, rendu parfaitement étanche par un point torrique, est vissé sur la cuve. Enfin il est apparu utile de filtrer des petites quantités de 5 l, nous avons donc aménagé sur le côté un "court-circuit", le bidon est renversé sur un entonnoir placé directement avant les filtres.

La photo de la figure IV₈ permet de se rendre compte de l'allure générale de l'installation. Du mois de Février 1968 à Juin 1970 environ 7 000 l de toutes provenances (Rhône, Dranse, mais aussi Congo, Mekong, Rhin, Meuse, etc...) ont été filtrés. Si l'installation ne nous a donné que des satisfactions plusieurs remarques peuvent cependant être formulées. Tout d'abord la forme intérieure des cuves devrait être en entonnoir afin qu'il y ait un minimum de dépôt au fond de celles-ci. Le système de douche intérieure serait



à perfectionner : la pression doit être plus forte. Enfin on peut poser le problème de la filtration par surpression ou dépression, la surpression nécessite des cuves et des tuyaux beaucoup plus résistants (nous avons d'ailleurs fait exploser une de nos cuves à cause d'une surpression), mais il est possible que le rendement soit meilleur.

4.3.2. - Méthodes d'analyses.

Comme les analyses chimiques des eaux, les analyses de suspensions et de sédiments ont été réalisées au laboratoire de chimie du C.R.G. par P. Blanc, ingénieur et A. Noir, technicienne. Les filtres contenant les suspensions sont pesés à 105°C puis calcinés à 600°C, et enfin analysés. La part des éléments apportés par les filtres eux-mêmes est très faible. Les sédiments sont aussi calcinés à 600°C, la différence entre le sédiment frais et le sédiment calciné à 600°C correspond à la matière organique, les carbonates n'étant pas encore dissociés. Les éléments suivants ont été dosés :

SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 (Fer total), MnO , Na_2O , K_2O , TiO_2 et P_2O_5 .

Après broyage et homogénéisation 100 mg sont prélevés et fondus avec 250 mg de carbonate de lithium et 250 mg d'acide borique. Le produit de fusion est repris par 5 ml 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_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO - CaO - MgO - Na_2O - K_2O .

Le titane et le phosphore sont dosés par colorimétrie : le titane par la méthode de l'eau oxygénée, et le phosphore au molybdate avec réduction du complexe jaune par l'acide ascorbique.

Enfin la perte au feu à 1 000° permet, par différence avec la perte à 600°C, de déterminer la teneur du sédiment en carbonates.

4.3.3. - Analyse chimique des apports du Rhône et de la Dranse.

Il convient tout d'abord de faire les remarques suivantes :

1) Le milieu des suspensions n'est pas un milieu bien mélangé, au contraire de l'eau les analyses chimiques pourront donc varier entre deux prélèvements consécutifs.

2) La composition chimique de l'apport d'une rivière est essentiellement fonction de la composition minéralogique. Or cette composition varie déjà pour un même prélèvement entre les différentes fractions granulométriques.

3) Même pour une espèce minérale donnée on s'est aperçu récemment que la composition chimique -surtout pour les éléments traces- était fonction du diamètre des particules.

Il ressort de ces considérations qu'une analyse de suspension ou de sédiment de rivières est beaucoup moins significative qu'une analyse d'eau. Nous considérons donc essentiellement les moyennes des analyses par éléments ainsi que les valeurs extrêmes portées sur le tableau IV₄.

Les suspensions du Rhône et de la Dranse sont essentiellement des aluminosilicates, ainsi qu'en témoignent les fortes valeurs de SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ et le rapport Al/Fe. Les deux rivières ont donc des caractères principaux identiques néanmoins la Dranse est nettement plus calcaire puisque le total de CaO plus perte au feu entre 600 et 1 000°C est de 35 % (ce qui confirme la valeur obtenue par des analyses classiques pour la fraction fine du sédiment déposé)

contre 15 % au Rhône. Remarquons que ces valeurs correspondent à des échantillons sans matière organique. Pour les comparer de façon absolue aux analyses de sédiments il faut les majorer de quelques pour cents. Les autres éléments sont en proportion équivalentes pour les deux rivières puisque les rapports entre les éléments sont les mêmes :

$$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,5 \text{ pour le Rhône et } 3,5 \text{ pour la Dranse}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,45 \text{ pour le Rhône et } 2,95 \text{ pour la Dranse}$$

La différence la plus importante entre les deux rivières s'observe pour le sodium.

Il est également intéressant d'étudier la dispersion des valeurs pour chaque élément. Pour le Rhône les plus constants sont dans l'ordre: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃, MnO, Na₂O, MgO, P₂O₅ et c'est CaO qui varie le plus (de 1 à 5). Pour la Dranse les éléments constants sont dans l'ordre : TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, MnO, Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O et P₂O₅. Les quatre éléments Ti, Si, Al et K sont donc remarquablement constants dans les deux rivières et leurs concentrations varient moins que du simple au double d'un prélèvement à un autre.

Nous ne traiterons pas l'analyse des éléments traces ici, à titre indicatif nous donnons les valeurs moyennes de quelques analyses effectuées sur les suspensions au laboratoire de la S.N.P.A. à Pau par Kulbicky et à l'E.S.C.M. de Mulhouse par Siffert (analyses en ppm).

	B	V	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	Co	Sr	Ba	Ga	Li	Cs
Rhône	100	130	250	800	200	350	600	60	200	800	35	25	420
Dranse	200	140	150	700	800	250	150	60	400	300	15	/	/

Ces valeurs ne sont qu'indicatives et représentent uniquement un ordre de grandeur (il y a souvent des valeurs 10 fois plus fortes que les autres, les causes en sont multiples, citons notamment la pollution des rivières). L'interprétation est donc encore plus délicate que celle des éléments principaux.

4.4. - *Bilan des apports chimiques en suspensions au Léman.*

Nous avons d'abord cherché à mettre en évidence des variations saisonnières ou en fonction du débit comme nous l'avions fait pour les analyses d'eaux. Malheureusement vu la plus grande variabilité des suspensions un très grand nombre d'analyses serait nécessaire pour déterminer des lois de variations. Il semble ainsi d'après les analyses sur les crues de la Dranse que la turbidité aurait une influence assez grande et que cette relation composition chimique-turbidités serait en plus spécifique de chaque épisode hydrologique (nous avons noté ce phénomène pour les éléments dissous mais il restait secondaire par rapport à la variation principale, due au débit).

Il en résulte que pour l'établissement du bilan des apports en suspensions au Léman, nous avons pris les valeurs moyennes des analyses. Pour les affluents mineurs non étudiés nous avons pris des compositions chimiques analogues à celles de la Dranse.

TABLEAU IV₅ : APPORTS MOYENS ANNUELS EN SUSPENSION

DES ELEMENTS MAJEURS AU LEMAN

(en milliers de tonnes)

sur la base de $6 \cdot 10^6$ t/an de suspensions minérales pour le Rhône

$0,5 \cdot 10^6$ t/an de suspensions minérales pour la Dranse

$0,5 \cdot 10^6$ t/an de suspensions minérales pour l'ensemble des autres rivières.

	Rhône	Dranse	Autres rivières	Total
SiO ₂	13 150	210	210	3 550
Al ₂ O ₃	880	59	59	1 000
MnO	7	0,55	0,55	8
Fe ₂ O ₃	370	20	20	410
K ₂ O	200	12,5	12,5	225
Na ₂ O	110	2,9	2,9	115
CaO	430	95	95	620
MgO	320	17,5	17,5	355
TiO ₂	43	2,8	2,8	49
P ₂ O ₅	16,5	1,1	1,1	19
CO ₂	460	84	84	630

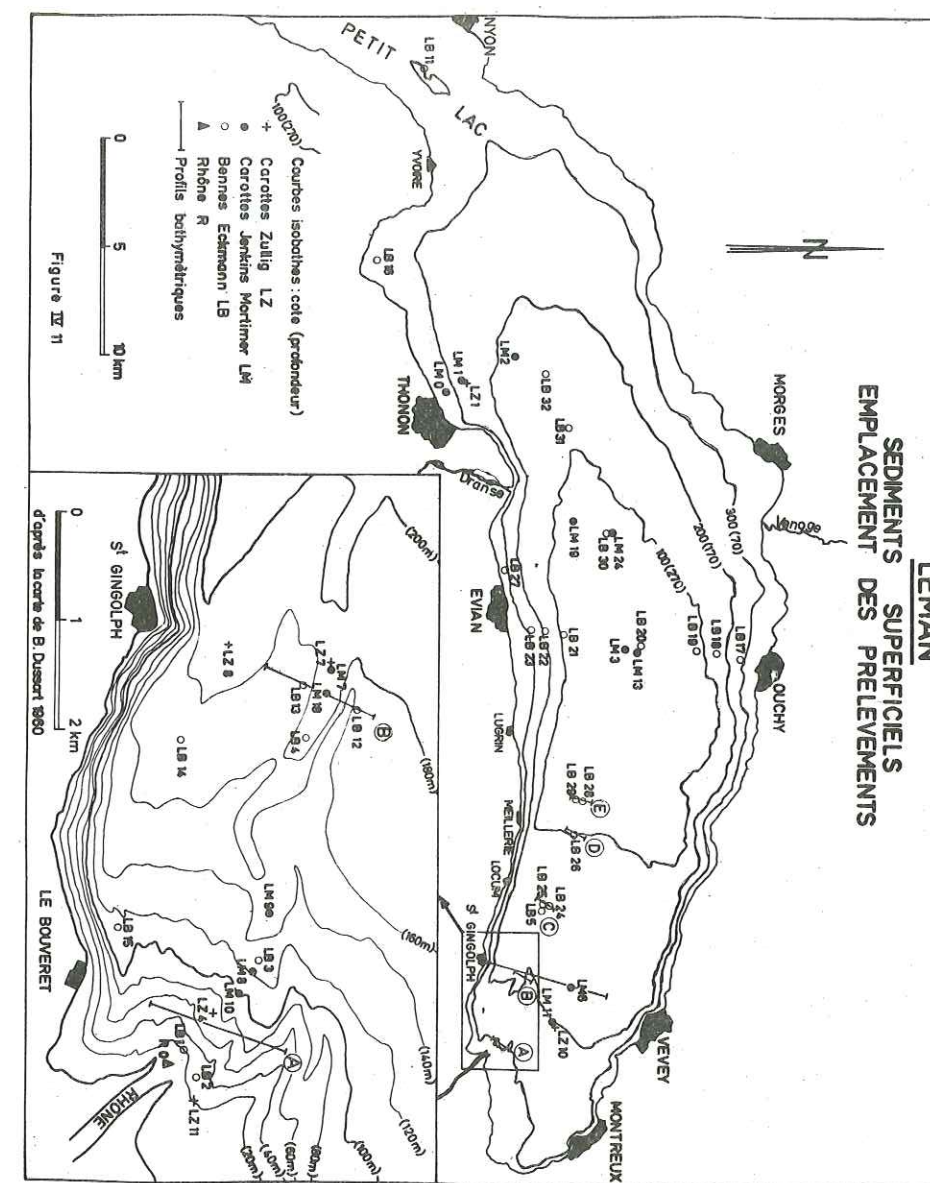
B - LES DEPOTS RECENTS DU LEMAN.

4.5. - Etudes antérieures sur les sédiments du Léman.

La première étude sérieuse a bien sûr été réalisée par Forel dans sa monographie sur le Léman (1895). Depuis un grand nombre de chercheurs ont étudié les sédiments du Léman. Entre les deux guerres citons les nombreux travaux de l'Université de Genève : Collet (1925), Parejas (1929), Romieux (1930), Joukovski et Buffle (1938). Ces travaux ont essentiellement porté sur le Petit Lac, mais les études de Romieux sur les carbonates, et de Parejas sur les varves intéressent tout le lac. Depuis une vingtaine d'années peu de travaux ont été réalisés en dehors de ceux menés au C.R.G. par C. Serruya (1969), J. Sauvage (1969), C. Vergnaud-Grazzini (Serruya-Vergnaud -Grazzini, 1967) qui ont porté sur la diagénèse, l'analyse palynologique et micropaléontologique. Enfin les chercheurs de la compagnie Shell ont effectué une campagne de carottage complète dans le Haut-Lac doublée de prospection sismique (Houbolt et Jonker, 1968). Le Léman est donc déjà bien connu et on peut estimer le nombre de carottes réalisées à plusieurs centaines. Néanmoins beaucoup de points restent encore à préciser : la composition chimique générale des vases n'a été étudiée que très partiellement (Zender 1908, Monod 1956), de même que l'étude géochimique du type de sédimentation, ce sont ces points que nous avons essayé de développer. Pour cela après avoir caractérisé les apports des rivières nous nous sommes intéressés principalement aux sédiments superficiels.

4.6. - Modes de prélèvements.

Nous avons utilisé trois types d'appareils : la benne Eckman-Birge de 20 cm X 20 cm d'ouverture qui perturbe peu le sédiment, le carottier Jenkins-Mortimer dont la pénétration dans le sédiment est presque parfaite, et enfin le carottier à mouton Züllig (Ø 36 mm). Ce dernier de par son mode d'enfoncement peut produire



des tassements dans le sédiment. Comme les prélèvements d'eau, les prises de sédiments ont été réalisées par G. Olivier, technicien, à bord du bateau du C.R.G., le Moïse, spécialement équipé pour la recherche sur les lacs. Les prélèvements dont nous parlerons ici sont localisés sur la figure IV₁₁. Nous nous sommes repérés par alignements et surtout à l'écho-sondeur Sadir-Carpentier, en particulier pour la région du canyon du Rhône, où nous avons pourtant bénéficié de la carte établie par Dussard (1961) nettement plus précise que celle de Delebecque-Hornlimann établie à la sonde. Dans la plupart des cas nous avons pu caractériser dans les bennes et le carottier Mortimer une partie supérieure et une partie inférieure.

4.7. - Etude sédimentologique du Haut-Lac.

4.7.1. - Morphologie du Haut-Lac.

C'est la portion du lac la plus intéressante au point de vue de la sédimentation. En effet plusieurs types de sédimentation coexistent et se superposent : sédimentation détritique fine provenant des apports du Rhône, sédimentation biochimique, sédimentation détritique grossière canalisée par le canyon du Rhône.

Le Haut-Lac est caractérisé par le delta sous lacustre du Rhône échancré par de nombreux ravins sous-lacustres ou canyons plus ou moins comblés. Le principal canyon actuel a été découvert en 1885 par Hörnlimann qui venait d'en mettre en évidence un semblable dans le lac de Constance. Le rôle du canyon a été pressenti par Forel mais c'est Kuenen (1950, p. 510) qui le premier vit la possibilité de courants de turbidité passant dans le canyon.

Le canyon débute près de l'embouchure du Rhône (figure IV₁₁) avec une assez forte pente (8 % sur 2 km) qui diminue progressivement (1 % sur 10 km) , il aboutit dans une vaste cuvette plate à 309 m de profondeur ("plaine centrale" de Forel). La dénivellation entre les bords et le fond du canyon est de 30 m au maximum, la largeur est de

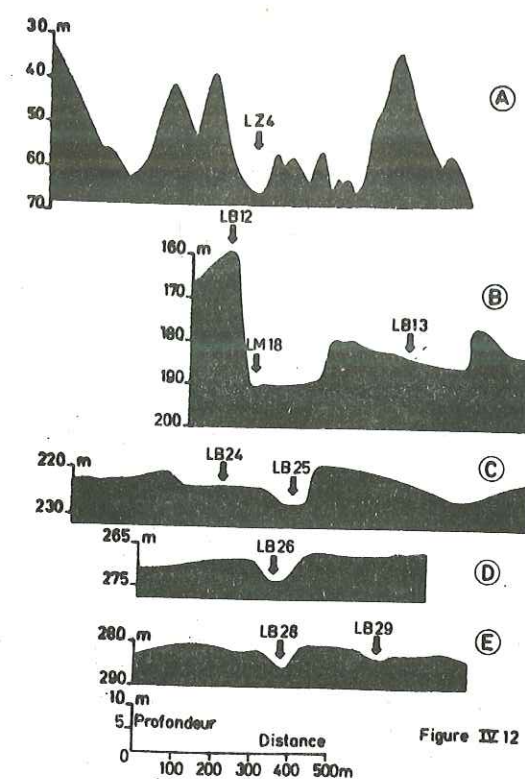


Figure IX 12
PROFILS TRANSVERSES DU CANYON DU RHONE

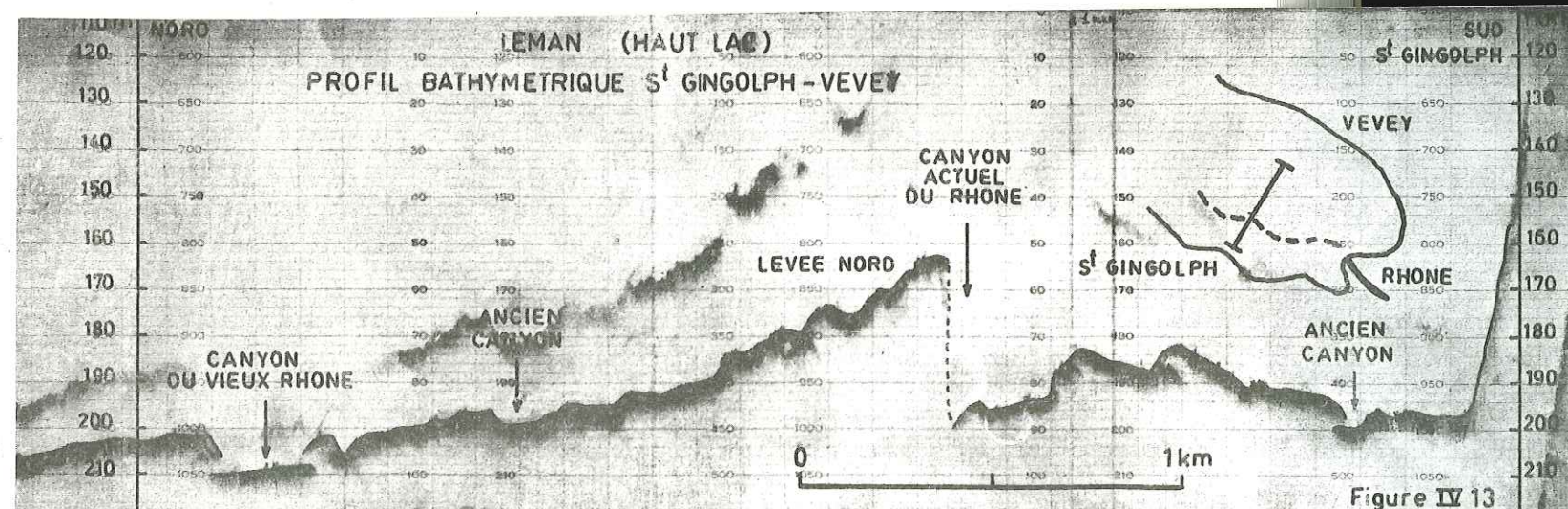


Figure IV 13

250 m, les levées du canyon sont souvent asymétriques. Cette morphologie générale est très analogue à celle décrite pour les formes de relief océanique (Gougenheim 1970) et, quoiqu'à l'échelle océanique le canyon du Rhône devrait plutôt s'appeler "ravine", il semble bien que nous pouvons lui laisser son nom vu le rôle qu'il a à l'échelle du Léman. Il a toutes les caractéristiques des canyons sous-marins classiques : en plus des "levées" très nettes, on peut aussi lui définir un "cône" traversé par des "chenaux". Le delta du Rhône serait alors semblable à une "pente continentale" et la plaine centrale à un "bassin". Les profils bathymétriques de la figure IV₁₂ (localisés sur le plan de prélèvement, figure IV₁₁) montrent bien la morphologie du canyon : fond plat, levée dissymétrique, et nombreux chenaux dans le cône vers 270 m de profondeur. Notons également la grande irrégularité des fonds sur la coupe A près de l'embouchure, en effet le canyon ne s'individualise vraiment qu'à 1 km de celle-ci.

De nombreux autres canyons partiellement comblés s'observent au nord (canyon du Vieux Rhône) comme au sud du canyon actuel. Ils ne sont plus en fonctionnement et la sédimentation fine les comble peu à peu. Sur le profil St-Gingolph-Vevey (figure IV₁₃) on distingue très bien au moins trois anciens canyons, Houbolt et Jonker (1968) en dénombrent six. Sur ce même profil ainsi que sur le profil B (figure IV₁₂) on remarque que le bord méridional du canyon actuel au niveau de St-Gingolph a une morphologie tout-à-fait différente du bord septentrional. Il y a un replat de 400 m puis une levée de 10 m de haut beaucoup moins importante que la levée nord. D'autres coupes -non présentées ici- montrent même un petit ravin. Peut-être avons nous là la preuve d'un surcreusement du canyon actuel dans un lit plus ancien dont cette levée serait un témoin. Une campagne de sismique continue au sondeur de vase est prévue pour étudier plus en détail ces intéressants phénomènes.

4.7.2. - Fonctionnement du canyon du Rhône.

Les types de dépôts rencontrés.

Outre les prélèvements à la benne et au carottier Mortimer, dont les analyses physiques sont reportées au tableau IV₃ en annexe de ce chapitre, nous avons effectué des prélèvements au carottier Züllig dont le log descriptif est reporté aux figures IV₁₄, IV₁₅ et IV₁₆ (m est la médiane). Les courbes granulométriques typiques sont reportées sur la figure IV₇.

La carotte LZ₇ est caractéristique du fond du canyon : le niveau inférieur est composé d'alternances non régulières de sablons plus ou moins fins et de vase, il lui succède brusquement un niveau de sable fin granoclassé comportant quelques débris végétaux. De tels sédiments s'observent tout au long du canyon jusqu'au cône où des sablons de médianes supérieures à 100 μ existent encore. Houbolt et Jonker ont même trouvé des médianes de 230 μ . Dussart (1966) fait état d'une carotte prélevée à 300 m de profondeur avec encore "275 mm de sable rhodanien micacé granoclassé", puis au-dessous une zone assez bien stratifiée avec des varves de 1 à 4 millimètres. Notons que Melle Coët (in Romieux, 1930) avait déjà trouvé en 1925 un lit de 1,5 cm de sable grossier dans une carotte située dans l'axe du canyon du Rhône par plus de 300 m. Il n'est pas possible de suivre horizontalement un niveau dans les dépôts du fond du canyon, les phénomènes d'érosion rendent ce dernier très hétérogène. Nous n'avons pas remarqué comme Dussart (1961) que "les sédiments étaient d'autant plus gros dans le chenal du Rhône qu'on s'éloigne de l'embouchure". Au contraire Houbolt et Jonker présentent des courbes granulométriques pour le fond du canyon (channel) plus grossières que pour le cône central (central fan). Quelquefois même les dépôts sont mal classés et plurimodaux, ainsi qu'on peut le voir pour la partie inférieure de la benne LB28_F (figure IV₇).

Le même genre de dépôts grossiers s'observe également dans

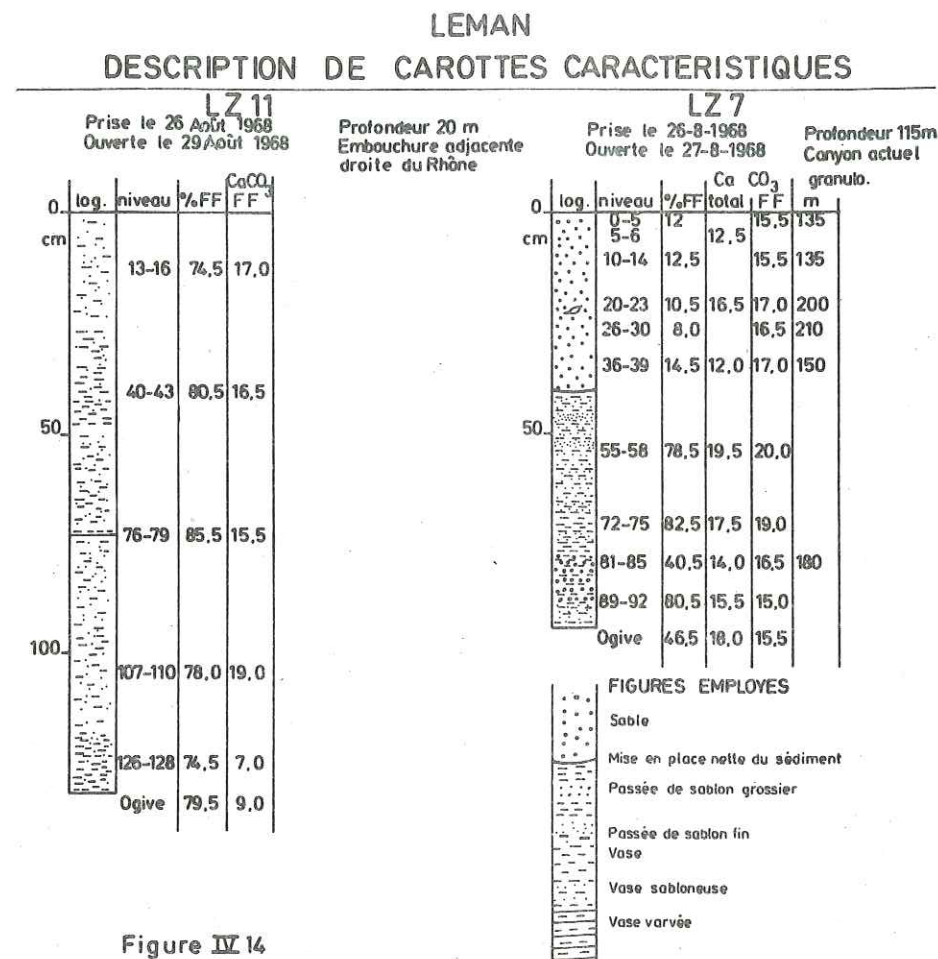


Figure IV 14

les anciens canyons. La carotte LZ₈ prise dans l'ancien canyon sud devant St-Gingolph montre, sous 80 centimètres de vase, des séquences de sablons plus ou moins granoclassés et des niveaux vaseux varvés. Des traces d'érosion sont nettement visibles, enfin nous avons trouvé à 132 cm de la surface un morceau de scorie charbonneuse sur lequel nous reviendrons. Houbolt et Jonker font également état de carottes identiques dans les anciens canyons vers Vevey.

Remarquons enfin que les bennes réalisées dans le canyon en hiver (LB₂, LB₄) montrent d'abord une couche de quelques centimètres de sablon vaseux, riche en eau et en débris végétaux (feuilles, etc...) qui recouvre les niveaux nettement sableux.

Les turbidites.

Les sédiments grossiers ont donc été rencontrés dans le canyon actuel, son cône, et sous des dépôts de vases dans les anciens canyons. Partout ailleurs dans le Haut-Lac les dépôts récents sont constitués par des vases plus ou moins varvées (carotte LZ₁₀, figure IV₁₆). A l'ancienne embouchure du Rhône la sédimentation fine a déjà recouvert les apports grossiers (carotte LZ₁₁). Nous avons vu au chapitre précédent que le canyon est le siège de courants turbides très chargés en suspensions, très localisés et provenant directement du Rhône, ce sont ces courants qui ont transporté puis déposé les sédiments grossiers décrits précédemment. Ces dépôts ont la plupart des caractéristiques des turbidites telles qu'elles ont été décrites par Kuenen (1964).

- *Taille des particules* : Le diamètre moyen des particules va de 50 microns à 420 microns. Des grains de quartz de 1 mm ont été rencontrés.

- *Granoclassement* : Nous ne l'avons pas observé dans le canyon lui-même mais Houbolt et Jonker en font état pour les sédiments du cône.

LEMAN DESCRIPTION DE CAROTTES CARACTERISTIQUES

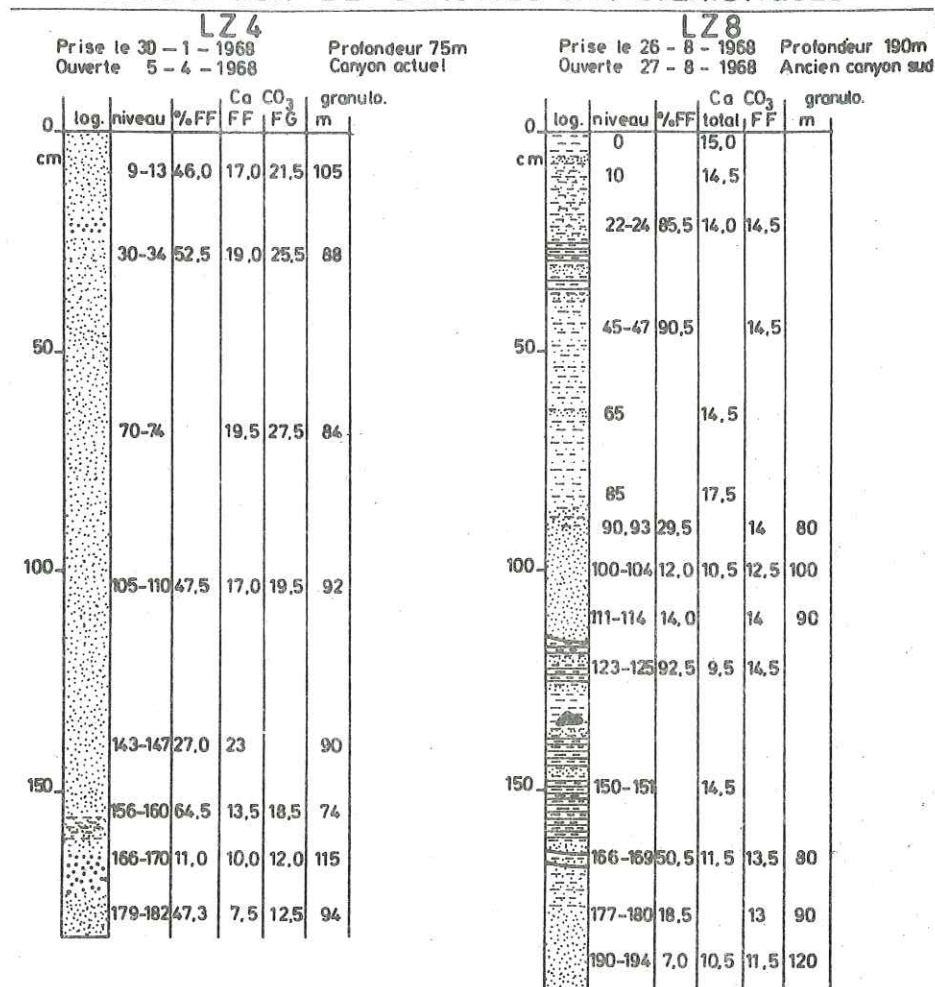


Figure IV 15

Un morceau de charbon se trouvait au niveau 132-133
Epaisseur des varves 0,5 cm varves noires
2 à 3cm varves grises

- *Triage* : Le triage est en général bon, mais quelquefois médiocre (LB₂₅ et LB₂₈).

- *Débris végétaux* : Ils sont très nombreux dans le sablon fin : fragments de feuilles, d'herbes, même de roseaux et un os (LB₄).

- *Figure de sédimentation* : En raison de notre mode de prélèvement nous n'avons pas pu les étudier. L'épaisseur des lits de sablon varie de 1 à 2 cm à plus de 40 cm. La plupart du temps les lits de sablon et a fortiori ceux des sables débutent bien nettement. Certains se terminent brutalement par une sédimentation vaseuse, il semble qu'il y ait alors érosion de la partie supérieure du lit avant le dépôt de la vase.

- *Glissements* : Nous avons trouvé dans la carotte LZ₇ sur 9 cm d'épaisseur un mélange de 60 % de sable moyennement classé et de 40 % de vase fine il semble bien que ce mélange soit dû à un glissement.

- *Fréquence des courants* : Comme nous l'avons dit au chapitre précédent, ces courants sont essentiellement liés aux crues du Rhône qui ont lieu chaque année en Juin et Juillet. Mais les crues d'hiver, plus rares, doivent provoquer les mêmes phénomènes. Entre les courants il y a une sédimentation détritique fine, riche en eau et en matières organiques, c'est ce que nous avons rencontré à la surface des bennes LB₂ et LB₄, effectuées en Janvier 1968 après une période de plusieurs mois sans crues. Le problème de la fréquence des courants se pose aussi pour les "anciens canyons", il est vraisemblable qu'avant la stabilisation du lit du Rhône les grandes crues (2 000 m³/s) devaient y provoquer des courants de turbidité. La morphologie assez "fraîche" du canyon du Vieux Rhône (figure IV₁₃) en est le témoin. Pour l'ancien canyon, le plus méridional, près de St-Gingolph, les dépôts grossiers (carotte LZ₈) sont recouverts par

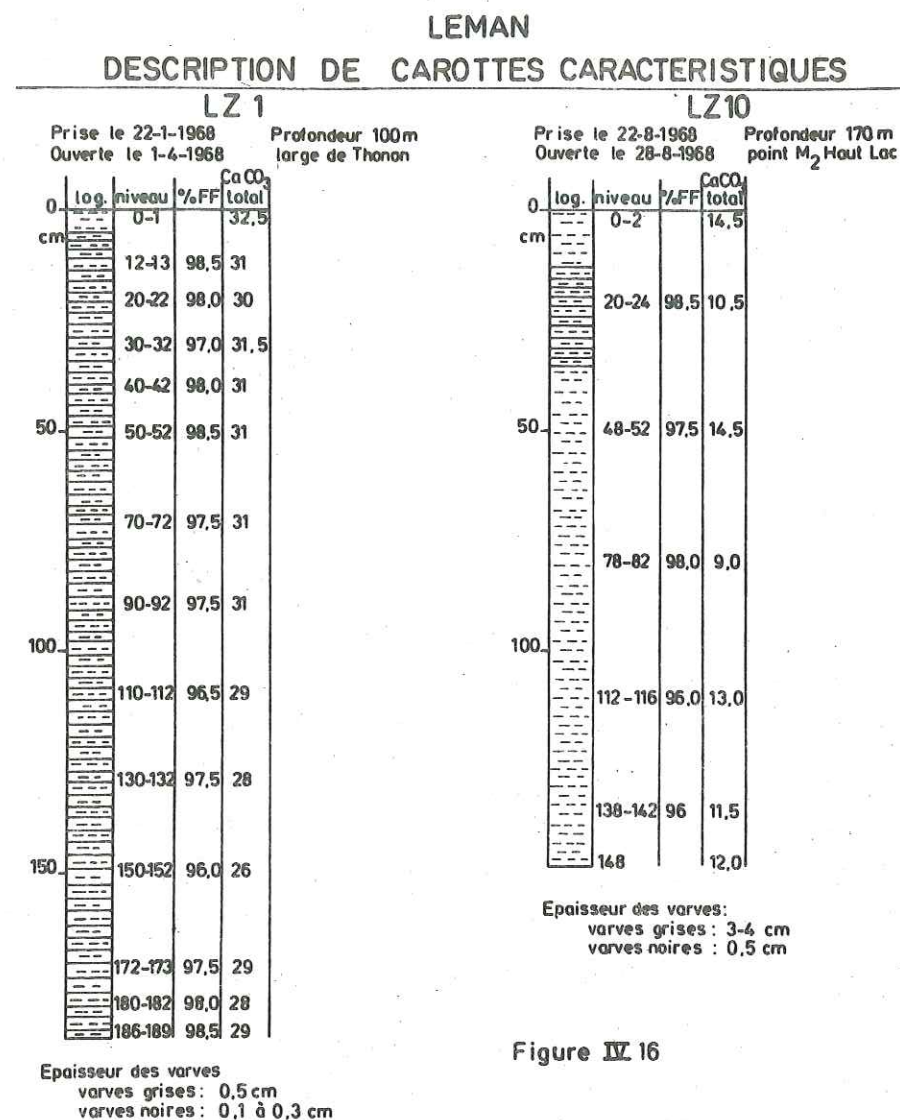


Figure IV 16

80 cm de vase fine avec quelques lits de sablons, il semble donc que ce canyon n'ait pas fonctionné depuis une cinquantaine d'années.

Origine des canyons dans le Léman.

Elle a été longtemps controversée : Forel pense à un creusement par les eaux du Rhône plus denses, pour Collet (1925) "le ravin sous-lacustre ne peut se former que si la quantité de limons en suspensions dépasse de beaucoup celle des matériaux roulés sur le fond". En fait les deux auteurs ont raison : les sédiments les plus fins se déposent dans tout le Haut-Lac constituant ainsi un delta sous-lacustre à faible pente, les sédiments les plus grossiers -sables et sablons- sont canalisés à leur arrivée dans le lac et s'écoulent sur le fond en creusant dans les sédiments meubles un canyon. Shepard et Dill (1966) ont pu observer ce phénomène de très près. Lorsque Dill a plongé pendant l'été 1960 il a vu nettement la séparation des deux fractions : les particules fines formaient un nuage au niveau de la thermocline (15 m) et le sable grossier se déposait au fond formant des "ripples marks" instables. Remarquons que Dill n'a pas dû plonger en période de grosse crue où le phénomène aurait sans doute été très violent.

Autres types de dépôts grossiers.

En dehors des sédiments grossiers rencontrés dans le canyon actuel, son cône et au niveau des anciens canyons, les sables et les sablons ne s'observent guère qu'aux embouchures des autres rivières, Dranse, Venoge, etc... où les apports plus grossiers ont constitué des deltas. De tels sédiments ont été recueillis dans la benne LB₁₇ devant Ouchy par 103 m de profondeur : la médiane de la fraction grossière est de 250 μ (figure IV₇), il s'agit d'un sable noir bien classé, avec des gros débris végétaux ; il correspond sans doute aux apports du Flon canalisés par une "ravine". Enfin les sédiments grossiers peuvent provenir de glissements à partir des berges, comme le montre bien le prélèvement réalisé devant le Bouveret (LB_{15F}) : le

sable, qui ne représentait d'ailleurs que 20 % de la fraction totale était très grossier et plurimodal (voir la courbe cumulée sur la figure IV₇), il y avait jusqu'à des cailloux et des scories. Enfin il nous faut mentionner la présence tout-à-fait anormale de graviers -certains avec des traces de goudrons- dans des vases très fines et ceci loin des rives. Nous en avons trouvé notamment dans les prélèvements LM₁ et LB_{23F}. Forel avait déjà remarqué ce phénomène, il ne peut s'agir que d'apports accidentels provenant de nombreux bateaux qui sillonnent le Léman.

4.7.3. - La sédimentation fine dans le Léman.

En dehors de ces dépôts que Forel appelle "alluvion grossière" la majeure partie du fond du Léman est recouverte de dépôts très fins, l'"alluvion impalpable". Cette forme de sédimentation se rencontre partout dès qu'on s'éloigne un peu des cotes où l'action des vagues et des courants de retour empêche le dépôt. La stratigraphie de ces dépôts est maintenant bien connue après les travaux de J. Sauvage (1969) sur les carottes de C. Serruya (1969), qui ont permis de reconnaître les différentes phases paléoclimatiques jusqu'à l'Oldest Dryas. Pour quelques prélèvements il y a des lacunes montrant d'anciennes périodes d'érosion ou de non-dépôt, surtout dans les zones côtières et le Petit-Lac.

Cette sédimentation fine se rencontre partout dans le Léman, nous avons porté sur la figure IV₁₆ la description des carottes LZ₁ et LZ₁₀ réalisées respectivement en face de Thonon et en face de Vevey. Pour les deux carottes 98 % du sédiment est inférieur à 40 microns. Les deux dépôts sont varvés : il y a alternance de varves grises et noires. Pour LZ₁ un ensemble de deux varves fait environ 0,8 cm et pour LZ₁₀ de 3 à 4 cm. Parejas (1929) a présenté une carte des épaisseurs de ces varves pour le Haut-Lac, mais pour les mêmes endroits ses valeurs sont nettement plus faibles que les nôtres et celles d'Houbolt et Jonker. L'épaisseur des varves est maximale vers

le Rhône où elle atteint plusieurs centimètres et diminue rapidement pour n'être que de quelques millimètres au niveau de Meillerie. Pour Serruya il y a deux types de varves : les varves granulométriques dans la zone d'influence du Rhône, ce sont celles décrites par Parejas, et les varves biochimiques du Grand Lac et du Petit Lac. Le problème de la formation des varves n'est pas encore bien résolu, dans le cas du Léman il nécessiterait une étude microstratigraphique avec des analyses granulométriques et chimiques varve par varve.

Houbolt et Jonker (1968) ont pu effectuer l'analyse granulométrique totale des sédiments fins. Les valeurs moyennes des médianes sont les suivantes :

partie supérieure du delta du Rhône	:	6 à 20 μ
partie moyenne	"	: 4 à 8 μ
partie inférieure	"	: 3 μ
plaine centrale	"	: 2 à 4 μ

Par contre sur les flancs de la cuvette les sédiments beaucoup plus fins témoignent d'un affaiblissement net du courant général : au niveau de la partie moyenne du delta les médianes sont déjà inférieures à 2 μ .

4.8. - Etude chimique des sédiments actuels.

4.8.1. - Travaux antérieurs.

Les premiers résultats sont cités par Forel et Delebecque. Ces analyses parcellaires sont très irrégulières néanmoins Forel remarque déjà que "la richesse en silicate va en diminuant à mesure qu'on s'avance dans le lac en s'éloignant du Rhône" (Le Léman, tome 1, p. 128) et que la "chaux et la magnésie évoluent en sens inverse que les silicates", nous verrons ce qu'il faut penser de cette association. Zender (1908) fit une analyse plus complète de la vase du Léman (Si, Fe + Al,

Ca, Mg, CO₂) mais malheureusement cet auteur choisit un sédiment prélevé par 20 m de fond dans le Petit Lac, ses résultats ne sont donc pas du tout représentatifs de l'ensemble du Léman. Plus tard Joukowski et Buffle (1938) firent une très intéressante étude sur des sondages effectués à Ruth toujours dans le Petit Lac, aussi leurs résultats appellent les mêmes remarques. Enfin Monod (1956) dans son étude sur la pollution apportée par le Flon présenta des analyses beaucoup plus complètes (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, P₂O₅, SO₃, perte au feu). Mais cette étude est circonscrite à une petite zone autour de l'embouchure de la rivière. Il faut placer à part la très intéressante étude de Romieux (1930) qui n'a porté que sur les carbonates mais qui intéresse tout le lac. La figure IV₁₇ présente ses résultats sous une forme plus pratique. Enfin dans son travail sur les sédiments du Léman, Serruya (1969) a essayé de voir les corrélations entre les paléoclimats définis par la palynologie et les éléments traces des sédiments, aucune analyse d'éléments majeurs n'est présentée. Aucune étude générale de la composition chimique des sédiments du Léman n'avait donc été réalisée.

L'étude que nous présentons ici porte sur 37 analyses, de la fraction inférieure à 40 µ, de sédiments prélevés sur tout le lac (voir la carte de la figure IV₁₁). Les analyses des éléments majeurs des sédiments sont reportées sur le tableau IV₆, les moyennes et les valeurs extrêmes sont sur le tableau IV₄, tous deux en annexe du chapitre. Le nombre d'analyses réalisées est encore bien insuffisant pour effectuer une étude complète de la chimie des vases du Léman : la variabilité des faciès est très grande ; en prenant les sédiments superficiels on n'est pas toujours sûr de prélever des sédiments actuels (érosion, absence de dépôt) ; enfin même pour un dépôt fin et régulier comme celui de la plaine centrale, on peut noter des variations de l'ordre de 10 % en quelques centimètres comme pour le prélèvement LM₁₃ (voir tableau IV₆ en annexe). Aussi nous n'avons donné ici que les grandes lignes des variations

chimiques, sans entrer dans les études de détail.

4.8.2. - *Caractères chimiques des sédiments du Léman.*

Les sédiments du Léman ont les mêmes caractères chimiques généraux que ceux des apports : SiO₂ est prédominant, puis CaO, Al₂O₃ et CO₂. En général les sédiments du Léman sont donc essentiellement composés d'aluminosilicates, de quartz et de carbonate de calcium, mais la proportion de ces constituants varie considérablement. Romieux avait déjà mis en évidence la variation des carbonates. Sur la figure IV₁₇ on voit nettement l'accroissement général des carbonates de calcium au fur et à mesure qu'on s'éloigne du Rhône. On note également une augmentation nette vers les zones cotières de faibles profondeurs, augmentation encore accentuée dans la zone du delta de la Dranse par les apports très calcaires de celle-ci (35 % de CaCO₃ dans la fraction fine). L'évolution de la silice est exactement l'inverse ainsi que le montre nettement la figure IV₁₈ : la teneur en SiO₂ décroît lorsqu'on s'éloigne du Rhône, de plus on note bien la différence observée entre les sédiments cotiers plus riches en CaCO₃ et les sédiments profonds. Enfin remarquons la différence -normale- entre les dépôts de turbidites LB_{29F} et LB_{28F}, dont la composition est beaucoup plus proche de celle des apports du Rhône, et les sédiments fins voisins.

La corrélation entre les différents éléments a été étudiée en comparant pour 9 sédiments répartis sur tout le lac, les rapports des éléments successivement à la silice et au CO₂ (ce dernier a été calculé par différence entre les pertes à 1 000°C et à 600°C). Nous avons reporté ces résultats au tableau IV₇. On voit clairement que presque tous les éléments sont liés à la silice, leur rapport à cet élément étant peu variable. *Les éléments les plus liés à la silice sont dans l'ordre : Al, Fe, K, Ti, Na et Mg.* Outre le calcium, le phosphore et le manganèse sont à part, nous y reviendrons. Les rapports des éléments au CO₂ sont très variables : sauf pour le calcium

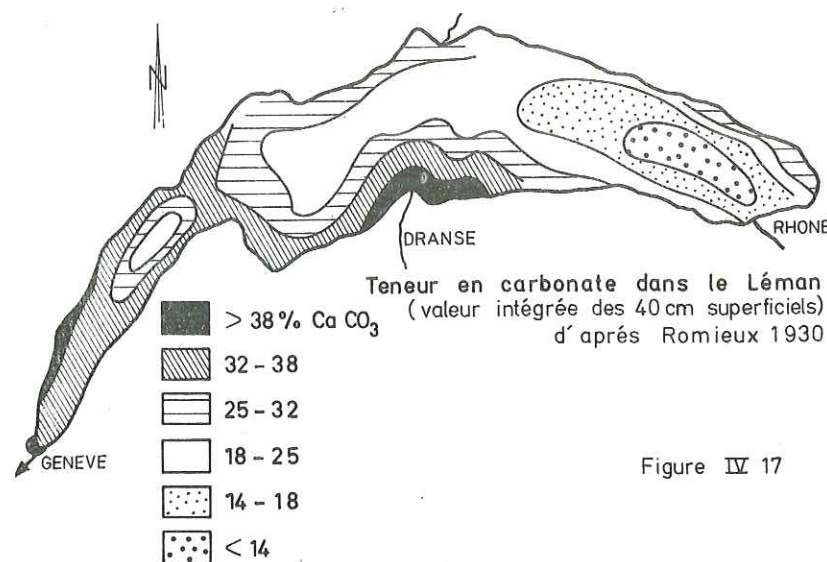


Figure IV 17

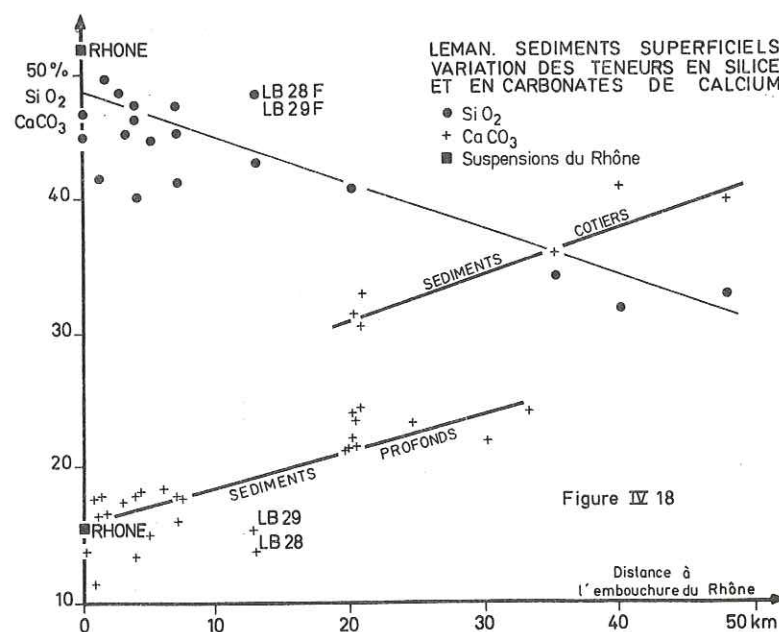


Figure IV 18

tous ces rapports varient du simple au quadruple environ, ce qui correspond aussi à la variation des carbonates dans les échantillons analysés.

Notons que le magnésium n'est pas du tout lié au calcium, le rapport Ca/Mg varie de 2,3 dans le Haut Lac à 11,8 dans le Petit Lac : la précipitation des carbonates est essentiellement calcique. De plus il faut remarquer qu'aucun élément ne semble suivre l'évolution du calcium, cet élément est donc le seul à être précipité.

En comparant avec les analyses d'argiles, et des autres éléments constituant la vase, données par Debyser (1959) nous pourrions attribuer une origine probable à chaque élément. Le rapport Al/Fe dans les sédiments du Léman varie de 2,44 à 3,66 avec une valeur moyenne de 2,81 ce fait montre que le fer est sans doute plus lié aux argiles (illite Al/Fe = 2 et chlorite Al/Fe = 4) qu'à des sulfures (on aurait alors une variation indépendante de l'aluminium). La pyrite est en effet signalée par Monod (1956) mais en très faible quantité. Sur le Bodensee, très analogue au Léman, les teneurs en pyrite sont en général inférieures à 0,2 % (Müller, 1967).

Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ varie entre 3,7 et 4,5, il est nettement supérieur à celui des argiles (kaolinite $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,3$; illite $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,95$, chlorite $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,15$) et des feldspaths qui sont d'ailleurs en faibles quantités dans les apports. Il y a donc des particules très fines de silice de l'ordre du micron qui constituent une part non négligeable du sédiment. Ces particules peuvent être soit du quartz très fin soit des squelettes de diatomées qui sont une part importante du plancton.

Le phosphore et le manganèse ont un comportement géochimique tout à fait différent : les rapports $\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ varient du simple au double et MnO/SiO_2 du simple au quadruple, de plus cette variation n'est pas du tout régulière et n'est pas liée à la concentration

de SiO_2 comme les autres rapports, qui décroissent régulièrement avec la silice. Nous n'avons pu corréler le phosphore ni avec le calcium, ni avec la matière organique (perte au feu à 600°C) et à part quelques valeurs près du Rhône, les teneurs sont presque constantes autour de 0,20 %. Signalons toutefois qu'aux embouchures des rivières très polluées, cette teneur peut être beaucoup plus élevée et Monod (1956) cite des concentrations allant jusqu'à 1,20 % en face du Flon mais ces fortes valeurs décroissent rapidement puisque la valeur moyenne à 150 m de l'embouchure n'est plus que de 0,23 %. *Le manganèse est l'élément le plus variable dans nos analyses* : les concentrations vont de 0,06 % à 0,49 % (tableau IV₄). On sait depuis quelques années qu'il existe également dans les lacs des modules de manganèse ; Gorham et Swaine (1965) signalent des augmentations brusques de Mn dans les sédiments du lac Windermere en Grande-Bretagne, et Semenovich (1966) fait les mêmes remarques à propos du lac Ladoga en U.R.S.S., ces deux lacs étant très différents du Léman. La géochimie du manganèse est donc un problème général, des études particulières seraient nécessaires pour le résoudre.

4.8.3. - La précipitation des carbonates.

Nous disposons de deux travaux très intéressants : celui de Romieux (1925) sur le Léman et celui de Portner (1951) beaucoup plus complet sur le lac de Neuchâtel. D'après Romieux la teneur en CaCO_3 dans le Petit Lac peut dépasser 70 % dans les zones cotières, Joukowski et Buffle (1938) citent des valeurs identiques pour ce qu'ils nomment la "craie lacustre". Comme nous l'avons remarqué la teneur en CaCO_3 est beaucoup plus forte (figure IV₁₇), à distance égale du Rhône, dans les zones peu profondes et les fortes teneurs du Petit Lac viennent renforcer cette affirmation. Il semble donc que, si la précipitation des carbonates a lieu sur tout le lac comme nous l'avons vu au chapitre III, il y a une dissolution importante de ceux-ci dans les zones profondes en raison de la température et du pH plus faibles. Cette redissolution a été nettement mise en évidence par Portner pour le

lac de Neuchâtel. Dans le Haut-Lac cette sédimentation biochimique est en plus masquée par les apports terrigènes beaucoup plus importants. Au contraire dans le Petit Lac, dont la profondeur moyenne est de 40 m et où l'hypolimnion froid est beaucoup plus réduit que dans le Grand Lac, cette précipitation est prépondérante, les apports détritiques étant très réduits.

Comme nous venons de le voir seul le calcium est précipité, le magnésium évoluant de façon inverse comme le reste de la fraction déritique. Ce phénomène n'a pas été remarqué dans le Bodensee où Müller (1967) note dans l'épilimnion en Août 1965 un affaiblissement en magnésium aussi important que celui du calcium.

Nous avons essayé au chapitre III de mettre en évidence la précipitation par des bilans de calcium et de bicarbonates. Notre bilan portait sur un an et, vu les erreurs commises, nous n'avons pu conclure bien que le bilan laissait prévoir une précipitation d'environ 150 000 t de CaCO_3 par an. Balavoine (1939) considérant que la couche de 0 à 25 m perdait 10 mg/l de CaCO_3 de Mars à Septembre, annonce une précipitation de 145 000 t de CaCO_3 , mais ce calcul est critiqué par Portner parce que ne tenant pas compte des apports des rivières et des sorties à Genève pendant la période considérée. Nous avons essayé à nouveau de faire un bilan plus précis entre Septembre 1968, Mars 1969 et Septembre 1969. Nous avons évalué à ces périodes la teneur moyenne en Ca^{++} et HCO_3^- du lac pour chaque couche (supérieure, moyenne, intermédiaire et profonde) définie au précédent chapitre. Puis nous avons calculé les apports en tenant compte de la variation des éléments en fonction du débit. Le bilan des entrées et des sorties s'est alors trouvé équilibré, compte tenu de la variation de niveau du lac (en Mars le niveau est 70 cm plus bas qu'en Septembre) et des erreurs commises. Seules les variations de teneurs du lac étaient donc à considérer : entre Septembre 1968 et Mars 1969 le Léman s'est enrichi de 700 000 t de CaCO_3 , puis de Mars 1969 à Septembre 1969

il en a perdu 500 000 t. Ces quantités considérables peuvent paraître significatives mais elles sont en fait à considérer avec beaucoup de prudence, étant de l'ordre de 3 à 5 % de la quantité totale de carbonates dissous dans le Léman.

Puisque le magnésium ne précipite pas, nous avons aussi comparé les rapports Ca/Mg des apports au Léman (8,3) et de la sortie à Genève (8,0). Là aussi compte tenu des erreurs commises nous ne pouvons pas conclure même si la variation est dans le sens prévu.

Portner (1951) a effectué dans le lac de Neuchatel un bilan analogue en tenant compte des apports et des sorties, il trouve 90 000 t de CaCO_3 précipité par an, mais quand on considère qu'il y a dans ce lac $1,7 \cdot 10^6$ t de CaCO_3 dissout, ce bilan n'est plus beaucoup significatif, pourtant les sédiments du lac de Neuchatel sont essentiellement calcaires (67 % de CaCO_3 en moyenne). *La sédimentation calcaire est donc lente et trop faible pour pouvoir être mise en évidence actuellement par des bilans d'éléments dissous. Seules les analyses chimiques des sédiments la mettent nettement en évidence.*

4.8.4. - Premières conclusions sur la nature chimique des sédiments du Léman.

Il y a donc partout dans le Léman le même stock détritique constitué essentiellement par des argiles avec un peu de calcite et de la silice très fine vers l'embouchure du Rhône et dans les zones profondes, ce stock constitue la majeure partie du sédiment. Dans les zones cotières la précipitation du carbonate de calcium devient importante car il n'y a pas redissolution du précipité dans les eaux profondes. Dans le Petit Lac ce phénomène est prépondérant : les sédiments vont des "vases calcaires" (50 % de CaCO_3) aux "craies lacustres" (75 % de CaCO_3).

Parmi les éléments majeurs, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O et une partie de SiO_2 doivent provenir des argiles (illite, chlorite) et

d'autres alumino-silicates. Une partie de la silice est sous forme de quartz très fin ou provient de test de diatomées, MgO provient sans doute des argiles (chlorite). Si le titane doit provenir des argiles, la constance des teneurs en phosphore et les variations irrégulières du manganèse posent des problèmes géochimiques non encore résolus.

4.9. - Sédimentation comparée du Léman et des autres lacs.

Nous comparerons le Léman à deux lacs bien connus : le Bodensee (travaux de Müller et al) et le lac de Neuchatel (travaux de Portner). Nous avons déjà vu que les sédiments du lac de Neuchatel sont essentiellement calcaires (67 % de CaCO_3) et d'origine biochimique. Le Petit Lac se rapproche donc nettement du lac de Neuchatel. Dans le Bodensee Müller (1966 b) remarque les phénomènes suivants :

- sédimentation détritique près du Rhin et dans les zones profondes. La taille des particules diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne du Rhin.

- teneur en carbonates plus fortes dans les zones cotières (30 % à 40 %) et dans le Gnadensee (supérieure parfois à 70 %), que dans les zones centrales profondes (20 % à 30 %).

Une fois encore nous remarquons la similitude des deux lacs, mais Müller ne mentionne pas le rôle du canyon du Rhin connu pourtant depuis presque un siècle : en effet le Rhin a été canalisé en 1900 et actuellement il semble que le canyon ne fonctionne plus, les débits du Vieux Rhin étant trop faibles. Ce canyon a dû pourtant jouer un rôle identique à celui du Rhône dans le Léman : il est visible jusqu'à la profondeur de 205 m, sur le premier kilomètre sa pente est de 8 % et sa profondeur atteint 70 m. Il n'existe pas à la nouvelle embouchure du Rhin à Fussach de phénomène analogue.

Zender (1908) avait judicieusement classé les lacs subalpins en trois catégories : les lacs calcaires (Neuchâtel, Bienne), les lacs mixtes (Léman, Bodensee, Quatre-Cantons) et les lacs silicatés (Majeur, Côme, Lugano), nos travaux comme ceux de Müller et de Pörtner confirment cette distinction.

4.10. - Taux de sédimentation dans le Léman.

Nous avons vu l'hétérogénéité des vases du Léman tant au point de vue physique que chimique, il sera donc difficile à priori de définir un taux de sédimentation : chaque zone aura un taux correspondant à son mode de sédimentation. Comme Serruya (1969) nous préférons exprimer le taux de sédimentation en $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{an}$ plutôt qu'en mm/an , notion plus pratique mais fonction de la teneur en eau et de la compaction du sédiment.

D'après les données palynologiques, C. Serruya donne les résultats suivants pour des zones de 100 m de fond dans le Grand Lac.

Subatlantique - subboréal	: 65 $\text{mg}/\text{an}/\text{cm}^2$
Atlantique	: 48 $\text{mg}/\text{an}/\text{cm}^2$
Boreal	: 90 $\text{mg}/\text{an}/\text{cm}^2$

De plus une carotte a pu être datée au C^{14} en face de Lausanne à faible profondeur, on aurait dans cette zone une sédimentation de 1 mm/an (Serruya, 1969). Dans notre étude de la crue de la Dranse (Hubert et al, 1969), nous avons estimé la sédimentation due à la crue à 1 mm de sédiment sec, ce qui montre bien l'importance de ces phénomènes. On peut également se baser sur les varves : on a alors une sédimentation de plusieurs cm/an dans la zone proche du Rhône et de l'ordre du mm/an dans la plaine centrale mais ces estimations sont basées sur la périodicité annuelle des varves, ce qui n'est pas encore établi avec certitude.

Nous avons signalé le morceau de scorie de charbon trouvé au niveau 132 cm dans la carotte LZ₈. Cette scorie ne peut provenir que d'un bateau à vapeur or cet endroit n'a été desservi par de tels bateaux que de 1854 à 1964, ce qui donne un taux de sédimentation dans cette région face à St-Gingolph de 0,8 cm/an à 2 ou 3 cm/an . Mais si l'on tient compte des niveaux de turbidites mis en place d'un seul coup, on arrive à une valeur moyenne de 2 à 3 cm/an pour la sédimentation régulière, ce qui correspond aux varves de cette carotte.

Au centre du lac deux déterminations du taux de sédimentation par les radionuclides artificiels ont été réalisées. La première en 1968 par J.M. Martin du laboratoire de Géologie Dynamique de Paris, porte sur le Cs^{137} : le maximum d'activité de 1963 a été retrouvé au niveau 2 à 4 cm, on aurait donc un dépôt de 0,5 cm/an environ. La deuxième étude par le Docteur D. Lal du Tata Institute de Bombay porte sur le Fe^{55} et le Pb^{210} , le premier élément donne un taux inférieur à 0,1 cm/an et le deuxième un taux de 0,4 cm/an . Cette dernière valeur qui corrobore celle de Martin semble donc la plus probable.

Toutes ces déterminations n'ont que des valeurs ponctuelles. Nous avons estimé les apports annuels au Léman entre 7 et 9 millions de t/an en grande majorité des sédiments fins, ce qui correspond à une valeur moyenne de 1,4 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{an}$ sur tout le Léman, ou d'1,6 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{an}$ si on excepte le Petit Lac.

Cette valeur est du même ordre de celle qu'on peut calculer d'après les données de Müller pour le Bodensee (Obersee seulement) 0,60 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{an}$. Ces taux sont considérables par rapport à ceux des lacs de Neuchâtel (65 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{an}$, calculé d'après Portner), ou de Ladoga (6,5 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{an}$ d'après Semenovitch).

C - BILAN SEDIMENTAIRE DU BASSIN VERSANT DU LEMAN

ET EROSION SPECIFIQUE TOTALE DES ELEMENTS MAJEURS.

4.11. - Composition chimique des suspensions lacustres.

Sur la vingtaine de prélèvements de gros volume (50 l à 100 l) réalisés dans le Léman et à Genève, seule une douzaine était suffisamment chargée pour effectuer une analyse chimique totale. Les moyennes et les extrêmes sont données dans le tableau IV₄. On note tout de suite une grande variabilité des éléments, il n'a pas été possible de corrélérer les analyses avec les saisons, avec l'emplacement des prélèvements ou leurs profondeurs, en raison du trop petit nombre de données. L'étude des suspensions lacustres ou marines (seston) est très particulière et l'analyse chimique doit aussi tenir compte de leur nature minérale ou organique. On peut noter cependant la forte teneur générale en P_2O_5 qui est due au plancton riche en phosphore. A part cet élément les suspensions lacustres ont en général des concentrations intermédiaires entre celles du Rhône et celles de la Dranse.

Nous avons déjà vu que la teneur moyenne en suspension des eaux de sortie à Genève était très faible : 4 mg/l d'après les données de l'Office Fédéral de l'Economie Hydraulique, ce qui représente 30 000 t de suspensions par an. Par rapport aux apports cette valeur est très faible, on peut donc considérer que tout ce qui arrive en suspension au Léman, s'y dépose. *L'érosion spécifique du bassin versant du Léman à la sortie du lac est donc essentiellement chimique.* (voir tableau III₁₄).

4.12. - Erosions détritiques et chimiques comparées par éléments.

Nous pouvons maintenant comparer les érosions détritiques et chimiques des éléments suivants : SiO_2 , Ca, Mg, Na, K, ainsi que

pour le CO_2 et le P. Nous avons exprimé les apports en suspensions (fraction minérale seulement) en composition élémentaire et non pas en oxydes -sauf pour la silice et le CO_2 - pour pouvoir les comparer aux apports en solution. La plupart des éléments de ce bilan proviennent des phénomènes naturels d'érosion chimique et détritique, sauf le phosphore. Cet élément, que nous n'avons pas dosé dans les eaux, est cependant bien connu par les travaux de la Commission de Protection du Léman, les valeurs fournies ici concernent le phosphore total (phosphore soluble et phosphore organique). En raison des nombreuses sources artificielles de phosphore (excrétions, détritiques ménagers, détergents, engrais, etc...) le phosphore naturel d'origine minérale des eaux ne représente plus qu'une partie de phosphore dosé (l'étude quantitative des provenances reste encore à faire).

TABLEAU IV₈ : EROSIONS CHIMIQUES ET DETRITIQUES COMPAREES PAR ELEMENT.

Sur la base de 6.10^6 t/an d'apports minéraux en suspension pour le Rhône et de $0,5.10^6$ t/an pour la Dranse.

	Rhône			Dranse		
	Apports détritiques 10^3 t	Erosion détritique t/km ² /an	Erosion chimique t/km ² /an	Apports détritiques 10^3 t	Erosion détritique t/km ² /an	Erosion chimique t/km ² /an
SiO ₂	3 150	600	3,2	210	380	5,0
Ca	310	60	44	68	125	100
Mg	190	36,5	5,4	10,5	19	12
Na	80	15,5	3,3	2,15	3,9	2,3
K	165	32	1,35	10,5	19	1,6
CO ₂	460	88	65	84	150	195
P	7,2	1,38	0,093 §	0,48	0,87	0,023 §

§ Phosphore total (d'après Burkard, Commission de Protection du Léman).

Il ressort de ces valeurs les faits suivants :

- Environ 99 % de la silice transportée par les rivières provient de l'érosion détritique.

- Le calcium et le CO₂ proviennent, pour les deux rivières à part égale sous forme dissoute et en suspensions.

- Pour le Rhône le magnésium, sodium et potassium proviennent essentiellement de l'érosion détritique, par contre pour la Dranse un tiers du magnésium et du sodium provient des dissolutions.

- Enfin la quantité de phosphore amenée au Léman par

dissolution est très faible par rapport aux apports minéraux, même pour des rivières déjà polluées. Ce fait doit nous amener à considérer avec prudence les bilans de phosphore, en effet une dissolution partielle, du phosphore minéral (apatite par exemple) dans les sédiments et les suspensions suffirait à égaler les apports dissous et à fausser les bilans.

Ces remarques qui confirment de façon logique ce qui est connu sur l'érosion des reliefs, permettent de chiffrer, pour un climat précis, la proportion des deux types d'érosion pour chaque élément considéré. Il manque malheureusement à ces valeurs celles des composés sulfurés. Le dosage du soufre dans les sédiments est délicat et la distinction entre soufre organique et minéral est difficile à faire. Néanmoins les teneurs très faibles en SO₃ (0,5 %) des sédiments du Léman (Monod, 1956) nous laissent à penser que le soufre doit être amené à 90 % environ sous forme soluble (sulfates).

	1935 - 1967	1967	Q	C	Q	C	Q	C
	Q _{lm}	Q _{lm}	sm 1	sm 1	sm 2	sm 2	sm 3	sm 3
JANVIER	68	96	1,86	19,3	1,82	19	1,85	19,3
FEVRIER	69	109	13,7	125	8,83	81	4,0	36,7
MARS	75	118	8,3	70	6,6	56	7,6	64,6
AVRIL	107	139	11,3	81	10,4	75	7,0	50,6
MAI	200	208	44,4	213	36,2	174	19,2	92,6
JUIN	377	320	168,8	528	128,3	401	39,3	123
JUILLET	403	385	108,3	280	105,9	275	95,0	247
AOUT	341	319	155,3	480	142	445	100,0	314
SEPTEMBRE	227	173	13,8	79	11,6	67	8,2	47,4
OCTOBRE	120	136	9,7	71	8,6	63	5,4	39,9
NOVEMBRE	92	115	3,2	27	3,0	26	3,3	28,8
DECEMBRE	75	105	1,9	18	1,8	17	1,8	17,2
MOYENNE	180	186	45,0		39		24,2	

TABLEAU IV₁

DEBITS LIQUIDE ET SOLIDES EN 1967

Q_l = débits liquides en m³/s

Q_s = débits solides en kg/s

C_s = charge en suspension g/m³

TABLEAU IV₂

EROSIONS SPECIFIQUES, CHIMIQUES ET DETRITIQUES DES RIVIERES ALPINES COMPAREES A D'AUTRES RIVIERES

Rivière	m ³ /s débit	km ² surface	t/km ² /an érosion chimique	t/km ² /an érosion détritique	Lieu d'étude	Auteurs Auteur (date publ.), année d'étude
I - VERSANT NORD DES ALPES						
Drauzer Ach	48	800	535	500	exutoire Rodensee	Calculé d'après Müller (1964, 1966) pour l'année 1962-1963
Dranse Chablais	22	550	470	1 000 à 2 000	exutoire dans Léman, Vongy	Présent travail, 1968-1969
Arve	83	2 000	255	360 725 à 1 800	exutoire dans Rhône, Genève	Baef (1891) in Forêt, 1890 Collet (1925), 1890 et 1915 Pardé (1933), 1890-1915 Valeurs choisies
Rhône alpestre	180	5 200	210 190 115 255	260 1 000	entrée Léman, Porte de Joux	Présent travail, 1968-1969 et 1967 Forêt (1895) t I p. 375, 1896 t II p. 596, 1892-1893 Dussart (1960) Collet (1925) ? Pardé (1933) ? Serruya (1969), 1964-1965 Epul (1969) et Houbolt (1960), 1935-1962 Valeurs choisies
Rhône lacustre	240	8 000	190	3,8	sortie Léman à Genève	Présent travail
Rhin alpestre	224	6 100	210	425 540	entrée Rodensee Füssenach Lustenau	Müller (1964), 1962-1963 Walbel (1962), 1931-1960 Pardé (1933) ? Collet (1925), 1893-1912 Collet (1925), 1910 Valeurs choisies
Rhin lacustre	270	11 000	190	15	sortie Rodensee Constance	Calculé d'après Müller (1964 et 1966)
II - VERSANT SUD DES ALPES						
Dora Baltea	110	3 300		366 767	Tavagnasco	Gazzolo - Bassi (1960), 1933-1941 Canali - Allodi (1962)
Adige		9 760		163 160	Trente	Gazzolo - Bassi (1960), 1932-1942 Fournier (1960)
Isère	1 690	70 000		222 258 300 255	Exutoire Ponte Lagoscuro	Gazzolo - Bassi (1960) Canali - Allodi (1962) Fournier (1960) ; Pardé (1933) Canali (1964) 1956-1960
III - AUTRES RIVIERES						
Loire	870	110 000		4 10 à 20 42 10 à 20	Exutoire Montjean	Calculé d'après Berthois (1955), 1953-1954 Pardé (1952) Calculé d'après Berthois (1969), 1957-1968 Valeurs choisies
Colorado USA	640	635 10 ³	25	461	/	Judson - Ritter (1964)
Cote Pac. USA	2 240	302 10 ³	39	231	/	"
Golfe Mex. W. USA	1 540	825 10 ³	45	111	/	"
Atlant. Sud et Golfe Mex. E. USA	9 100	733 10 ³	67	53	/	"
Atlant. nord USA	5 880	382 10 ³	63	76	/	"
Columbia USA	9 660	675 10 ³	63	48	/	"
Mississippi USA	17 500	3 220 10 ³	42 36	103 64	Exutoire	Gibbs (1967)
Congo	38 000	3 500 10 ³	28	9	Exutoire	"
Amazona	175 000	6 300 10 ³	37	79	Exutoire	"
Mc Kenzie Canada	8 550	1 550 10 ³	34			Levinson et al (1969)

n° archiv.	Date	Lieu	prof. m	niveau	% d. caul	granulométrie % F.F., m	densité sèche tot., F.F., F.G., F.F., F.G.	Ca CO ₃	Remarques et description
PRELEVEMENTS AU CAROTTIER JENKINS-MORTIMER (JM)									
Pénétration 10 à 15 cm									
LM ₀	122. 1.681	face CRG	52	S	791	97,5		140	Débris de petits gastéropodes
LM ₁	122. 1.681	face CRG	104	S	1601	97,5		133	
				M		96		136	Petits graviers roulés, traces de goudrons
				F		96		136	
LM ₂	119. 6.681	CRG 10	308	S		99,5		123	Quelques débris végétaux
				M		99,5		126,51	
				F		99,5		119	
LM ₆	119. 6.681	CRG 22	200	S		99,5		115,51	Quelques débris végétaux
				F		99,0		114,51	
LM ₇	119. 6.681	CRG 23	190	A		99,5		125,51	Prélèvement très turbide ; nombreux débris végétaux
LM ₈	119. 6.681	canyon	122	B		99,5		119,51	Prélèvement très turbide ; nombreux débris végétaux
LM ₉	119. 6.681	canyon	122	A		63,0		119,51	Prélèvement très turbide ; nombreux débris végétaux
LM ₁₀	126. 6. 681	canyon	150	B		86,0		117,01	Prélèvement turbide
				A		82,0		116,01	
				B		89,5		117,01	
LM ₁₁	117. 7.681	canyon	100			66	801	111,5118	Quelques ca seulement ; granulométrie fraction non carbonatée seulement
LM ₁₂	126. 8.681	H ₂	170					12,271	
LM ₁₃	126. 8.681	H ₄	28			90			
LM ₁₄	112. 7.691	canyon	195			76		12,691	Pénétration faible (4 cm)
LM ₁₅	125. 3.701	CRG 23	304			99,5		23,5	
LM ₁₆	125. 3.701	plaine				99,0		121,51	
LM ₁₇	125. 3.701	centrale				99,0		121,51	

SEDIMENTS DU RHONE (R)

Berges									
R ₀	16. 1.681	embouch.				26	761	118 119	Suspensions à l'embouchure
R ₁	115.12.671	Porte	/	/		48		116 122	Étiage prononcé, lit du fleuve
R ₂	16. 8.681	Porte	/	/		21	941	116 115	Hautes eaux, berges
R ₃	116.10.681	Porte	/	/		53	801	124 130	Rasses eaux, 3 prélèvements
		Soex				31	901	129 134	sur la berge
R ₄	113.10.691	Porte				40		116 133	
R ₅	117.12.691	Passerelle				14	11051	121,5126,51	Rasses eaux, berge
R ₆	2. 7.701	Porte				25,5	11301		
		Soex				8,0	11151	12,5512,70116,5120	Hautes eaux, berge

PRELEVEMENTS A LA REMISE ECKMAN (L.B.)

pénétration : 10 à 20 cm									
LB ₁	130. 1.681	embouch.	22			33	941	114,5115	Sablon fin, organique noir, feuilles
LB ₂	130. 1.681	embouch.	23	S		35,5	941	113,0114,51	Sablon fin, très organique, noir
		Rhône		F				116,0120,51	Sablon
LB ₃	130. 1.681	Canyon	132			50,5	761	115,5112	Sablon noir
LB ₄	130. 1.681	Canyon	185	S		79,5	761	119,5113,51	Vase brun-noir
				F		36,0	11401	120,5112	Sablon, tiges de roseaux, feuilles

S = partie supérieure I = partie inférieure F.F. = fraction fine 40 m = médiane en microns
 M = partie médiane d_h = densité humide F.G. = fraction grossière 40 Q = indice de classement
 Prélèvements turbides : A sédiment déposé, B suspensions

TABLEAU IV₂ : ANALYSES PHYSIQUES DES SEDIMENTS DU LEMAN ET DU RHONE

n° archiv.	Date	Lieu	prof. m	niveau	% d. caul	granulométrie % F.F., m	densité sèche tot., F.F., F.G., F.F., F.G.	Ca CO ₃	Remarques et description
LB ₅	130. 1.681	Canyon	220	S		62		118 114	Vase bruno
LB ₁₁	1. 7.691	CRG 6	60	S		131011,171	99	140	Sablon, débris végétaux mélangé
				F		122011,231	96,5	140	Vase beige molle
LB ₁₂	2. 7.691	levée	175	S		96		113	Vase compacte grise à points noirs
		nord du canyon		F		96		113,51	Vase noire molle
LB ₁₃	2. 7.691	levée sud	185	S		92		118	Vase molle beige
				F		80	701	118 123	Sablon vaseux, débris organiques
LB ₁₄	2. 7.691	ancien	165	S		91		117	
		canyon sud		F		96		117	
LB ₁₅	2. 7.691	ravin du Bouveret	115	S		94,5	13201	114,01	Vase beige
				F		80,5		121,5116	Sable + cailloux + scories (3 modes)
LB ₁₆	117. 7.691	Baie de Sciez	25			55,4	11901	141 132,51	Sablon, débris végétaux, petits gastéropodes
LB ₁₇	9.10.691	avant Ouchy	103	S		72		130	Vase molle, sablonneuse
				F		7711,061	43 12501	12,5812,53132	Sable noir grossier, gros débris végétaux
LB ₁₈	9.10.691	avant Ouchy	195	S		12401	94	124	couche oxydée beige puis vase molle
				F		119011,301	99,5	118	Vase gris-clair compacte à points noirs
LB ₁₉	119.10.691	plaine centrale	298	S		13601	99,0	124	Comme LB ₁₈
				F		123011,251	99,5	118	
LB ₂₀	119.10.691	plaine centrale	309	S		136011,131	99,8	122	Comme LB ₁₉
				F		139011,281	99,8	120	
LB ₂₁	119.10.691	plaine centrale	309	S		12451	99,7	124	Comme LB ₂₀
				F		119511,281	99,7	124	
LB ₂₂	119.10.691	avant Evian	190	S		12201	98,5	133	Vase molle gris-foncé
				F		130011,371	98,0	126,11	Vase gris-foncé compacte, feuilles
LB ₂₃	119.10.691	avant Evian	100	S		7011,631	96,0	127	Vase molle
				M		97,5		125,51	Vase grise
				F		112011,411	88,5	126,01	Vase grise très compacte, quelques gros graviers
LB ₂₄	119.10.691	Canyon	223	S		38,5		115 119,51	Vase sablonneuse grise
		avant		M		7011,611	90,0	12,661	Vase compacte grise
		Locum		F		4011,841	37,5	12,7012,69116,5121	Sablon très compact
LB ₂₅	119.10.691	Canyon	225	S		7011,591	94,5	12,7412,79118	Vase sablonneuse molle
		avant		M		6411,661	83,0	12,6712,62120	Sablon
		Locum		F		331	39,0	12,7212,67116	Sable très compact
LB ₂₆	119.10.691	Canyon	272	S		93,5		12,921	Vase molle
		face		M		82,5		12,7212,61114	Sablon
		Hellerie		M2		3311,961	33,5	112,5119	Sablon
				F		3111,951	11,0	12,5712,7112,5122	Sablon
LB ₂₇	119.10.691	avant Evian	73	S		111511,481	90,5	127	Vase beige molle
				M		9011,511	96,5	12,5312,5312,69122	Vase compacte
				F		93,5		125	Vase compacte, caillou calcareux Ø 2 cm
LB ₂₈	123.10.691	Canyon	284	S		9511,481	98,5	110	Vase gris foncé
		avant		M		8511,501	97,5	116	Vase gris clair
		Lugrin		F		3811,751	44,0	12,7312,5412,73112	Sable ; 2 modes 0,25 et 0,05 mm
LB ₂₉	123.10.691	avant Lugrin	283	S		41,5	961	115 115	Vase sablonneuse
				M		17,5	11251	12,6912,5312,74113	Sablon
LB ₃₀	125. 3.701	Plaine centrale	304	S		98,0		121	Devant Amphion
				M		97,5		127,51	
				F		97,0		129	
LB ₃₁	125. 3.701	avant Disdille	267	S		99,5		121,51	
				M		99,5		122	
				F		99		123	
LB ₃₂	125. 3.701	avant Saint Disdille	235	S		99		125	
				M1		1100		127,51	
				M2		99,5		125	
				F		99,5		121,51	

TABLEAU IV₃ : ANALYSES PHYSIQUES DES SEDIMENTS DU LEMAN

	RHONE			DRANSE			LAC					
							Suspensions			Sédiments		
	m	min	max	m	min	max	m	min	max	m	min	max
SiO ₂	52,4	44,0	58,0	41,6	34,3	51,0	53,6	43,9	62,0	43,0	30,0	51,6
Al ₂ O ₃	14,8	11,5	17,8	11,8	9,0	15,8	10,6	1,5	16,5	11,3	7,2	14,2
MnO	0,118	0,085	0,180	0,108	0,085	0,152	0,124	0,075	0,165	0,115	0,062	0,490
Fe ₂ O ₃	6,1	4,72	8,2	4,10	3,00	6,26	5,15	1,8	7,7	4,04	2,86	5,15
K ₂ O	3,32	2,59	4,34	2,51	1,95	3,55	2,66	1,57	3,95	2,45	1,32	3,52
Na ₂ O	1,83	1,08	2,43	0,58	0,36	1,39	1,36	0,63	2,40	1,16	0,55	3,00
CaO	7,13	2,27	14,25	19,0	8,3	123,0	11,5	2,9	119,3	15,3	11,9	125,2
MgO	5,40	3,49	8,08	3,48	2,75	6,0	3,45	1,08	5,3	3,74	1,97	6,20
TiO ₂	0,72	0,60	0,95	0,55	0,49	0,62	0,59	0,15	0,79	0,59	0,36	0,86
P ₂ O ₅	0,28	0,18	0,49	0,22	0,12	0,55	1,51	0,30	5,25	0,21	0,16	0,41
perte 1000	7,7	4,6	12,7	16,8	12,3	19,2	9,7	4,23	16,7	17,8	14,0	18,1
perte 600										5,36	3,0	11,5

TABLEAU IV₄ : ANALYSES CHIMIQUES DES ELEMENTS MAJEURS DES APPORTS DU RHONE, DE LA DRANSE, DES SUSPENSIONS ET DES SEDIMENTS DU LEMAN. VALEURS MOYENNES ET EXTREMES.

m : valeur moyenne	Rhône : 16 analyses	suspensions : 12 analyses
min : valeur minimale	Dranse : 16 analyses	sédiments du lac : 37 analyses
max : valeur maximale		

REMARQUE : - Les analyses du Rhône, de la Dranse et des suspensions du lac sont exprimées par rapport à la fraction minérale seulement, c'est-à-dire après calcination à 600°C. Les analyses de sédiments du lac sont exprimées par rapport au sédiment total, fraction organique comprise.

- Pour les suspensions lacustres les pertes au feu théoriques ont été obtenues par différence.

TABLEAU IV₆ : ANALYSES CHIMIQUES DES ELEMENTS MAJEURS DES SEDIMENTS SUPERFICIELS DU LEMAN

N° archivage	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Perte à 600°C	Perte à 1000°C	
LM0	30,0	7,85	0,084	3,22	1,51	0,62	25,2	2,22	0,34	0,24	8,8	28,1	
LM1	34,5	8,8	0,128	3,361	1,75	0,75	21,8	2,52	0,39	0,19	6,9	23,8	
LM3	40,75	11,2	0,146	3,86	2,41	1,29	15,25	3,04	0,43	0,20	6,2	19,8	
LM6	44,2	12,5	0,085	4,50	3,01	1,56	12,3	4,25	0,53	0,29	4,6	15,0	
LM7 _B	40,7	12,1	0,063	3,30	3,52	0,78	14,15	5,54	0,60	0,19	4,0	16,9	
LM9 _B	49,2	11,9	0,075	4,85	2,72	1,43	12,3	4,67	0,68	0,22	3,9	14,4	
LM13	0,5 - 2 cm	43,4	10,1	0,295	3,65	2,02	0,78	15,4	3,28	0,56	0,20	9,7	22,0
	2 - 4	40,6	9,45	0,192	3,50	1,93	0,70	18,8	2,98	0,57	0,22	5,5	22,0
	4 - 7	40,0	9,07	0,129	3,22	1,81	0,97	20,0	2,85	0,47	0,16	6,0	21,2
	7 - 11	40,5	9,75	0,134	2,86	1,95	0,77	17,8	3,25	0,49	0,195	7,2	21,0
	11 - 13	43,0	11,05	0,144	4,15	2,35	0,89	14,7	3,22	0,51	0,19	7,0	18,4
LB1	44,5	12,3	0,080	4,80	2,65	1,36	10,8	4,15	0,70	0,41	7,4	14,9	
LB2 _S	46,5	12,6	0,091	5,15	2,68	1,43	10,6	4,35	0,76	0,375	5,6	14,0	
LB3	43,0	11,7	0,074	4,00	2,59	1,27	13,45	6,20	0,62	0,20	4,0	15,8	
LB4 _S	45,25	11,8	0,135	4,36	1,35	3,00	11,9	5,17	0,64	0,25	4,6	14,8	
LB5 _S	42,7	10,7	0,077	3,92	2,65	1,16	14,55	5,37	0,69	0,23	3,0	15,6	
LB11 _S	33,2	7,94	0,077	2,86	1,44	0,74	23,6	1,97	0,41	0,20	11,5	26,0	
LB12 _S	47,0	13,6	0,086	4,36	3,25	1,42	11,05	4,34	0,65	0,18	4,8	11,5	
LB14 _S	47,8	13,6	0,097	4,65	3,01	1,55	12,6	3,78	0,62	0,18	6,5	12,4	
LB16 _S	32,0	7,21	0,057	2,93	1,32	0,55	25,2	2,16	0,42	0,185	7,6	26,6	
LB17 _S	40,2	10,2	0,062	3,72	2,17	1,06	18,05	2,85	0,49	0,23	6,1	20,8	
LB17 _F	40,0	9,92	0,076	3,57	2,11	1,05	18,9	2,72	0,53	0,16	5,1	20,2	
LB18 _S	44,8	12,2	0,081	4,22	2,53	1,28	13,4	3,27	0,54	0,18	6,2	17,1	
LB19 _S	41,5	11,7	0,245	4,50	2,53	1,05	15,0	3,02	0,51	0,23	6,2	18,5	
LB21 _S	43,5	10,7	0,490	3,70	2,38	0,81	15,0	2,97	0,61	0,23	7,7	19,1	
LB22 _S	139,4	9,64	0,117	2,93	1,93	0,71	20,7	2,92	0,45	0,18	6,3	22,0	
LB23 _S	40,0	10,7	0,079	3,43	2,38	0,86	17,5	3,58	0,57	0,18	4,3	19,5	
LB24 _M	145,4	113,3	0,082	4,58	2,89	1,01	14,3	3,88	0,79	0,20	2,7	15,8	
LB24 _F	47,2	13,5	0,082	4,79	2,89	1,27	11,9	3,81	0,70	0,18	7,0	12,5	
LB25 _S	145,4	111,7	0,073	4,15	3,01	1,08	14,0	4,01	0,61	0,16	3,2	16,9	
LB25 _M	46,4	13,4	0,055	4,79	2,83	1,01	11,9	3,78	0,66	0,17	4,3	16,8	
LB28 _S	145,5	114,2	0,093	4,93	3,19	1,32	12,0	4,78	0,71	0,18	2,9	14,2	
LB28 _M	42,6	12,3	0,090	4,86	2,89	1,23	13,85	5,01	0,73	0,185	4,4	14,6	
LB28 _F	151,6	111,6	0,089	4,43	2,41	1,70	12,45	4,15	0,86	0,235	0,8	12,4	
LB29 _S	47,2	12,3	0,119	4,93	2,65	1,48	14,0	4,21	0,72	0,205	0,2	15,0	
LB29 _F	149,2	112,9	0,107	4,36	2,77	1,54	12,2	4,00	0,77	0,21	1,5	13,0	

TABLEAU IV : VARIATION DANS LES VASES DU LEMAN DES ELEMENTS
MAJEURS EN FONCTION DE LA TENEUR EN SILICE ET EN CO₂

Rapports	LB4 _S	LB2 _S	LB25 _S	LB19 _S	LM ₃	LM ₁	LM ₀	LB16	LB11	Valeurs extrêmes
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,261	0,271	0,258	0,282	0,275	0,255	0,262	0,225	0,239	0,271 - 0,225
Fe ₂ O ₃ /SiO ₂	0,096	0,110	0,094	0,108	0,095	0,097	0,107	0,092	0,086	0,110 - 0,086
CaO/SiO ₂	0,263	0,228	0,308	0,361	0,374	0,632	0,840	0,782	0,710	0,228 - 0,840
MgO/SiO ₂	0,114	0,093	0,088	0,073	0,075	0,073	0,074	0,068	0,059	0,114 - 0,059
Na ₂ O/SiO ₂	/	0,031	0,023	0,025	0,032	0,022	0,021	0,017	0,022	0,031 - 0,017
K ₂ O/SiO ₂	/	0,058	0,066	0,061	0,059	0,051	0,050	0,041	0,043	0,066 - 0,041
TiO ₂ /SiO ₂	0,014	0,016	0,013	0,012	0,011	0,011	0,011	0,013	0,012	0,016 - 0,011
P ₂ O ₅ /SiO ₂	0,0055	0,0080	0,0035	0,0053	0,0049	0,0055	0,0080	0,0056	0,0060	0,0080 - 0,0035
MnO/SiO ₂	0,0030	0,0020	0,0016	0,0059	0,0036	0,0037	0,0028	0,0018	0,0023	0,0059 - 0,0016
CaO/MgO	2,3	2,4	3,5	5,0	5,0	8,7	11,4	11,7	11,8	2,3 - 11,8
Al ₂ O ₃ /CO ₂	1,15	1,50	0,85	0,95	0,82	0,52	0,41	0,38	0,55	1,50 - 0,38
Fe ₂ O ₃ /CO ₂	0,42	0,61	0,30	0,36	0,28	0,20	0,17	0,15	0,19	0,61 - 0,15
CaO/CO ₂	1,16	1,26	1,02	1,22	1,12	1,29	1,30	1,33	1,62	1,02 - 1,62
MgO/CO ₂	0,50	0,52	0,29	0,24	0,22	0,15	0,11	0,11	0,13	0,52 - 0,11
Na ₂ O/CO ₂	0,130	0,170	0,080	0,085	0,095	0,045	0,032	0,029	0,051	0,170 - 0,029
K ₂ O/CO ₂	0,290	0,320	0,220	0,205	0,180	0,100	0,080	0,070	0,100	0,29 - 0,07
TiO ₂ /CO ₂	0,063	0,090	0,044	0,041	0,032	0,023	0,018	0,022	0,028	0,090 - 0,018
P ₂ O ₅ /CO ₂	0,024	0,044	0,011	0,018	0,015	0,011	0,012	0,009	0,014	0,044 - 0,009
MnO/CO ₂	0,013	0,011	0,005	0,020	0,011	0,008	0,004	0,003	0,005	0,020 - 0,003

CHAPITRE V



STRUCTURE ET REMPLISSAGE DE LA CUVETTE LEMANIQUE

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

C I N Q U I E M E C H A P I T R E
=====

STRUCTURE ET REMPLISSAGE DE LA CUVETTE LEMANIQUE

5.1. - Nécessité d'une étude sismique.

Plusieurs raisons nous ont poussé à effectuer une campagne de sismique continue. Tout d'abord malgré de nombreuses et fructueuses campagnes antérieures (Winnock, 1965; Glangeaud, 1964; Serruya, 1964; Houbolt et Jonker, 1968) qui font du Léman un des lacs les plus sillonnés en sondage sismique continue (figure V₁), aucune estimation du remplissage sédimentaire n'avait été fournie. Or le volume des sédiments postglaciaires est une donnée qui nous permet d'estimer les vitesses de sédimentations globales pour toute une période. De plus une étude sismique supplémentaire pouvait préciser certains points restés obscurs notamment la structure de la côte sud du lac. C'est pourquoi nous avons utilisé en Avril 1969 un canon à air, méthode différente des précédentes (sparker, boomer et gaz exploser, de moins grandes pénétrations). Enfin la structure de la cuvette lémanique nous apporte de précieuses données sur l'origine et l'évolution du Léman. Après les quelques centaines de kilomètres de profils sismiques effectués depuis 1966 nous avons essayé de faire le point des travaux de sismique avant que d'autres méthodes soient peut-être employées.

5.2. - Situation géologique de la cuvette lémanique, éléments apportés par les études sismiques.

5.2.1. - Structure de la région (figure V₂).

Le Léman est situé entre des domaines très différents : Jura au Nord-Ouest et Préalpes du Chablais et du Valais au Sud-Est. Entre

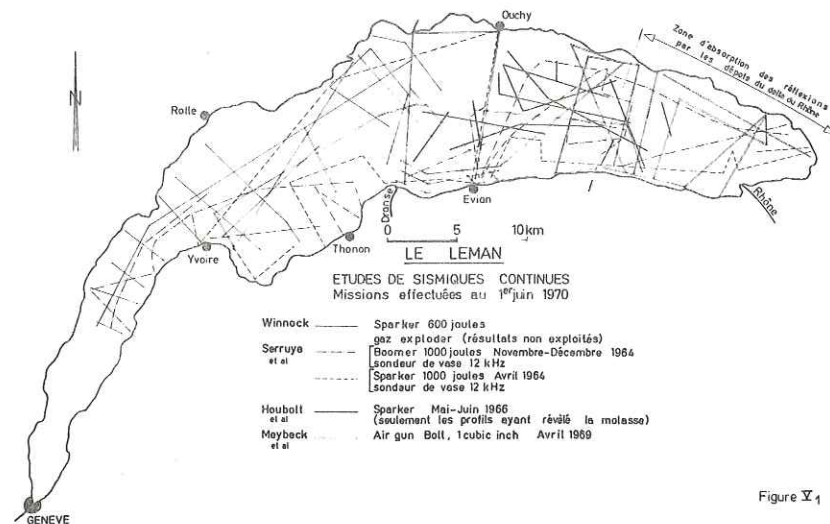


Figure V₁

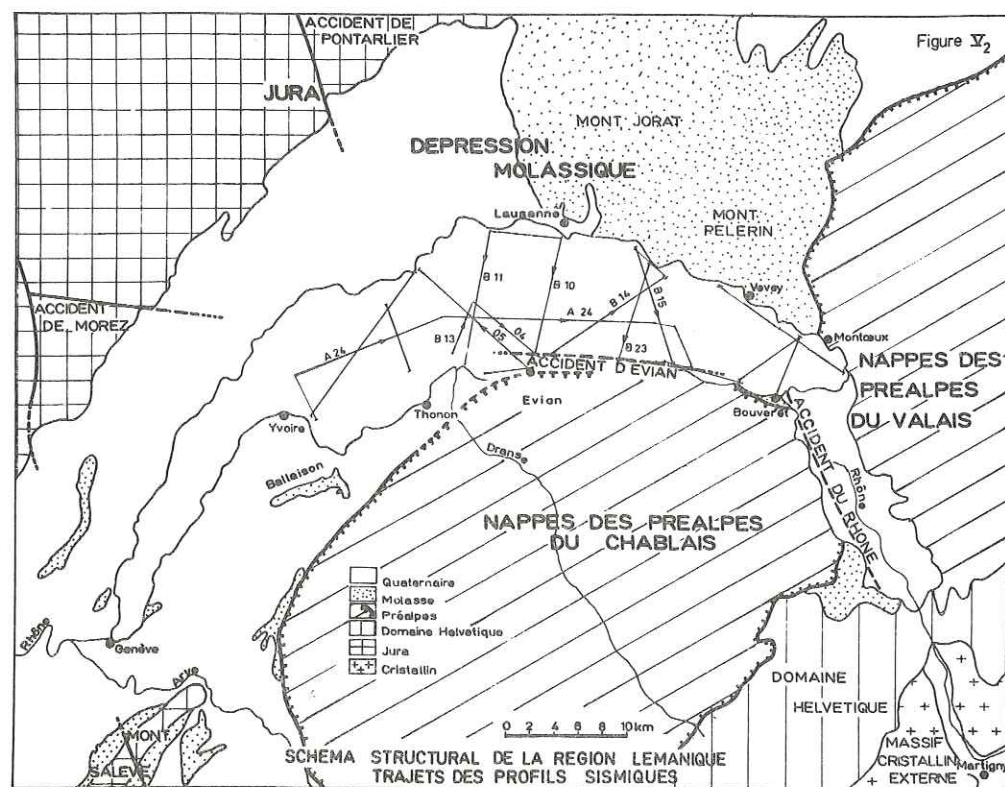


Figure V₂

ces deux ensembles se situe le plateau molassique suisse d'âge oligo-miocène sur lequel les nappes préalpines sont venues se déverser. Une partie de ces terrains a été légèrement atteinte, on distingue alors la molasse autochtone et la molasse subalpine. Enfin au Quaternaire se sont déposées des quantités considérables de dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires, souvent assez grossiers (moraines à blocs, conglomérats). Ces dépôts masquent la plupart des contacts anormaux et recouvrent une grande partie de la molasse notamment sur la partie méridionale du lac.

Plusieurs origines ont été proposées pour le Léman :

Gagnebin attribue la cuvette à un creusement par les glaciers ; mais l'origine tectonique, pressentie par Forel et exposée par Lombard (1939) semble maintenant la plus importante notamment à la suite des travaux de sismique (Serruya et al 1964) (Meybeck et al 1969).

5.2.2. - Les horizons rencontrés en sismique continue.

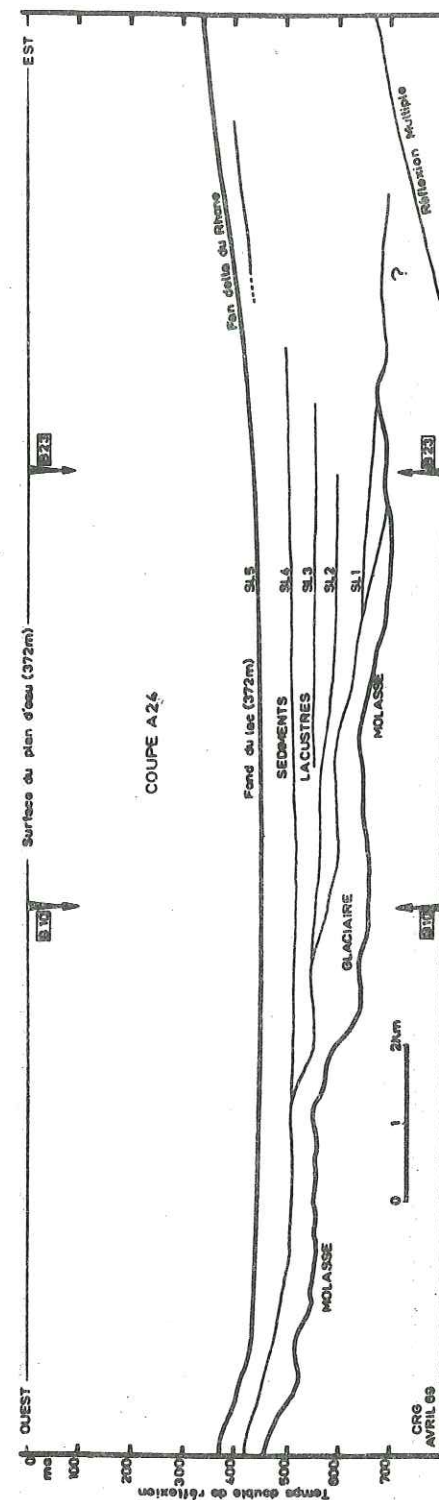
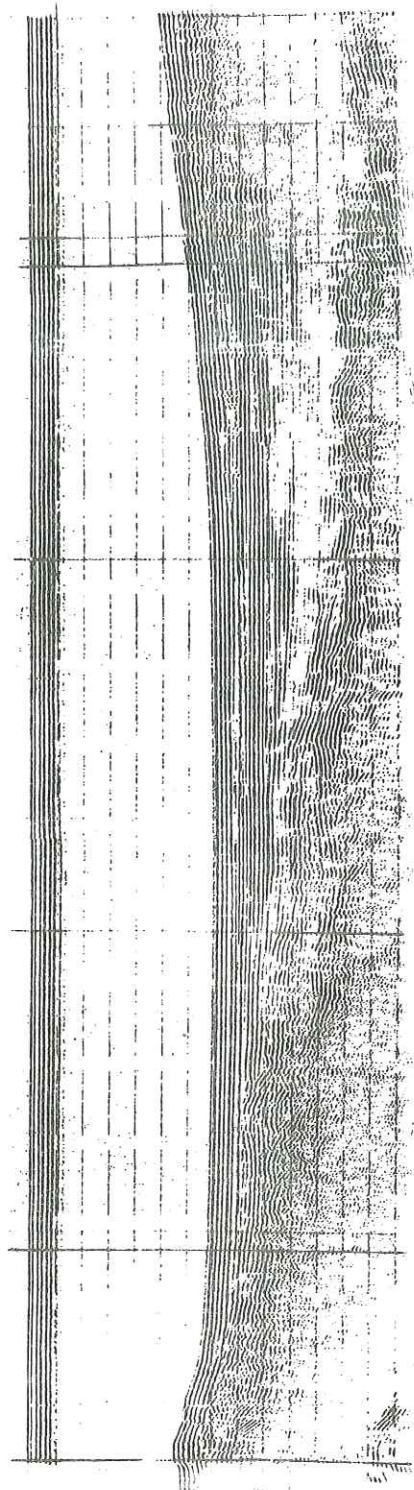
Quatre groupes d'études sismiques ont été effectués depuis 1964 (figure V₁), tous les auteurs ont décrit les deux horizons principaux rencontrés dans le tréfond lacustre, les *sédiments lacustres* et le *toit de la molasse*. Dans certains endroits comme la baie de Sciez ou la région d'Evian, où les terrains glaciaires affleurent, certains auteurs ont identifié un ou plusieurs *horizons glaciaires*. Une quatrième unité est visible sur quelques enregistrements, il s'agit des *nappes des préalpes* sur la côte méridionale du lac.

5.2.3. - Problèmes posés par l'identification des horizons.

Un réflecteur est identifié à coup sûr quand on peut le suivre depuis un affleurement côtier, c'est le cas de la molasse qui affleure largement en Suisse et qui est bien reconnaissable par le pendage de ses couches. Il en est de même pour le glaciaire si on peut le suivre depuis l'affleurement. Enfin, il n'y a aucun problème pour identifier les sédiments lacustres : les réflecteurs sont nets,

Coupe A₂₄

Figure V_{3a}



très réguliers et en général horizontaux particulièrement dans la plaine centrale du lac. Néanmoins un problème important d'interprétation se pose à l'endroit du contact du glaciaire^s sur la molasse. Ce contact est masqué par une forte épaisseur de sédiments lacustres. C'est ainsi que sur la même coupe Evian-Ouchy, nous avons donné (Meybeck, Hubert, Olive, Siwertz et Glangeaud 1969) une interprétation tout à fait différente de celle de Serruya. Au niveau du delta de la Dranse les choses se compliquent encore du fait des dépôts grossiers deltaïques de la rivière. Enfin plusieurs auteurs (Serruya, Houbolt) ont distingué un réflecteur intermédiaire sous les sédiments de la plaine centrale mais au-dessus de la molasse, sans l'attribuer avec certitude au glaciaire.

Le dernier problème soulevé est celui du R.P.E., Réflecteur Profond d'Evian, bien mis en évidence dans notre dernière campagne, nous l'avons rapproché de la molasse (Meybeck et al 1969), sans exclure la possibilité d'une nappe préalpine.

5.3. - Résultats de la campagne de sismique continue d'Avril 1969.

Cette campagne est le fruit d'un travail d'équipe qui a déjà fait l'objet d'une publication donnant les résultats dans leurs lignes principales. Nous présentons ici les résultats plus détaillés du dépouillement complet des enregistrements.

5.3.1. - Méthode d'étude. Appareillage.

Pour obtenir de grandes pénétrations, but de cette étude, nous avons utilisé le "canon à air" type Bolt du C.R.G. de Villefranche-sur-Mer, dont la chambre avait un volume d'1 inch cube et qui

^s Glaciaire est pris ici dans un sens général sans distinction du glaciaire et de l'interglaciaire.

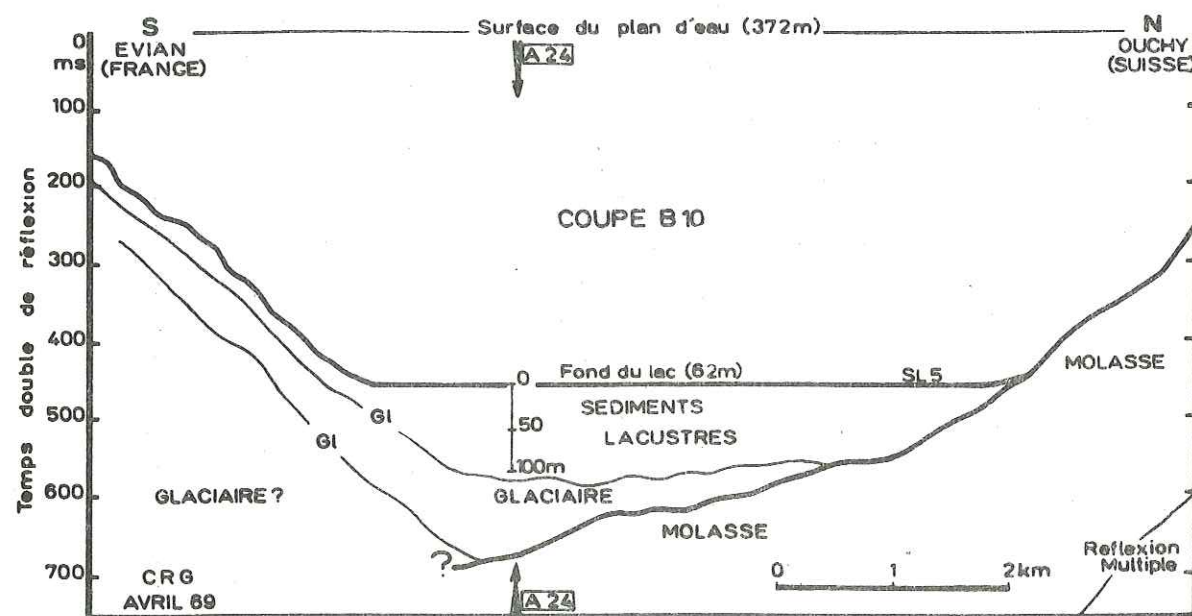
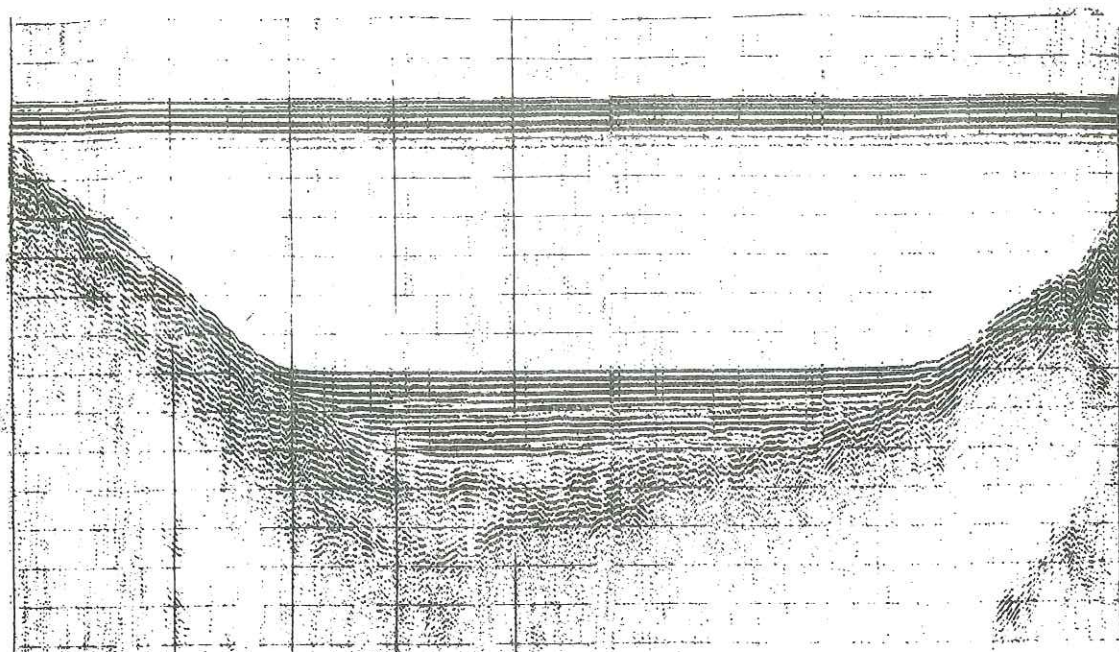


Figure V₃ Coupe B₁₀

produisait, toutes les 2 secondes, une explosion à une pression de 60 kg/cm². Ce canon était remorqué à 40 m du bateau ("Le Vendôme") tandis que l'"Anguille" contenant les hydrophones se trouvait à 200 m. Des essais préliminaires ont montré que la vitesse optimale du bateau était de 8 noeuds et que l'échelle de temps la plus appropriée était de 0 à 1 seconde. Le filtrage éliminant les bruits parasites a rendu les enregistrements particulièrement lisibles[§]. Le repérage du bateau était assuré par deux équipes de topographes munis de théodolites et en liaison constante avec le bateau par radiotéléphones. Le bateau était repéré toutes les deux ou trois minutes, au début et à la fin de chaque coupe, chaque fois enfin qu'il convenait de marquer le passage d'une structure intéressante.

Le trajet des coupes fut déterminé en fonction des résultats antérieurs de sismique, de la géologie des rives suisses et françaises et des accidents du relief sous lacustre. Deux cents kilomètres de profils de grande pénétration ont été ainsi réalisés. Nous avons réalisé un certain nombre de transversales et d'obliques qui ont toutes été recoupées par la grande longitudinale A₂₄ de 32 km (figure V₃) ; l'expérience a montré que les petits trajets étaient difficilement utilisables de même que les parties terminales des coupes où les hyperboles dues à la réfraction sur les pentes masquaient les réflecteurs. Ce fut notamment le cas près des côtes en face d'Evian, nous avons alors effectué des trajets parallèles à celles-ci qui se révélèrent extrêmement instructifs.

Le dépouillement des enregistrements a commencé par la mise en place des coupes les unes par rapport aux autres puis par l'identification des réflecteurs possibles sur chaque coupe. La vision globale des réflecteurs sur toutes les coupes nous a alors permis

[§] Je tiens à remercier Jean Petit du C.R.G. de Villefranche-sur-Mer qui a assuré toute la partie technique de cette campagne.

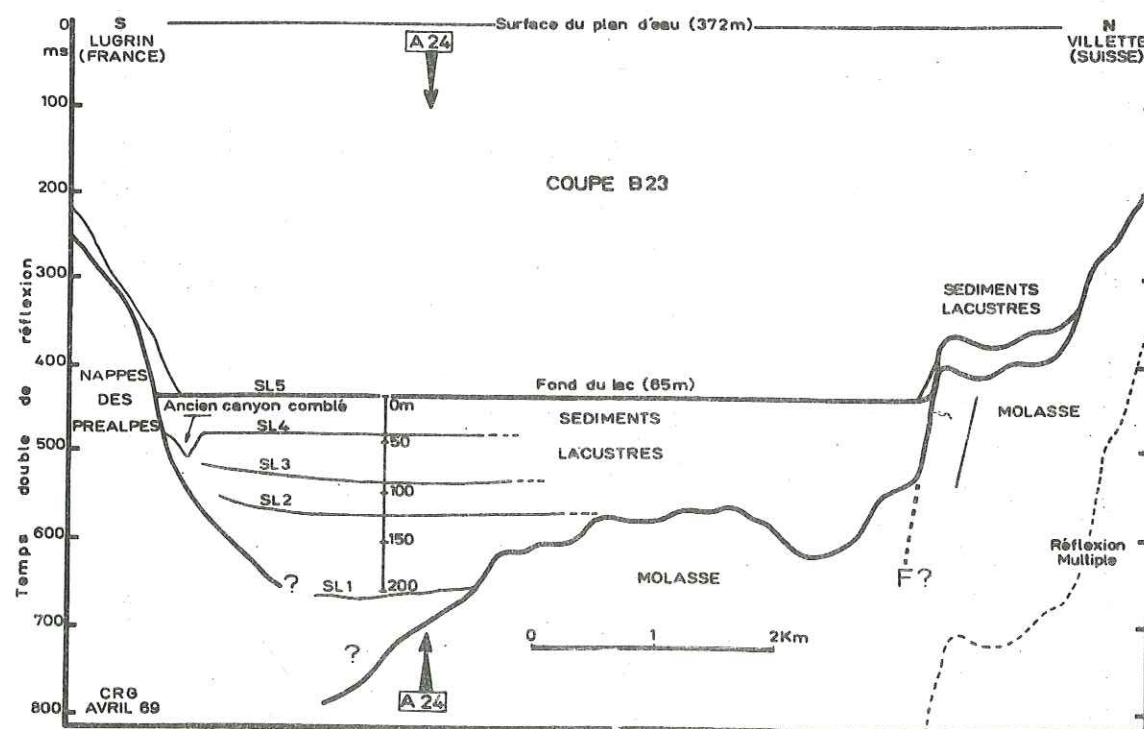
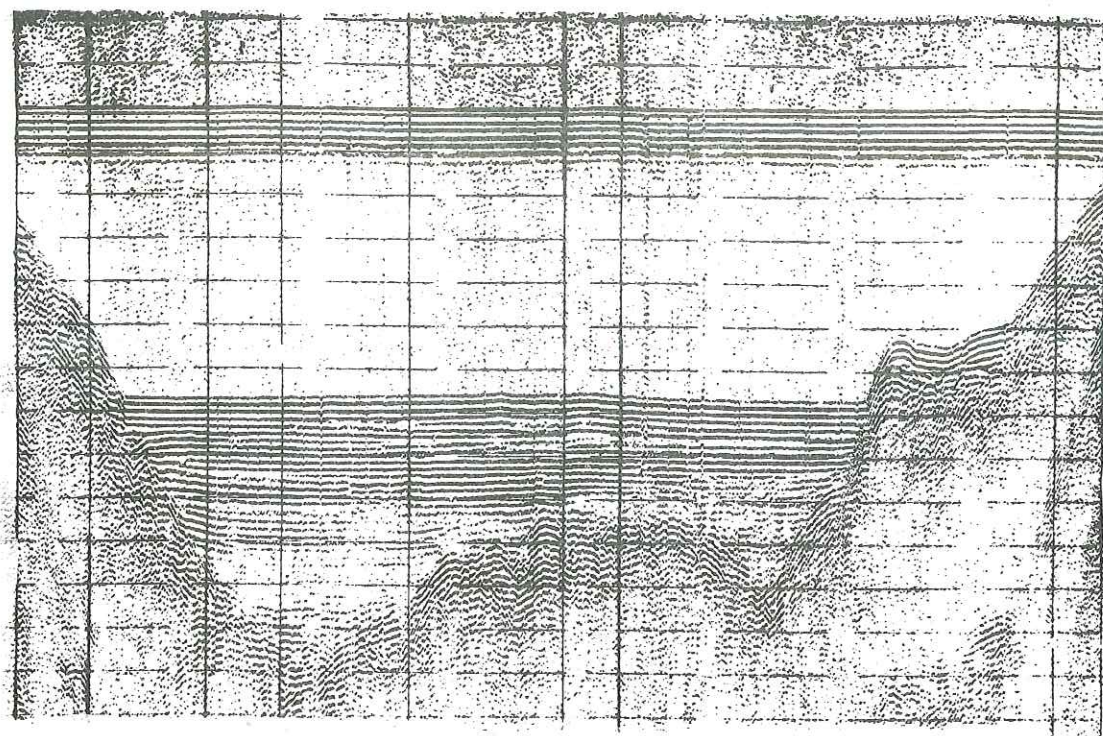


Figure V Coupe B₂₃

d'éliminer certaines réflexions secondaires pour ne garder que les principales. Néanmoins dans certaines zones les réflecteurs peuvent être mal déterminés du fait des très nombreuses réfractions (cas de la coupe A24 depuis Yvoire jusqu'au large de la Dranse). Les fonds étant souvent peu profonds et durs le dépouillement a quelquefois été gêné en raison de l'onde directe ou "bulle" et des "multiples" (bien visibles notamment dans la région du delta de la Dranse).

L'interprétation, facilitée par la qualité de l'enregistrement, s'est faite surtout d'après le recalage sur les affleurements à terre et aussi grâce aux multiples travaux antérieurs. Enfin signalons qu'à l'Est d'une transversale Rivaz-Locum les dépôts deltaïques du Rhône absorbent pratiquement toute l'énergie du canon à air, aucune réflexion profonde n'est plus alors visible.

Pour tenter de restituer les horizons à leur profondeur réelle nous avons choisi les vitesses suivantes, généralement adoptées dans les études semblables : sédiments lacustres 1 650 m/s, dépôts glaciaires 2 000 m/s. En l'absence de mesures directes par sismique réfraction ces valeurs ne sont qu'indicatives, aussi toutes nos coupes ont-elles été laissées en temps double de réflexion.

5.3.2. - Résultats.

L'identification du glaciaire sous les sédiments de la plaine centrale a été réalisée en comparant la coupe A24 (figure V₃) où cet horizon est bien suivi depuis Yvoire, où la moraine affleure, et les coupes B10, 05, 04 qui aboutissent à Evian où les terrains glaciaires ont été bien décrits (Blavoux, 1969). Le glaciaire est pratiquement absent sur le flanc nord de la cuvette lacustre. On peut alors identifier l'"horizon B" d'Houbolt et Jonker comme du glaciaire.

Une étude poussée effectuée en face d'Evian nous a fait

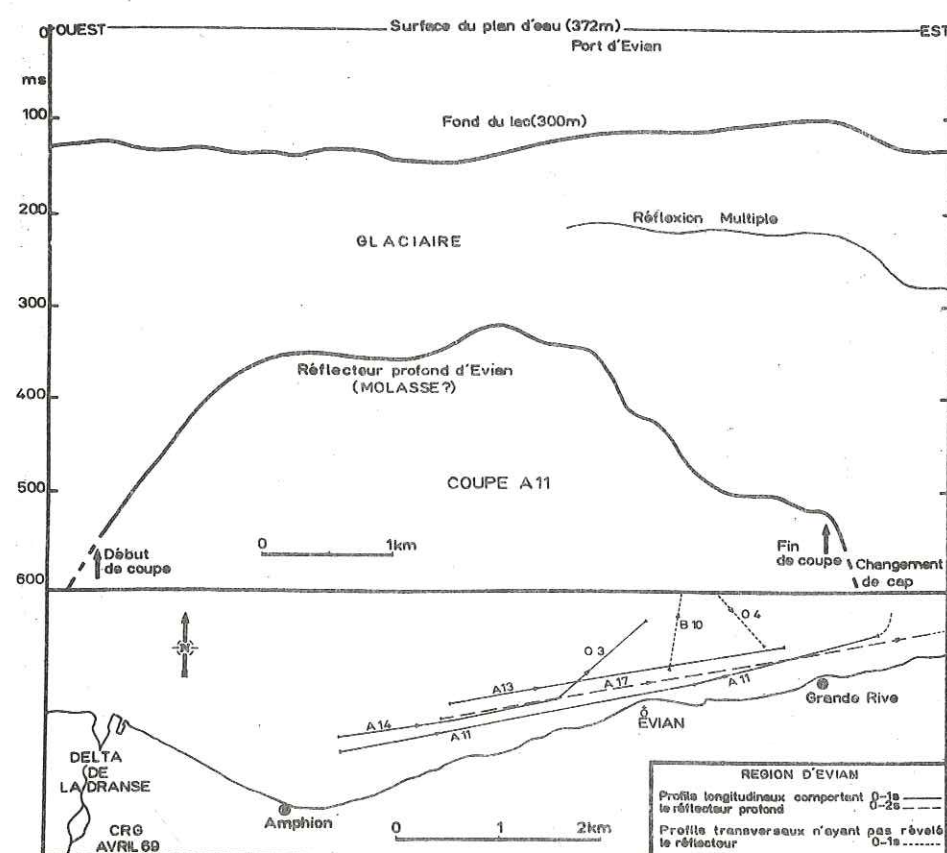
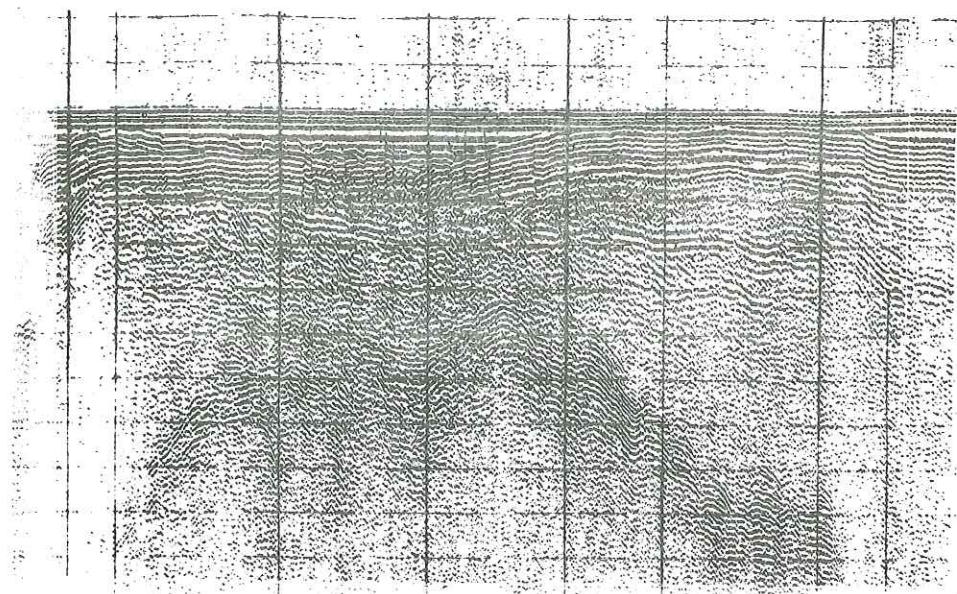


Figure V₄ Le Réflecteur Profond d'Evian

découvrir le toit d'un deuxième horizon glaciaire plus profond, l'épaisseur du premier niveau serait alors comprise entre 20 et 100 ms (temps double de réflexion soit environ de 20 à 100 m). Sur le flanc Sud du lac le *niveau glaciaire supérieur* reposerait alors sur un niveau glaciaire inférieur (au niveau d'Evian) et directement sur la molasse au centre de la cuvette lacustre.

C'est le toit de ce *niveau glaciaire inférieur* qui a sans doute été pris par Serruya pour la molasse, l'examen attentif des coupes B13, B11, O4, O5, B10 (figure V₃) et B14 qui traversent la rupture de pente entre le flanc Sud et la plaine centrale, nous pousse à penser que la molasse plonge sous cet horizon glaciaire, on perd ensuite la réflexion sur le toit de la molasse. Si vraiment le toit de la molasse remontait au droit d'Evian comme l'ont fait figurer tous les auteurs précédents (surtout Serruya car Houbolt et Jonker ont extrapolé leurs contours dans cette zone) il faudrait reconnaître dans le Réflecteur Profond d'Evian un terrain autochtone sous la molasse et vraisemblablement faillé.

Le *Réflecteur Profond d'Evian* (R.P.E.) (figure V₄) a été mis en évidence sur quatre coupes parallèles à la côte et très proches de celle-ci. Ce réflecteur se perd rapidement à plus de 600ms dès qu'on s'éloigne de plus de 800 m environ de la côte, c'est la raison pour laquelle il avait échappé aux précédentes campagnes. Du côté Ouest on le perd à cause du delta de la Dranse où il est masqué par les multiples, du côté Est nous l'avons suivi jusqu'au niveau de Tourronde sans le perdre. Notons que le R.P.E. a été repéré également sur la côte à Evian par prospection électrique, il remonte quelquefois très près de la surface (quelques dizaines de mètres).

Nous l'avons précédemment attribué à la molasse, il faut alors penser à une faille importante dans celle-ci d'un rejet de 800 ou 1 000 m. Cet accident de direction E-W appartiendrait au grand réseau des failles oligocènes intéressant le substratum cristallin du Jura et

des Alpes (L. Glangeaud 1947) et il est probablement à l'origine d'une anomalie gravimétrique de 25 mgals analogue à celle de la vallée du Rhône entre Martigny et le Bouveret (Gonet 1965 et 1969). Il est également possible que le R.P.E. soit le front des Préalpes du Chablais. Il s'agirait alors de la Nappe Ultrahelvetique. Cette interprétation est tout à fait possible, Blavoux (1969) avait déjà noté que les caractéristiques hydrochimiques des sources entre Evian et Amphion étaient très proches de celles où les affleurements d'Ultrahelvetique sont bien connus (région de St-Gingolph). Nous aurions alors une configuration sous-lacustre analogue à celle de la zone entre Lugrin et le Bouveret où les préalpes plongent abruptement dans le lac. Cela n'exclue évidemment pas l'existence d'un accident important.

Enfin signalons qu'on distingue jusqu'à cinq réflecteurs secondaires (SL₁, SL₂, SL₃, SL₄, SL₅) dans les *sédiments lacustres*, le dernier étant sans doute recouvert par les dépôts détritiques du cône sous-lacustre qui fait suite au canyon du Rhône. Bien que le canon à air n'ait pas une définition suffisante pour l'étude des sédiments superficiels, ce n'était pas le but de la campagne, notons toutefois sur la coupe B23 un ancien canyon remblayé par la dernière série de sédiments lacustres (figure V₃). L'origine de ces réflexions secondaires est sans doute due à des niveaux beaucoup plus détritiques. On peut y voir les apports de crues millénaires du Rhône ou encore les restes de phénomènes paroxismiques discontinus comme la rupture de lacs formés par la réunion de deux cônes de déjection dans la vallée du Rhône, ou de celle d'immenses poches d'eau intraglaciales. Seul des carottages profonds au centre du lac pourraient préciser la nature de ces niveaux.

5.4. - *Essai de synthèse des résultats obtenus par sismique continue.*

5.4.1. - *Le substratum molassique.*

Nous avons construit (figure V₅) une carte des isochrones du toit de la molasse à partir de celles de Winnock, Serruya et Houbolt ; la topographie de ce toit a été figurée en termes géographiques (barre, vallée, butte, fosse) et non en termes structuraux. Seuls les accidents remarqués par plusieurs auteurs ont été figurés et pour la partie méridionale du lac nous n'avons porté que le R.P.E. Enfin nous avons fait figurer les principales données structurales sur la molasse sur la périphérie du lac. On note tout de suite deux directions privilégiées :

- un axe Sud-Ouest Nord-Est qui correspond à l'orientation générale du Petit Lac et aux axes anticlinaux de Messery et de Morges, les fosses d'Yvoire et de Messery seraient alors des surcreusements dans le synclinal molassique qu'occupe le Petit Lac (Serruya). La barre d'Yvoire-Allaman bien décrite par Winnock et Serruya serait le prolongement de l'anticlinal de Messery auquel correspondrait celui de Morges avec un décalage sans doute dû à un décrochement.

- à partir de St-Sulpice toute la topographie molassique s'oriente Nord-Ouest Sud-Est c'est le cas notamment pour la barre d'Ouchy et la vallée de Villette. Cette dernière est due sans doute à une grande faille qu'il faudrait relier à l'accident de la vallée du Rhône. Enfin notons les deux petites "vallées" de Morges et de St-Sulpice qu'il faut rapprocher des synclinaux et anticlinaux connus à terre dans cette région.

Le chevauchement de la molasse subalpine sur la molasse autochtone bien visible à Lausanne se poursuit sans doute au niveau de la cuvette lacustre : cet accident est visible sur la partie Ouest de la coupe A24 et sur la coupe 05 (Evian-St-Prex). Il aurait plutôt une direction Nord-Est Sud-Ouest et se raccorderait à terre au niveau du Mont de Boissy. La dorsale Pully-Evian dans la molasse décrite par

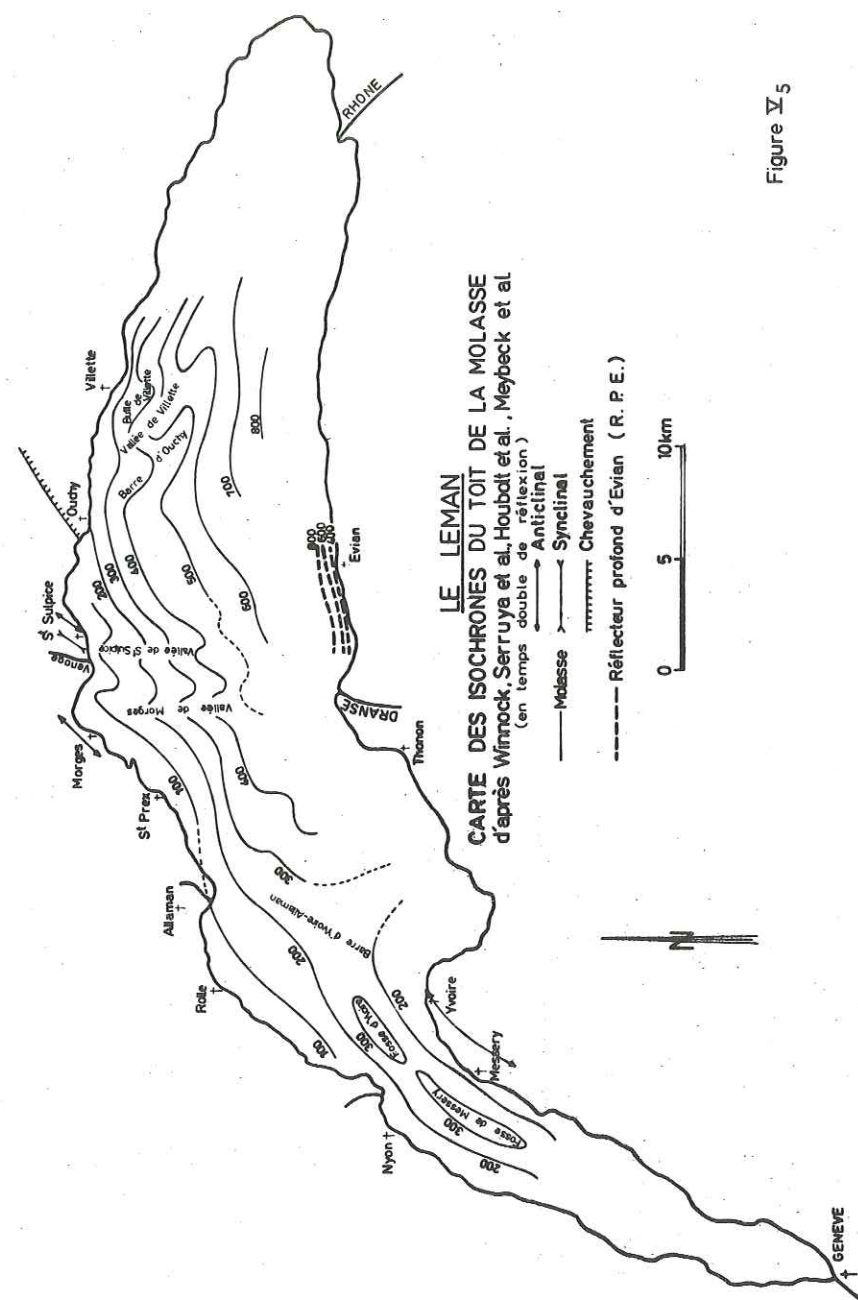


Figure 5

Serruya n'a plus alors de raison d'être.

Enfin sur la côte méridionale du lac passe le grand accident d'Evian précédemment décrit. C'est là notre principal point de divergence avec les travaux précédents. Il n'y aurait pas eu une "grande vallée creusée par l'érosion fluviale" (Serruya) mais une dépression tectonique due au jeu de grands accidents d'âge oligocène et qui sont peut être encore actifs définissant ainsi une fosse de subsidence dans la partie orientale de la cuvette lémanique.

5.4.2. - *Épaisseur des niveaux glaciaires.*

Nous avons porté sur la figure V₆ l'épaisseur du niveau glaciaire supérieur d'après les données d'Houbolt et Jonker 1968 (carte des isochrones de l'"intervalle A-B") et les nôtres. Nous n'avons pas fait figurer sur cette carte les niveaux glaciaires pour le Petit Lac et la baie de Sciez tels qu'ils ont été décrits par Serruya. On remarquera l'absence presque totale de glaciaire sur la côte septentrionale de la cuvette où la morphologie sous-lacustre est directement modelée par la molasse (cas de la butte sous-lacustre de Villetta qui serait une île si le niveau du lac baissait de 240 m). Sur la côte sud par contre le bombement sous-lacustre général à Evian est dû aux dépôts glaciaires. Il est probable que les dépôts glaciaires atteignent dans cette zone une épaisseur globale de plusieurs centaines de mètres. On notera également d'importantes quantités de glaciaires au centre et à l'Est de la cuvette.

5.4.3. - *Épaisseur et volume des sédiments lacustres.*

La figure V₇ montre l'épaisseur des sédiments à partir d'une épaisseur minimale de 40 ms environ (50 m). Nous n'avons pas pu décrire le phénomène plus finement, le canon à air n'ayant pas la même résolution que le sondeur de vase. Il est néanmoins probable que dans toute la zone septentrionale et occidentale de la cuvette l'épaisseur des sédiments soit plutôt de l'ordre de 20 m environ (Glangeaud et al, 1964, avec le sondeur de vase). On remarque les épaisseurs considé-

rables (350 m environ) vers Meillerie mais l'absorption des échos au-delà de la transversale Rivaz-Locum nous oblige vers le Rhône à extrapoler ces contours pour calculer le volume global des sédiments lacustres et deltaïques : comme on note dans cette zone à la fois un enfoncement du toit de la molasse et un relèvement des fonds, les dépôts atteignent sans doute 500 m d'épaisseur. Il faut rapprocher cette estimation aux travaux de Gonet sur l'épaisseur des alluvions dans la vallée du Rhône : la méthode employée (gravimétrie) ne permettait pas de différencier les dépôts deltaïques des dépôts glaciaires. La carte du bed-rock donne une profondeur de 500 m entre Villeneuve et le Bouveret.

Nous avons porté sur la figure V₈ une synthèse des travaux effectués par les deux méthodes. Jusqu'à Locum il est encore possible de différencier les dépôts glaciaires, des sédiments lacustres et deltaïques. Les volumes estimés suivants englobent les deux types de dépôts :

- vallée du Rhône entre Bex et le Bouveret :	18 km ³
- delta sous-lacustre du Rhône entre le Bouveret et Locum	: 30 km ³
- sédiments et glaciaire supérieur de la plaine centrale	: 20 km ³
- sédiments du reste du lac (flanc de la cuvette et Petit Lac)	: 15 km ³
TOTAL	83 km ³

Ces chiffres ne tiennent pas compte ni du delta de la Dranse ni d'une grande épaisseur de glaciaire probable au niveau d'Evian. Nous pensons que sur ce volume global les 1/4 sont à mettre réellement au compte de dépôts de glaciaire supérieur, il

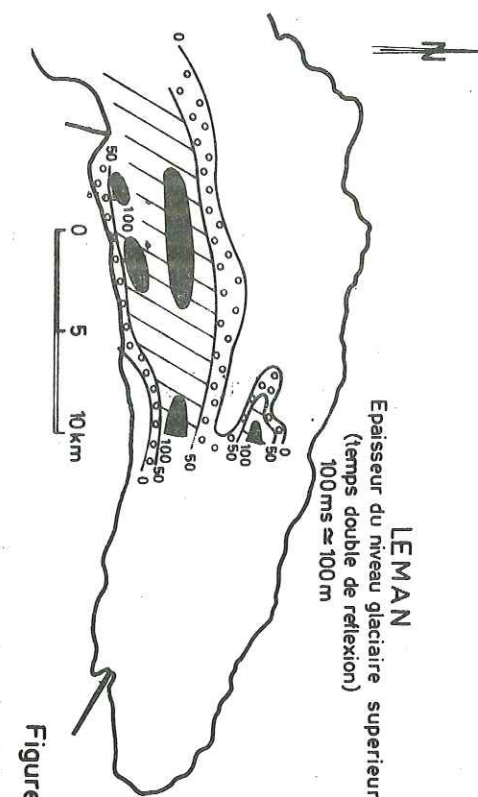


Figure V6

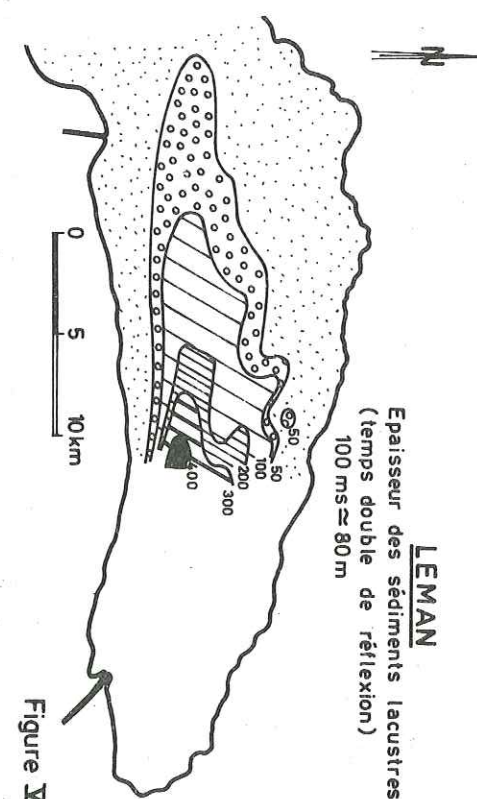


Figure V7

SCHEMA DU REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE DE LA VALLEE DU RHONE ET DE LA CUVETTE LEMANIQUE

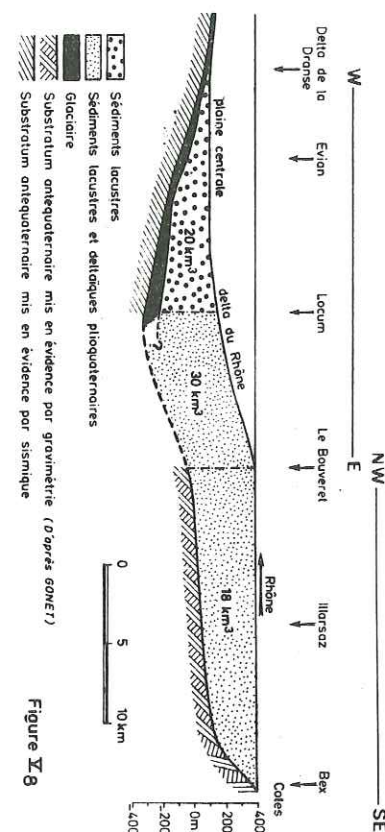


Figure V8

resterait pour les dépôts lacustres et deltaïques postglaciaires un volume de 60 km^3 environ. *En estimant la masse totale des dépôts, qui peuvent être compactés assez fortement, à $120 \cdot 10^9 \text{ t}$, et le retrait des derniers glaciers à 15 000 ans (J. Sauvage, 1969), on aurait une moyenne de 8 millions de tonnes/an pour l'ensemble de cette période.* Ce chiffre est du même ordre de grandeurs que les données de la période actuelle (6 à 7 millions de tonnes). Notons la concordance entre les données obtenues à des échelles très différentes (quelques dizaines d'années et quelques dizaines de milliers d'années). Cependant les estimations faites sur des grandes périodes, quoique paraissant beaucoup plus imprécises, nous semblent quand même plus valables car elles intègrent alors les phénomènes très exceptionnels dont nous avons parlé et dont la probabilité d'apparition à l'échelle de temps humaine est très faible.

5.5. - Comparaison entre la structure du Léman et celle du Bodensee.

Une fois de plus nous sommes amenés à comparer les deux grands lacs alpins : dans deux notes G. Müller et R.A. Gees (1968 et 1970) ont décrit les résultats d'une campagne de sismique continue effectuée sur le Bodensee. Comme pour le Léman, 3 horizons ont été trouvés : molasse tertiaire, glaciaire et sédiments lacustres, la topographie générale de la cuvette étant due à la molasse. Le travail de Müller basé sur de très nombreuses transversales montre l'existence d'une profonde vallée dans la molasse remplie de dépôts pleistocènes (80 m au maximum) et holocène (90 m). Ces dépôts augmentent également vers le delta du Rhin où le quaternaire atteint une épaisseur de 336 m. Les similitudes structurales des deux lacs sont grandes, néanmoins Müller et Gees pensent que la cuvette du Bodensee a plutôt une origine glaciaire que tectonique.

5.6. - Conclusions.

Nous avons vu tous les progrès que les études de sismique

continue ont apportés à la connaissance de la structure et du remplissage. Cette méthode devrait beaucoup se développer pour l'étude des grands lacs. Une fois de plus la limnologie et l'océanographie se rejoignent. Les principaux résultats acquis sont les suivants :

- *Le Léman a une origine essentiellement tectonique : il y a eu remplissage d'une fosse délimitée par des accidents d'âge oligocène mais qui ont rejoué au Pontien et au Quaternaire (phase néotectonique générale de l'Europe occidentale de L. Glangeaud).*

- *La morphologie des fonds sous-lacustres est modelée sur celle de la molasse pour toute la partie septentrionale du Grand Lac ainsi que pour le Petit Lac. La topographie du toit de la molasse est alors essentiellement structurale et correspond à des accidents et à des plis bien connus à terre. Sur le flanc méridional de la cuvette les dépôts glaciaires, qui peuvent être très importants, ont déterminé la morphologie des fonds.*

- *Le remplissage sédimentaire considérable est sans doute lié à une subsidence de la fosse, d'une côte de moins 300 m par rapport au niveau marin actuel, qui constitue le tréfond de la partie orientale du Léman. Le volume global des dépôts holocènes lacustres et deltaïques peut être estimé à au moins 60 km^3 .*

Néanmoins il reste de nombreux points à préciser dans la structure du Léman : le plus important nous semble être l'identification du R.P.E. qui peut se faire soit par sondage sur la côte soit en employant d'autres méthodes de sismique plus puissantes : (le flexotir). Il faudrait également préciser la topographie de la molasse dans la baie de Sciez et la barre d'Yvoire-Allaman, une très récente campagne entreprise par le B.R.G.M. avec la collaboration des Laboratoires de Géologie de Genève et du C.R.G. de Thonon (projet GEOLEM) devrait permettre de lever ces imprécisions. La prospection

magnétique par magnétomètre à protons devrait également apporter de nouvelles données, mais seul un sondage profond implanté au large de Meillerie pourra vraiment nous faire connaître la chronologie de tout l'holocène et l'évolution du lac.

CHAPITRE VI



CONCLUSIONS

SIXIEME CHAPITRE

CONCLUSIONS

Nos conclusions porterons : d'abord sur les résultats proprement dits, puis sur la façon d'y parvenir, c'est-à-dire la méthodologie.

6.1. - Conclusions spécifiques.

6.1.1. - L'érosion dans le bassin versant du Léman.

L'étude des apports en suspensions et des apports dissous, tant au point de vue dynamique que chimique, a été effectuée sur les bassins versants du Rhône (5 200 km²) et de la Dranse (550 km²), qui représentent environ 78 % du bassin versant d'alimentation du Léman et 85 % des apports liquides. Cette étude a permis de mettre en évidence les faits suivants :

- l'érosion globale dans cette partie des Alpes est très forte, de l'ordre de 1 500 t/km²/an. La part de l'érosion chimique est plus grande pour le bassin de la Dranse (470 t/km²/an) que pour le Rhône (210 t/km²/an). Cette différence est explicable en première analyse par la nature des terrains essentiellement calcaires pour le Chablais et cristallins pour le Valais, et les débits spécifiques plus élevés de la Dranse. Mais dans l'ensemble *l'érosion par dissolution ne représente qu'un tiers de l'érosion totale.*

- tous les éléments ne sont pas libérés de la même façon dans les processus d'érosion. *La silice provient à 99 % de l'érosion détritique, le calcium et les carbonates proviennent à part*

égale des dissolutions et des désagréations, tandis que la plus grande partie des composés sulfurés est transportée sous forme dissoute.

- l'érosion détritique augmente suivant une loi puissance lors des crues $C_s = A Q_1^B$ avec $B > 0$. Pendant quelques jours de crue, la rivière peut alors transporter autant de matériaux que pendant une année entière. En même temps l'érosion chimique, qui devrait alors être très faible en raison des coefficients de ruissellement élevés, atteint une valeur minimale limitée. *Si la dissolution et la désagréation des reliefs sont des phénomènes permanents, le transport des matériaux se fera donc principalement lors des crues.*

- l'origine des éléments majeurs dissous a pu être étudiée par les variations des éléments en fonction du débit. Ainsi les concentrations en sulfates, magnésium, et dans une moindre mesure en calcium et carbonates sont des fonctions décroissantes du débit du type : $C_d = A Q_1^B$

avec C_d = concentration en éléments dissous, Q_1 = débit liquide.

A et B coefficients numériques où $B < 0$. Ces éléments proviennent donc en grande partie des dissolutions par les eaux souterraines.

- La silice par contre, est en général constante ; elle provient essentiellement des altérations superficielles. Les concentrations en chlorures, nitrates sont très irrégulières et dépendent de la période de l'année, de l'état de lessivage du bassin, etc... Ce comportement suggère une origine artificielle (engrais, pollutions etc...), masquant l'origine naturelle de ces éléments qui se trouve principalement dans les précipitations pour le sodium et les chlorures.

6.1.2. - La sédimentation du Léman.

- Les sédiments du Léman sont dans leur majeure partie d'origine détritique. Les apports du Rhône, principalement des particules fines transportées en suspension, conditionnent largement la sédimentation du Léman. Il y a deux processus de transport de ces apports : au phénomène général de transport sous forme de suspensions correspondent les vases fines (2 à 10 μ) que l'on trouve partout dès qu'on s'éloigne de quelques centaines de mètres des embouchures. Mais il existe en plus dans le Léman un phénomène rare dans les lacs : *les courants de turbidités*. Nous avons pu les mettre en évidence par des études sédimentologiques classiques mais aussi par un traceur naturel des eaux, le tritium. Ces courants, transportant des matériaux plus grossiers, sont localisés dans les canyons sous-lacustres qui partent du Rhône pour aboutir à la région centrale du Léman. Il se constitue alors un cône résultant du dépôt des sédiments grossiers (turbidites). Plusieurs canyons ont été repérés par des profils d'écho-sondeur, mais il semble qu'actuellement un seul soit régulièrement le siège de courants de turbidités provoqués par les fortes crues du Rhône.

- Dans l'ensemble du lac il y a précipitation de carbonates d'origine biochimique au niveau de l'épilimnion. En général ces particules se redissolvent dans les couches profondes mais dans les zones côtières et surtout dans le Petit Lac cette redissolution est minime, une grande part du sédiment est alors constituée par des carbonates précipités. Dans le Grand Lac cette proportion ne dépasse guère 30 %. Dans le Petit Lac par contre, d'une profondeur moyenne de 40 m elle peut atteindre 70 %. Enfin il est important de noter que seul le carbonate de calcium est précipité, le magnésium participant très peu à ce processus de précipitation.

- Une première étude des variations comparées des éléments majeurs constituant les vases du Léman nous a permis de différencier

les éléments par groupes :

- les éléments liés aux aluminosilicates surtout argileux (illite et chlorite) sont par degré de liaison décroissant : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , Na_2O et TiO_2 .

- une partie de la silice dosée est sous forme de quartz fin et de tests siliceux (diatomées).

- le calcium peut provenir des apports détritiques mais dans les zones éloignées du Rhône ou peu profondes, cette origine devient secondaire, devant le calcium d'origine biochimique.

- Enfin le manganèse et le phosphore ont un comportement très à part, l'un par sa forte variabilité, l'autre par sa constance. L'origine de ces variations n'a pas pu être encore trouvée.

6.1.3. - Composition chimique des eaux du Léman.

L'étude des eaux du Léman a été poursuivie pendant plus de deux ans en 8 stations hydrologiques réparties sur tout le lac. La comparaison de plus de 700 analyses d'éléments majeurs nous a permis de mettre en évidence les faits suivants :

- Dans son ensemble le lac est caractérisé par une grande stabilité chimique des éléments majeurs : la composition moyenne des eaux est constante d'une année à l'autre et n'a guère varié depuis 100 ans. De plus, à profondeur identique, les eaux ont sensiblement la même composition moyenne annuelle d'un bout à l'autre du lac.

- Si le lac est bien mélangé latéralement, il n'en est pas de même verticalement. Il y a une différence nette entre la couche supérieure (0 - 50 m) et les couches profondes qui sont beaucoup plus

stables au point de vue chimique :

- La couche supérieure est le siège d'importantes variations saisonnières, essentiellement liées au cycle biologique du plancton, mais aussi aux conditions de température. Ainsi en Septembre l'hypolimnion s'appauvrit fortement en bicarbonates et en calcium par précipitation de CaCO_3 due à la présence de CO_2 dégagé par le plancton, des pH élevés (jusqu'à 8,6) et des fortes températures (20°C). Les éléments liés au cycle organique, comme la silice et les nitrates, présentent des variations très importantes directement opposées au développement du plancton.

- Les couches profondes sont beaucoup plus stables et homogènes au point de vue chimique. On note cependant une augmentation régulière et nette des bicarbonates et du calcium avec la profondeur, elle correspond sans doute de la dissolution des carbonates précipités. Les sulfates présentent également des valeurs plus élevées dans les couches profondes que dans la couche supérieure mais cette élévation n'est pas régulière jusqu'au fond du lac. La silice, qui est l'élément le plus variable du lac, présente toujours une augmentation dans les couches profondes. Cette élévation provient sans doute de la dissolution du test siliceux des diatomées.

- Un certain nombre d'éléments sont presque invariants dans le Léman, il s'agit en particulier du potassium, du sodium et des chlorures. Le magnésium est presque constant, ce qui souligne un comportement bien différent de celui du calcium.

- A la fin de l'hiver le Léman est presque entièrement homogène au point de vue des éléments dissous. Seule la silice présente encore des concentrations plus élevées à partir de 200 m de profondeur. Cette homogénéité n'est sans doute qu'apparente, en effet les études isotopiques effectuées par le tritium ont montré que même en hiver le Léman présentait trois couches de comportement

dynamique différent (0 à 50 m, 50 m à 200 m et 200 m au fond). L'homogénéité chimique des eaux, variable suivant les hivers, est sans doute réalisée beaucoup plus par diffusion, les températures étant identiques sur toute la colonne d'eau, que par mélange des masses d'eaux.

- L'eutrophisation du Léman s'est traduite par une modification profonde des conditions biologiques, les changements quantitatifs et qualitatifs de la transparence en sont un exemple type. Ce phénomène est surtout lié aux apports considérables depuis 30 ans, d'éléments nutritifs azotés et phosphorés. A part ces éléments, qui représentent moins d'1 % des sels dissous, la composition chimique du Léman est restée remarquablement constante depuis 100 ans, contrairement aux Grand Lacs américains dont l'eutrophisation est largement d'origine industrielle.

6.1.4. - Remplissage de la cuvette lémanique et bilan du bassin versant du Léman.

- Devant la variabilité des taux de sédimentation et la difficulté de leur estimation, une étude globale du remplissage de la cuvette lémanique a été entreprise par sismique continue. Cette étude a permis de mettre en évidence l'épaisseur énorme des dépôts post glaciaires allant jusqu'à 400 m dans le delta du Rhône. Des cartes des épaisseurs des sédiments, du niveau glaciaire supérieur et du toit de la molasse ont pu ainsi être réalisées. Les résultats de cette campagne concordent bien avec ce qu'on savait de la structure de la vallée du Rhône. Par contre nous avons pu mettre en évidence pour la première fois la présence d'un important accident tectonique Est-Ouest au niveau d'Evian. Ce fait est un argument supplémentaire pour une origine tectonique du Léman. L'étude sismique a abouti à une estimation des apports détritiques ($8 \cdot 10^6$ t/an). Cette valeur qui est une moyenne depuis le retrait des derniers glaciers Würmiens concorde avec les estimations basées sur les mesures actuelles.

- Le bilan moyen global du bassin versant du Léman se présente de la façon suivante pour un bassin versant (Léman compris) de 8 000 km² :

TABLEAU VI₁ : BILAN DU LEMAN

Entrées dans le lac (Rhône, Dranse, autres affluents)		Sorties du lac à Genève
Fraction liquide	$7,3 \cdot 10^9$ m ³ /an	$7,5 \cdot 10^9$ m ³ /an
Fraction solide	$8 \cdot 10^6$ t/an	$0,03 \cdot 10^6$ t/an
Fraction dissoute	$1,8 \cdot 10^6$ t/an	$1,5 \cdot 10^6$ t/an

Le déficit du bilan hydrique est dû à la difficulté d'évaluer le ruissellement direct au Léman. De toutes façons, si des sources sous-lacustres existent, leur débit doit être faible par rapport aux apports directs.

La précision, encore faible, du bilan des éléments dissous ne permet pas la mise en évidence par cette méthode des précipitations chimiques ou biologiques. Mais ce phénomène a été remarqué par l'étude de la composition chimique des eaux et des sédiments.

6.1.5. - Comparaison du Léman et du Bodensee.

Tout au long de ce travail nous avons remarqué la grande similitude entre le Léman et le Bodensee (Lac de Constance). Nous avons reporté dans le tableau VI₂, les données hydrologiques, géochimiques, et sédimentologiques des deux lacs. La similitude des caractères extrinsèques de chaque système limnologique (climat régional, caractères des bassins versants, nature de la dépression

TABEAU VI₂ : COMPARAISON HYDROLOGIQUE, SEDIMENTOLOGIQUE ET GÉOCHIMIQUE
DES SYSTÈMES LIMNOLOGIQUES DU LÉMAN ET DU BODENSEE

LEMAN			BODENSEE		
I - Affluent principal					
Rhône	- bassin versant	5 200 km ²	Rhin	- bassin versant	6 100 km ²
	débit	180 m ³ /s		débit	224 m ³ /s
	importance	75 % des apports liquides		importance	80 % des apports liquides
	débit spécifique	34,6 l/s/km ²		débit spécifique	36,7 l/s/km ²
	altitude moyenne	2 000 m		altitude moyenne	1 700 m
	régime	nivo-glaciaire		régime	nivo-glaciaire
	- éléments dissous principaux	Ca ⁺⁺ 46 mg/l HCO ₃ ⁻ 93 mg/l SO ₄ ⁻ 62 mg/l		- éléments dissous principaux	Ca ⁺⁺ 45 mg/l HCO ₃ ⁻ 118 mg/l SO ₄ ⁻ 61 mg/l
	concentration totale	220 mg/l		concentration totale	245 mg/l
	- érosion chimique	210 t/km ² /an		- érosion chimique	235 t/km ² /an
	- érosion détritique	1 150 t/km ² /an		- érosion détritique	800 t/km ² /an
Mêmes types de variation des éléments dissous et en suspension avec le débit liquide.					
II - Lac					
	- bassin versant	8 000 km ²		- bassin versant	11 000 km ²
	altitude	372 m		altitude	395 m
	surface	582 km ²		surface	536 km ²
	profondeur maximale	309 m		profondeur maximale	252 m
	volume	89 km ³		volume	49 km ³
	débit de sortie	240 m ³ /s		débit de sortie	270 m ³ /s
	temps de renouvellement moyen	11 ans		temps de renouvellement moyen	8,6 ans
	- morphologie	plaine centrale horizontale à laquelle aboutit un canyon sous-lacustre			
	- structure	dépression dans la molasse recouverte de placages de glaciaires, et remplie de sédiments lacustres.			
	- éléments dissous à l'émissaire	Ca ⁺⁺ 45 mg/l Mg ⁺⁺ 5,5 mg/l Na ⁺ 2,6 mg/l Cl ⁻ 2,5 mg/l SO ₄ ⁻ 45 mg/l HCO ₃ ⁻ 105 mg/l		- éléments dissous à l'émissaire	Ca ⁺⁺ 46 mg/l Mg ⁺⁺ 8,5 mg/l Na ⁺ 3,4 mg/l Cl ⁻ 2,9 mg/l SO ₄ ⁻ 41 mg/l HCO ₃ ⁻ 138 mg/l
	concentration totale	208 mg/l		concentration totale	243 mg/l
	- érosion chimique du bassin versant entier	190 t/km ² /an		- érosion chimique du bassin versant entier	190 t/km ² /an
	- Principaux types de sédimentation	- sédimentation détritique fine transportée en suspension dans tout le lac. - sédimentation détritique grossière par courants de turbidité à travers les canyons sous-lacustres. - sédimentation calcaire par précipitation des carbonates, prépondérante dans les régions peu profondes et éloignées des affluents principaux.			

lacustre...) explique celles des caractères intrinsèques (formes de sédimentation, etc...). Il est important de noter que les deux lacs sont en équilibre géochimique avec leurs bassins-versants. On peut à ce point de vue^{les} ranger dans la catégorie des lacs mixtes à la fois silicatés, comme les lacs du Tessin, et calcaires comme ceux du plateau suisse.

6.2. - Remarques sur les méthodes employées dans l'étude des lacs et l'établissement des bilans.

Nous avons tenté, tout au long de ce travail, d'appliquer au système limnologique les principes de la classification scalaire (L. Glangeaud, 1963) notamment en essayant de différencier les caractères intrinsèques et extrinsèques du système (L. Glangeaud, 1941) et d'identifier à chaque niveau étudié les phénomènes dominants. C'est dans cet esprit que nous avons rédigé les quelques remarques qui suivent.

6.2.1. - Etablissement des bilans.

Période d'étude : le bilan d'un système limnologique (lac et affluents) doit être soit effectué pendant un temps comparable au temps de renouvellement du système, soit sur une période plus courte en tenant compte des phénomènes caractéristiques mis en évidence.

Précision des bilans : il faut d'abord en considérer tous les termes et n'en négliger qu'après avoir déterminé les ordres de grandeur de chacun. Ainsi pour le Léman nous ne savons rien des re-tombées sèches et humides, qui sont en général de l'ordre du % dans les bilans, ni des interactions eau-sédiment : il suffit d'une dissolution suivie d'une diffusion d'une faible partie des minéraux phosphatés pour égaler les apports du Rhône.

- Il faut déterminer ensuite les *lois de variation* des éléments dissous ou en suspension et y adapter les modes de calcul. Nous avons vu que, quand les phénomènes changeaient d'échelle, les lois étaient également différentes.

- Enfin il est essentiel de *chiffrer la précision* des bilans compte tenu de toutes les erreurs commises : analyses, prélèvements, débits, mode de calcul des moyennes, apports oubliés ou extrapolés, etc... Ainsi pour notre part nous n'avons pas pu mettre en évidence la précipitation des carbonates : notre bilan des éléments dissous ne doit pas avoir une meilleure précision que 20 % et pour le bilan sédimentaire la précision est sans doute encore plus faible.

Aussi les conclusions sur l'évolution des systèmes limnologiques doivent être très prudentes compte tenu des erreurs commises et des variations interannuelles aléatoires.

6.2.2. - Emploi des lacs comme modèles réduits.

Si l'étude des lacs est primordiale pour les ressources en eau de la planète, d'un point de vue strictement scientifique un lac comme le Léman peut être considéré comme une *micro-mer intérieure*. D'ailleurs ce sont des méthodes venant de l'océanographie : carottages, sismique continue et bientôt peut être le mésoscaphe de J. Piccard, qui ont beaucoup fait progresser notre connaissance du Léman. Inversement le biologiste, le sédimentologue ou le géochimiste peuvent mener à bien sur de tels lacs des études qui seraient beaucoup plus délicates en mer. Un exemple type concerne les courants turbides qui transitent à travers le canyon du Rhône : de tels phénomènes existent partout mais leur étude est beaucoup plus facilement réalisable sur le Léman.

6.2.3. - Etude de l'érosion.

Il est encore très difficile d'extrapoler les valeurs actuelles d'érosion chimique ou détritique aux temps géologiques. En effet *les phénomènes géologiques comme l'érosion, sont essentiellement discontinus* (Glangeaud, Tricart). Ces études auront donc une *valeur quantitative ponctuelle*. Par contre elles ont une *valeur qualitative certaine* et permettent de déterminer les mécanismes des phénomènes. Pour l'érosion détritique les études de remplissage de cuvette ont des valeurs intégratives et peuvent donc donner des estimations satisfaisantes. Pour l'érosion chimique, si on considère que les lacs sont en général en équilibre chimique avec les apports de leurs bassins versants, il sera possible en étudiant leur composition d'avoir des données moyennes sur l'ensemble du bassin versant. C'est d'ailleurs ce principe qui est appliqué en paléoclimatologie et en paléogéochimie.

6.2.4. - Etude du système limnologique.

Un lac constitue un milieu récepteur dont les caractères intrinsèques -thermique, morphologie, chimisme, sédimentation, degré de trophie- sont d'abord déterminés par un certain nombre de facteurs extrinsèques régionaux : climat général (température, pluviosité, degré d'ensoleillement,...), nature géographique et géologique du bassin versant, origine géologique et âge de la dépression lacustre. Dans ce milieu récepteur on peut définir cinq ensembles scalaires bien déterminés : l'eau, les électrolytes et gaz dissous, la biomasse, les suspensions minérales et les sédiments. L'étude d'un de ces ensembles n'est possible qu'en considérant toutes ses interactions avec les autres ensembles. C'est ce que nous avons essayé de faire, autant que la bibliographie le permettait, mais de nombreuses données nous ont encore manqué notamment en biologie. Nous avons pu vérifier cette intrication des phénomènes à chaque chapitre et on comprend la définition de Vallentyne : "un limnologue est un zoologue qui, pendant l'été, étudie les aspects chimiques

et botaniques de problèmes géologiques sur des lacs facilement accessibles de 15 m de profondeur, situés au voisinage des universités". Cette boutade montre bien la difficulté d'un travail en limnologie.

Comme on ne peut pas dissocier l'étude d'un lac et celle de son bassin versant, à la notion de "lac" nous préférons donc substituer celle de "système limnologique". L'étude de tels systèmes, vu leur complexité, ne pourra être réalisée que par des équipes "transdisciplinaires" (hydrologue, géochimiste, sédimentologue, biologiste, etc...) travaillant sur des problèmes bien déterminés ; parmi les plus importants citons le retournement hivernal et la dynamique des lacs ainsi que les interactions vases-eaux. C'est dans cette voie que nous continuons de travailler au C.R.G.

B I B L I O G R A P H I E

=====

- AMBUHL H., 1969, Die neueste Entwicklung der Vierwaldstättersees.
Verh. Internat. Verein. Limnol. 17, 219-230.
- ARDESTANI H., 1965, Monographie hydrologique du bassin de la Dranse d'Abondance.
Thèse d'Ingénieur - Docteur Paris.
- BALAVOINE P., 1925, Variabilité de la composition de l'eau du lac de Genève.
C.R. seanc. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève. 42, 2, 61-63.
- BALAVOINE P., 1939, Variation de la composition de l'eau du lac de Genève.
C.R. seanc. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève 56, 36-38.
- BEETON A. M., 1965, Eutrophication of the St Laurent Great Lakes,
Limnol. Ocean. 10, 2, 240-254, 1965.
- BERTHOIS L., 1955, Apports sédimentaires en suspension dans la Loire pendant l'année 1954.
C.R. Ac. Sc. Paris, 241, 814-816.
- BERTHOIS L., 1958, Essai d'évaluation du tonnage des matières apportées en solution par les eaux de la Loire pendant l'année 1957.
Rev. Géomorph. Dyn. 9-10, 146-151.

BERTHOIS L., 1969, Apports en solution par les eaux de la Loire de 1957 à 1968.

C.R. Ac. Sc. Paris, 269, 2072-2075.

BERTHOIS L., *BARBIER M.*, 1953, Evaluation du tonnage des sédiments en suspension apportés par la Loire pendant l'année 1953.

C.R. Ac. Sc. Paris, 238, 1865-1867.

BETANT A., *PERRENOUD G.*, 1932, Etudes sur la partie occidentale du Lac de Genève. Courants et températures
Mem. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève 41, 2, 224-293.

BLANC P., *DRAY M.*, 1967, La nappe du delta de la Dranse, qualité chimique des eaux en rapport avec son alimentation.

Rev. Institut Pasteur Lyon, 1, 2, 277-295.

BLAVOUX B., 1969, Les sources minérales d'Evian.
Houille Blanche, 1, 21-29.

BLAVOUX B., *DUSSART B.*, *MANEGLIER H.*, *SALVETTI Cl.*, 1962, La région du Léman au point de vue hydrométéorologique.
Le Globe, 102, 49-68, Genève.

BLAVOUX B., *OLIVE Ph.*, 1966, Premiers résultats sur la teneur en tritium des eaux du Lac Léman.

C.R. Acad. Sc. Paris, 262, 2245-2248.

BURKARD P., 1964-1969, Rapport sur l'étude des affluents du Léman.
Voir : Commission Internationale de protection du Léman.

CANALI L., 1964, Transport de matériel en solution et en suspension du Pô.

Bull. AIHS IX, 1, 17-26.

CANALI L., *ALLODI G.*, 1962, Contribution à l'étude sur le transport solide en suspension dans les cours d'eau et sur la dégradation du sol dans le bassin du Pô.

Bull. AIHS VII, 4, 93-126.

CANALI L., *GHERARDELLI L.*, 1960, Enquête sur les caractéristiques chimiques et physico-chimiques des eaux du Pô à Polesella et recherches des matières dissoutes dans l'eau au moyen d'analyses chimiques quantitatives et spectrographiques semi-quantitatives.
Bull. AIHS N° 19, 24-36.

CARBONNEL J.P., 1965, Sur les cycles de mise en solution du fer et de la silice en milieu tropical.

C.R. Ac. Sc. Paris, série D, 260, 4035-4038.

COLLET L. W., Les lacs 1925, G. Doin. Editeur, Paris, 320p.

COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LEMAN ET DU RHONE CONTRE LA POLLUTION. Rapports à la sous-commission technique de MM. *BURKARD P.*, *LAURENT P.*, *MATTHEY G.*, *MONOD R.* et *PONGRATZ E.*

CORBEL J., 1957, L'érosion chimique des granits et silicates sous climats chauds.

Rev. Geomorph. Dyn. 1-2, 4-8, 1957.

- CROUZET E., HUBERT P., OLIVE Ph., SIWERTZ E., MARCE A., 1970, Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement.
Journal of Hydrology, 11, 217-229.
- DAVIS S.N., 1964, Silicain streams and ground water. Am. Journal Science 262, 870-891.
- DEBYSER J., 1959, Contribution à l'étude géochimiques des vases marines.
Thèse, Paris.
- DELEBECQUE A., 1898, Les lacs français.
Béranger Paris 435 p.
- DIENERT F., 1913, Etude des projets d'adduction d'eau présentés en vue de l'alimentation de Paris.
Impr. municipale, Paris.
- DUSSART B., 1954, Température et mouvement des eaux dans les lacs.
Ann. Stat. Centr. hydrobiol. Appl. 5, 5-128.
- DUSSART B., 1957, Le sondage par ultra-sons et l'étude des lacs.
Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn. 2ème série, 1, 2, 99-102.
- DUSSART B., 1961, Action des eaux courantes sur la sédimentation en lac. Verh. Internat. Verein. Limnol. XIV, 440-446.
- DUSSART B., 1963, Les grands lacs d'Europe occidentale.
Ann. Biol. II, 11-12, 499-572.
- DUSSART B., 1966, Limnologie, Gauthier Villars Paris, 677 p.

- DURUM W.H., HEIDEL S.G., TISON L.J., 1960, world wide runoff of dissolved solids. A.I.H.S. Ass. Gen. Helsinki.
Publ. 51, 618-628.
- FOREL F.A., 1892-1904, Le Léman.
Monographie limnologique. Tomes I, II et III. F. Rouge. Lausanne.
- FOURNIER F., 1960, Climat et érosion.
P.U.F. Paris, 201 pp.
- FOURNIER F., 1969, Transports solides effectués par les cours d'eau.
Bull. A.I.H.S. XIV, 3.
- GAGNEBIN E., 1937, Les invasions glaciaires dans le bassin du Léman.
Bull. lab. Geol. Univ. Lausanne, 58, 1-82.
- GAZZOLO T., BASSI G., 1960, Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eaux italiens.
A.I.H.S. Ass. Gen. Helsinki, publ. n° 53, 112-134.
- GIBBS R.J., 1967, The geochemistry of the Amazon river system. I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solid.
Geol. Soc. Am. Bull. 78, 1203-1232.
- GLANGEAUD L., 1941, Corrélation statistique, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments.
- GLANGEAUD L., 1963, L'expérience et la recherche opérationnelle dans les Sciences de la Terre et de la Nature.
Revue de Synthèse 29-31, 125-170, Paris.

- GLANGEAUD L., 1968, Revue Géogr. Phys. Géol. Dyn. 10, 83.
- GLANGEAUD L., LEENHARDT O., SERRUYA C., 1964, Structures enregistrées par le "mud penetrator" dans les sédiments quaternaires du Léman.
C.R. Ac. Sc., Paris, 258, 4816-4818.
- GONET O., 1965, Etude gravimétrique de la plaine du Rhône.
Mat. géol. Suisse n° 6.
- GONET O., 1969, Etude gravimétrique du lac Léman à bord du mésoscaphe "Auguste Piccard".
Mat. Geol. Suisse, série géophysique n° 8.
- GORHAM E., DALWAY J.S., 1965, The influence of oxidizing and reducing conditions upon the distribution of some elements in lake sediments.
Limnol. Ocean. 10, 2, 268-279.
- GOUGENHEIM A., GENNESSEAU M., THOMAS A., 1970, Nomenclature des formes de relief océanique.
Cahiers Océanographiques XXII, 8, 769-774.
- HEM J.D., 1959, Studies in interpretation of the chemical characteristics of natural water. USGS.
Water Supply Paper, 1473, 1-269 pp.
- HENSON E.B., VIBBER J.H., 1969, Precipitation into lake Champlain USA, a source of dissolved minerals. Verh. Internat. Verein. Limnol., 17, 148-153.
- HOUBOLT J.J.H.C., JONKER J.B.M., Recent sediments in the eastern part of the lake of Geneva (Lac Léman).
Géologie en mijnbouw, 47, 2, 131-148. 1968.

- HUBAULT E., 1947, Etudes thermiques, chimiques et biologiques des eaux des lacs de l'Est de la France.
Ann. Ec. Nat. Eaux et Forêts, 10, 2, 116-260.
- HUBERT P., MARIN E., MEYBECK M., OLIVE Ph., SIWERTZ E., 1969, Aspects hydrologiques, géochimiques et sédimentologiques de la crue exceptionnelle du 22 Septembre 1968 de la Dranse du Chablais.
Arch. Sc. Genève, 22, 3, 581-604.
- HUBERT P., MEYBECK M., OLIVE Ph., 1970, Etude par le tritium de la dynamique des eaux du Léman.
C.R. Ac. Sc. Paris, série D. 270, 1298-1301.
- HUTCHINSON G.E., 1957, A treatise of Limnology. John Wiley and sons edit. New-York. 1015 p.
- INTERNATIONALE GEWASSERSCHUTZ KOMMISSION FUR DEN BODENSEE., 1967, Untersuchungen zur Feststellung der Ursachen für die Verschmutzung des Bodensees.
Bericht n° 6.
- JOUKOWSKY E., BUFFLE J.P., 1938, Constitution physique et chimique des sédiments du lac de Genève.
Mem. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève, 41, 4, 415-456.
- JUDSON S., RITTER D.F., 1964, Regional denudation in the United States.
Journal Geoph. Res., 69, 16, 3395-3401.
- KUENEN P.H., 1950, Marine Geology, (p. 510).
John Wiley and sons New-York. 568 p.

KUENEN P.H., 1964, Deep sea sands and ancien turbidites.
Turbidites, 3-33. Bouma and Brouwer, Elsevier.

LAL D., 1970, Communication personnelle.

LAURENT P.J., 1966, Modifications biologiques récentes dans quelques lacs subalpins.
Bull. Ass. Romande Prot. Eaux et de l'Air (A.R.P.E.A.)
18, 47-56.

LEVINSON A.A., HITCHON B., REEDER S.W., 1969, Major element composition of the Mackenzie River et Norman Wells, NWT Canada.
Geoch. Cosmoch. Acta, 33, 1, 133-137.

LIVINGSTONE D.A., 1963, Chemical composition of rivers and lakes, in Data of geochemistry, 6 th edition, chap. G, p. G1-G64, USGS Prof. Paper 440 G.

LOMBARD A., 1939, Influences tectoniques sur le modelé du Léman.
Bull. Ass. geogr. Français, 123, 128-137.

MARTIN J.M., MEYBECK M., HEUZEL M., 1970, A study of the dynamics of suspended matter by means of radioactive tracers : an application to the Gironde estuary.
Sedimentology, 14, 27-37.

MEYBECK M., HUBERT P., OLIVE Ph., SIWERTZ E., GLANGEAUD L., 1969, Nouvelles données, obtenues par sismique continue, sur la structure de la cuvette lémanique.
C.R. Ac. Sc., Paris, série D, 269, 2503-2508.

MEYBECK M., HUBERT P., MARTIN J.M., OLIVE Ph., 1970, Etude par le tritium du mélange des eaux en milieu lacustre et estuarien. Application au lac de Genève et à la Gironde. Isotopes Hydrology 1970, 523-541.
Agence Internationale Energie Atomique. Vienne.

MONOD R., 1956, Contribution à l'étude des variations de la composition chimique de l'eau du lac Léman.
Ann. Station Centr. Hydrob. Appl., 6, 231-346.

MONOD R., 1960, L'évolution du Léman vue par le chimiste.
Revue suisse Hydrol. 22, 1, 242-256.

MONOD R., 1965, Influence des grands froids (1962-1963) sur l'état sanitaire du Léman.
Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat., 69, 2, 69-82.

MONOD R., 1959-1969, Rapport concernant les examens physiques et chimiques des eaux du Léman.
Voir Commission Internationale de Protection du Léman.

MULLER G., 1964, Zur Hydrochemie von Alpenrhein und Seerhein.
Gas und Wasserfach 105, 810-814.

MULLER G., 1966, a. The new Rhine delta in lake Constance. Deltas in their Geologic framework, 107-124. Houston Geological Society.

MULLER G., 1966, b. Die Sedimentbildung in Bodensee.
Die Naturwissenschaften, 10, 237-247.

MULLER G., 1967, Beziehungen zwischen Wasserkörper, Bodensediment und Organismen in Bodensee.
Die Naturwissenschaften, 17, 454-466.

- MULLER G., FORSTNER U., 1968, General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenrhein and some others rivers.
Nature, 217, 5125, 244-245.
- MULLER G., GEES R.A., 1968, Origin of lake Constance Basin.
Nature, 217, 836-837.
- MULLER G., GEES R.A., 1970, Distribution and thickness of quaternary sediments in the lake Constance Basin.
Sediment. Geol., 4.
- MULLER G., TIEZ G., 1966, Der Phosphor -Gehalt des Bodensee- Sedimente, seine Beziehung zur Herkunft des Sediment-Materials sowie zum Wasserkörper des Bodensees.
N. Jb. Miner. Abh. 105, 1, 41-62.
- PARDE, 1933, Fleuves et rivières. Armand Colin, Paris, 221 pp.
- PARDE M., 1952, Sur les valeurs des turbidités spécifiques des rivières. La houille blanche 1952, 2ème journées de l'Hydraulique.
- PAREJAS E., 1929, L'épaisseur des varves dans le Haut-Lac de Genève.
Union générale des Rhodaniens. 3ème congrès du Rhône, 207-211. Naville Editeur. Genève.
- PORTNER C., 1951, La formation du sédiment calcaire du lac de Neuchatel.
Rev. Suisse Hydrol. XIII, 2, 199-290.
- RAMUZ, Composition chimique de l'eau du Léman. 1957.
Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. 66, 294, 369-375.

- ROMIEUX J., Les carbonates dans les sédiments du lac de Genève.
Thèse Genève 1930. Arch. Sc. Genève 12, 3-4, 202-232.
- SAINTIGNON M.F., de, 1970, La sécheresse d'Octobre 1969 dans les Alpes Françaises.
Rev. Geogr. Alpine, LVIII, 2, 367-377.
- de SAUSSURE H.B., 1779, Voyages dans les Alpes. Neuchatel.
- SAUVAGE J., 1969, Etude sporo-pollinique des sédiments récents du Léman. Docum. Lab. Géol. Fac. Sc. Lyon, 31, 11-27.
- SAYAR M., 1966, Etude géologique, hydrologique, hydrogéologique, climatologique, limnologique, hydrochimique du bassin de la Dranse de Morzine.
Thèse 3ème cycle, Paris.
- SEMENTOVICH N.I., 1966, Bottom deposits of lake Ladoga, AIHS Symposium de Garde, publ n°70, 502-510.
- SERRUYA C., 1969, Les dépôts du lac Léman en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre.
Arch. Sc., Genève, 22, 1, 125-254.
- SERRUYA C., LEENHARDT O., GLANGEAUD L., 1966, Structures et évolution post-oligocène de la région du lac Léman.
C.R. Acad. Sc. Paris, 259, 1752-1755.
- SERRUYA C., VERGNAUD-GRAZZINI C., 1967, Evolution paléoclimatologique des sédiments du Lac Léman.
Arch. Sc. Genève 19, 2, 197-210.

SHEPARD F.P., DILL R.F., 1966, Submarine canyon and others sea valleys.
Rand Mc Nally. Chicago.

TRICART J., 1962, Les discontinuités dans les phénomènes d'érosion.
A.I.H.S. Colloque de Bari. Publ. n° 59, 233-243.

VERNET J.P., 1969, Etude pétrographique des matières en suspension dans
le Rhône et ses affluents.
Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. 70, 5, 215-221.

VIVIER P., ORAND A., 1966, Sur les variations de quelques éléments
chimiques dans le lac de Nantua. Mélanges à Maurice
Pardé, 717-728. Grenoble.

VIVIER P., SERRUYA S., ORAND A., 1967, Caractères généraux de la pol-
lution organique du lac de Nantua.
Revue Institut Pasteur Lyon, 1, 3, 411-429.

WAIBEL F., 1962, Das Rheindelta in Bodensee, 10. Osterr. Rheinbaulei-
tung. Bregenz.

WINNOCK E., 1965, Sismique sur le Léman, résultats obtenus avec le
sparker.
Bull. Ver. Schweiz. Petr. Geol. Ing. 32, 82, 39-48.

YOUNG A., 1969, Present rate of land erosion.
Nature 224, 851-852.

ZENDER J., 1908, Sur la composition chimique de l'eau et des vases
des grands lacs de la Suisse.
Thèse. Université Genève.

LISTE DES FIGURES

Pages

CHAPITRE I.

I ₁	Les Grands Lacs périalpins.	5
I ₂	Le Bassin Versant du Léman.	5
I ₃	Le Léman, carte bathymétrique, coupes bathymétriques et courbe hypsomé- trique.	7
I ₄	Le Léman : évolution thermique de CRG 3 en 1968.	7
I ₅	Carte structurale de la région du Léman.	9

CHAPITRE II.

II ₁	Variation des éléments dissous du Rhône avec le débit.	17 à 19
a	HCO ₃ ⁻	e Na ⁺
b	Ca ⁺⁺	f K ⁺
c	SO ₄ ^{- -}	g SiO ₂
d	Mg ⁺⁺	h Cl ⁻
II ₂	Rhône. Corrélations entre les éléments dissous.	21 et 22
a	Cl ⁻	Na ⁺
b	SO ₄ ^{- -}	Mg ⁺⁺
c	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺
II ₃	Carte du bassin versant de la Dranse.	22

II ₄	Variation des éléments dissous de la Dranse avec le débit.	25 à 28
a	HCO ₃ ⁻	e Na ⁺
b	Ca ⁺⁺	f SiO ₂
c	SO ₄ ^{- -}	g Cl ⁻
d	Mg ⁺⁺	h NO ₃ ⁻
II ₅	Dranse. Corrélation entre les éléments dissous.	30 et 31
a	Cl ⁻ - Na ⁺	c Mg ⁺⁺ - SO ₄ ^{- -}
b	Ca ⁺⁺ - HCO ₃ ⁻	d SiO ₂ ⁻ - NO ₃ ⁻
II ₆	Hydrogrammes de la Dranse et du Rhône.	33
II ₇	Variation de la concentration globale du Rhône.	43
II ₈	Variation de la concentration globale de la Dranse.	43
II ₉	Variation de la teneur en sulfates pour le Rhin, le Rhône et la Dranse.	43
II ₁₀	Variation de la concentration globale en fonction du débit pour 6 rivières.	50

CHAPITRE III.

III ₁	Les stations Hydrologiques sur le Léman	57
III ₂	Variation des éléments dissous dans la couche superficielle à CRG 3.	58
III ₃	Caractères physicochimiques des eaux à CRG 3.	63
a	température	
b	oxygène	
c	pH	
d	transparence	
III ₄	Evolution des bicarbonates, calcium, sulfates et silice à CRG 3.	66

III ₅	Evolution des HCO ₃ , SO ₄ , silice pour la couche superficielle du Léman.	71
III ₆	Variation de la concentration globale du lac. Couche superficielle.	71
III ₇	Variation de la concentration globale moyenne du lac. Couche moyenne.	73
III ₈	Variation de la concentration globale moyenne du lac. Couche intermédiaire.	73
III ₉	Schéma de la circulation générale du Léman.	84
III ₁₀	Evolution des teneurs en tritium au centre du Léman.	84
III ₁₁	Variation des teneurs en silice au point CRG 10.	86
III ₁₂	Variation des teneurs en tritium à CRG 9 et CRG 21 avant et après la crue de la Dranse.	87
III ₁₃	Evolution des éléments principaux dans le Léman depuis 1808.	96
III ₁₄	Variation comparée de la transparence en 1874 et 1968.	96
III ₁₅	Evolution du caractère eutrophe du Léman.	96
A	Transparence	
B	Oxygène dissout	
C	Tonnage global des éléments azotés et phosphorés.	

CHAPITRE IV.

IV ₁	Charge en suspension du Rhône et du Rhin de 1965 à 1967.	125
IV ₂	Rhône (Porte de Scex). Relation entre la charge en suspension et le débit liquide, comparaison des années 1965 et 1966.	127

IV ₃	Rhône (Porte de Scex). Relation entre la charge en suspension Cs et le débit liquide Ql. Différence entre crues et décrues pour les périodes de hautes eaux des années 1965-1966 et 1967.	127
IV ₄	Dranse du Chablais - Relation charge en suspension - débit liquide.	127
IV ₅	Erosion détritique - érosion chimique.	136
IV ₆	Variation de la concentration en éléments dissous en fonction du débit spécifique.	136
IV ₇	Analyses granulométriques de la fraction grossière.	140
IV ₈	Photo de l'installation de filtration.	144
IV ₉	Schéma de l'installation de filtration.	146
IV ₁₀	Installation de filtration. Schéma d'une cuve	146
IV ₁₁	Emplacement des prélèvements de sédiments superficiels.	153
IV ₁₂	Profils transverses du canyon du Rhône.	155
IV ₁₃	Profil bathymétrique St-Gingolph-Vevey.	155
IV ₁₄	Description des carottes LZ 11 et LZ 7.	158
IV ₁₅	Description des carottes LZ 4 et LZ 8.	160
IV ₁₆	Description des carottes LZ 1 et LZ 10.	162
IV	Teneur en carbonate dans le Léman.	168
IV	Variations des teneurs en silice et en CaCO ₃ dans les sédiments superficiels.	168

CHAPITRE V.

V ₁	Etudes de sismiques continues 1964-1969 (trajets et appareils utilisés).	188
V ₂	Schéma structural de la région lémanique. Trajets des profils sismiques.	188
V ₃	Profils sismiques et leur interprétation	
V _{3a}	Coupe A ₂₄ .	190
V _{3b}	Coupe B ₁₀ .	192
V _{3c}	Coupe B ₂₃ .	194

V ₄	Réfecteur profond d'Evian : coupes, interprétations et trajets.	196
V ₅	Carte des isochrones du toit de la molasse.	200
V ₆	Epaisseur du niveau glaciaire supérieur.	203
V ₇	Epaisseur des sédiments lacustres.	203
V ₈	Schéma du remplissage de la cuvette lémanique.	203

L I S T E D E S T A B L E A U X
=====

	Pages
I ₁ Caractéristiques morphométriques du Léman.	4
II ₁ Comparaison des analyses chimiques des trois Dranses du Chablais.	51
II ₂ Analyses chimiques du Rhône à l'entrée du Léman.	52
II ₃ Bilan des apports dissous du Rhône.	41
II ₄ Bilan des apports dissous de la Dranse.	45
II ₅ Erosion chimique spécifique par éléments, du Rhône, de la Dranse et du Rhin alpestre.	45
III ₁ Coordonnées des stations de prélèvements hydrologiques.	56
III ₂ Analyses chimiques complètes du Rhône à la sortie du Léman.	109
III ₃ Concentrations en HCO_3^- , Ca^{++} , SO_4^{--} et silice dis- soute. Valeurs extrêmes observées en Février 1968 et Mars 1970 dans l'ensemble du Léman, Genève excepté.	110
III ₄ Valeurs extrêmes de la concentration globale rencon- trées dans le Léman de Novembre 1967 à Mars 1970 (sur environ 700 analyses).	161
III ₅ Concentrations en HCO_3^- , Ca^{++} , SO_4^{--} et silice dis- soute dans la couche superficielle. Evolution des points 3, 4, 6, 9, 21, 22, 23 de Février 1968 à No- vembre 1969.	111
III ₆ Moyennes annuelles par points, par couches des concen- trations de 9 éléments analysés couramment. Année 1968.	112
III ₇ Moyennes annuelles par points, par couches des concen- trations de 9 éléments analysés couramment. Année 1969.	113
III ₈ Concentration globale en éléments dissous par points et par couches de Février 1968 à Mars 1970.	114

	Pages
III ₉ Teneurs moyennes en éléments dissous du Léman en 1968.	115
III ₁₀ Teneurs moyennes en éléments dissous du Léman en 1969.	115
III ₁₁ Analyse chimique complète du Lac Léman.	116
III ₁₂ Analyse chimique comparée d'un courant turbide.	93
III ₁₃ Bilan global (en tonnes) du Léman pour 1968 par élément, effectué sans tenir compte de la variation de teneur du lac.	117
III ₁₄ Erosion spécifique comparée, par éléments, des bassins versants du Léman et du Bodensee.	106
IV ₁ Débits liquides et solides du Rhône en 1967.	180
IV ₂ Erosions spécifiques, chimiques et détritiques des rivières alpines comparées à d'autres rivières.	181
IV ₃ Analyses physiques des sédiments.	182 et 183
IV ₄ Analyses chimiques des éléments majeurs des apports du Rhône, de la Dranse, des suspensions et des sédiments du Léman. Valeurs moyennes et extrêmes.	184
IV ₅ Apports moyens annuels en suspension des éléments majeurs au Léman.	151
IV ₆ Analyses chimiques des éléments majeurs des sédiments superficiels.	185
IV ₇ Variation dans les vases du Léman des éléments majeurs en fonction de la teneur en silice et en CO ₂ .	186
IV ₈ Erosions chimiques et détritiques comparées par éléments.	178
VI ₁ Bilan du Léman.	213
VI ₂ Comparaison hydrologique, sédimentologique et géochimique des systèmes limnologiques du Léman et du Bodensee.	214

S O M M A I R E

	Pages
INTRODUCTION.	1
 <u>CHAPITRE I - CARACTERES GENERAUX DU LEMAN.</u>	
1.1. - Données morphométriques.	4
1.2. - Hydrologie.	6
1.3. - Bathymétrie.	6
1.4. - Thermique et chimie des eaux.	8
1.5. - Géologie.	8
1.6. - Climat de la région du Léman.	10
1.7. - Comparaison du Léman et du Bodensee.	11
 <u>CHAPITRE II - APPORTS DES RIVIERES EN ELEMENTS DISSOUS.</u>	
2.1. - Caractères de l'étude chimique des affluents du Léman.	12
2.2. - Méthodes d'analyses employées.	13
2.3. - Variations des éléments dissous dans le Rhône.	15
2.3.1. - Caractères du bassin.	15
2.3.2. - Corrélation entre la concentration et le débit liquide.	15
2.3.3. - Corrélation entre les éléments.	20

	Pages
2.4. - Variations des éléments dissous dans la Dranse.	23
2.4.1. - Caractères du bassin.	23
2.4.2. - Corrélation entre la concentration et le débit liquide.	23
2.4.3. - Corrélation entre les éléments.	29
2.4.4. - Etude du chimisme de certains épisodes hydrologiques.	32
2.4.5. - Origine géographique des éléments de la Dranse du Chablais.	35
2.4.6. - Origine géochimique des éléments dissous de la Dranse.	35
2.5. - Bilan des apports au Léman.	36
2.5.1. - Mode de calcul des bilans.	36
2.5.2. - Bilan des apports du Rhône.	40
2.5.3. - Bilan des apports de la Dranse.	44
2.6. - Erosion des bassins versants par dissolution.	46
2.6.1. - Erosion spécifique pour chaque élément	46
2.6.2. - Cas de la silice.	48
2.6.3. - Conclusion.	49
 <u>CHAPITRE III - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LEMAN ET BILAN DES ELEMENTS DISSOUS.</u>	
A - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LAC	53
3.1. - Histoire de l'étude chimique des eaux du Léman et position du problème.	53

	Pages
3.2. - Prélèvements et analyses.	56
3.2.1. - Points de prélèvements du CRG.	56
3.2.2. - Fréquence des prélèvements.	58
3.2.3. - Profondeur des prélèvements.	58
3.2.4. - Eléments étudiés.	58
3.2.5. - Problèmes de méthodologie.	59
3.3. - Variabilité de la composition chimique.	60
3.3.1. - Valeurs extrêmes du Léman.	60
3.3.2. - Etude physico-chimique et chimique du lac au point CRG 3.	62
3.3.2.1. - Caractères physico-chimiques généraux.	62
3.3.2.2. - Etude des éléments à fortes variations.	64
3.3.2.3. - Eléments à faibles variations.	68
3.3.2.4. - Conclusion de l'étude chimique au point CRG 3.	68
3.3.3. - Etude chimique globale du Léman.	70
3.3.3.1. - Variations saisonnières.	70
3.3.3.2. - Variations suivant la profondeur.	72
3.3.3.3. - Variations suivant les régions du lac.	74
3.3.4. - Etude des eaux de l'émissaire à Genève.	76
3.3.4.1. - Comparaison avec le reste du lac.	76
3.3.4.2. - Teneurs moyennes à l'émissaire.	77

	Pages
3.3.5. - Conclusions de l'étude chimique globale du Léman.	78
3.3.6. - Concentration moyenne annuelle du Léman et variations interannuelles.	79
3.4. - Problème de la circulation générale du lac et du renouvellement des eaux.	81
3.4.1. - Position du problème.	81
3.4.2. - Etude isotopique par le tritium.	82
3.4.3. - Emploi de la silice comme élément traceur.	85
3.4.4. - Conclusion.	87
3.5. - Pénétration du Rhône et de la Dranse dans le Léman.	87
3.5.1. - Etudes antérieures.	87
3.5.2. - Etude chimique générale.	89
3.5.3. - Etude isotopique par le tritium.	89
3.6. - Evolution des caractères physico-chimiques du Léman depuis 1870.	94
3.6.1. - Evolution des éléments principaux.	94
3.6.2. - Evolution du caractère eutrophe.	95
3.6.2.1. - Transparence.	95
3.6.2.2. - Oxygène.	97
3.6.3.3. - Eléments nutritifs.	97
3.6.3. - Comparaison du Léman et des grands lacs du St-Laurent.	99
<i>B - BILAN DES ELEMENTS SOLUBLES DU BASSIN DU LEMAN.</i>	101
3.7. - Problèmes posés par l'établissement du bilan.	101
3.7.1. - Les termes du bilan.	101
3.7.2. - Période de calcul du bilan.	103

	Pages
3. 8. - Bilan.	103
3.8.1. - Bilan sans tenir compte de la variation du lac.	103
3.8.2. - Bilan en tenant compte de la variation du lac.	104
3.8.3. - Bilan sur plusieurs années.	105
3. 9. - Erosion chimique du bassin versant du Léman.	105
3.10. - Conclusions générales de l'étude et du bilan chimique des eaux du Léman.	107

CHAPITRE IV - BILAN SEDIMENTAIRE ET SEDIMENTATION ACTUELLE DU LEMAN.

<i>A - LES APPORTS TERRIGENES.</i>	118
4.1. - Erosion du bassin du Léman.	118
4.1.1. - Méthodologie.	118
4.1.1.1. - Mesures de turbidités.	118
4.1.1.2. - Méthodes de calculs.	120
4.1.2. - Apports du Rhône.	123
4.1.2.1. - Variations saisonnières et interannuelles.	124
4.1.2.2. - Variation de la charge solide au sein d'une crue.	126
4.1.2.3. - Calcul des apports du Rhône pour 1967.	126
4.1.2.4. - Apports solides du Rhône au Léman.	130
4.1.3. - Apports de la Dranse.	131
4.1.4. - Effets des crues.	132
4.1.5. - Comblement du Léman.	133

	Pages
5.5. - Comparaison entre la structure du Léman et celle du Bodensee.	204
5.6. - Conclusions	204
 <u>CHAPITRE VI - CONCLUSIONS GENERALES.</u>	
6.1. - Conclusions spécifiques.	207
6.1.1. - L'érosion dans le bassin versant du Léman.	207
6.1.2. - La sédimentation du Léman.	209
6.1.3. - Composition chimique des eaux du Léman.	210
6.1.4. - Remplissage de la cuvette lémanique et bilan du bassin versant du Léman.	212
6.1.5. - Comparaison du Léman et du Bodensee.	213
6.2. - Remarques sur les méthodes employées dans l'étude des lacs et l'établissement des bilans.	215
6.2.1. - Etablissement des bilans.	215
6.2.2. - Emploi des lacs comme modèles réduits.	216
6.2.3. - Etude de l'érosion.	217
6.2.4. - Etude du système limnologique.	217
 BIBLIOGRAPHIE.	 219
 LISTE DES FIGURES.	 231
 LISTE DES TABLEAUX.	 236
 SOMMAIRE.	 238

E R R A T A

=====

- Dans le tableau IV₃, p 183, lire LB_{15F} 320 μ au lieu de LB_{15S} 320 μ.
- Il y a une légère différence pour les érosions chimiques du Rhin alpestre entre les tableaux IV₂ (p 181) et VI₂ (p 214). Cette différence s'explique par les données bibliographiques contradictoires concernant la surface exacte du bassin versant du Rhin, la valeur la plus probable est de 235 t/km²/an.